



UNIVERSITE BATNA -2-



INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DE GEOGRAPHIE ET

AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

THESE EN VU DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT (3 Cycle LMD)

OPTION : AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

Intitulé :

**L'impact du recouvrement des oueds de Batna sur la dynamique  
des écoulements et les risques associés.**

Présenté par GUELLOUH SAMI

Devant les membres du jury :

<b>Mr. Kalla Mahdi</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Batna 2</b>	<b>Président</b>
<b>Mme. Dridi Hadda</b>	<b>Professeur</b>	<b>Université de Batna 2</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Mr. Guttouche M<sup>ed</sup> Said</b>	<b>Professeur</b>	<b>USTHB</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. Boutiba Makhoulf</b>	<b>Professeur</b>	<b>USTHB</b>	<b>Examineur</b>

ANNEE UNIVERSITAIRE : 2016-2017

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

**Je dédie ce travail à :**

**La mémoire de mon père**

**Ma mère**

**Mes frères et ma sœur**

**Mes amis et à toute la famille**

## **Remerciements**

J'adresse en premier lieu mes remerciements les plus sincères à mon directeur de thèse, Pr. Mme DRIDI HADDA, pour les conseils et les directives qu'elle m'a donnés jusqu'à l'aboutissement de ce travail. Mes vifs remerciements vont ainsi au Pr. Mr KALLA MAHDI pour ses conseils avisés sur la conduite de mon travail et son encouragement.

Mes remerciements à tous mes enseignants et enseignantes pendant tout mon parcours d'études pour le savoir qu'ils m'ont transmis.

Mes gratitudee vont aussi à ma famille et mes amis.

Enfin, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui m'ont apporté leur aide pour mener à bien ce travail.

## **RESUME :**

Compte tenu des changements climatiques globaux qui semblent influencer sur la fréquence et l'intensité des inondations et dont les dommages sont grandissants, la connaissance des mécanismes hydrologiques, notamment leurs manifestations spatio-temporelles et leur forme extrême est devenue une préoccupation capitale pour les collectivités locales en termes de prévision.

La présente étude vise à cartographier le risque inondation qui passe inévitablement par la combinaison de l'aléa et les enjeux socio-économique exposé (vulnérabilité).

Certains aménagements réalisés dans la ville de Batna relatifs au recouvrement des canaux assurant la protection de la ville contre les inondations auront inévitablement des répercussions sur les conditions d'écoulement et les risques qui pourraient en découler.

Nous avons procédé à une analyse et une modélisation permettant d'évaluer l'impact de ces changements.

En effet l'implémentation d'une base de données SIG nous a permis d'effectuer une analyse spatiale de l'étendue du risque d'inondation en y intégrant un programme de modélisation hydraulique à déférente fréquences HEC ras.

Les résultats montrent que les aménagements réalisés sous forme des canaux à double orifices recouverts ne peuvent répondre aux débits supérieurs à une récurrence décennale, par conséquent un risque résiduel important demeure non explicite.

En s'appuyant sur les résultats de cette analyse, les décideurs peuvent disposer de données pertinentes telles que l'étendu de la crue ainsi que le niveau de submersion nécessaires à l'évaluation du niveau du risque.

**Mots clés :** Risque, Aléa, Vulnérabilité, Batna, Inondations, SIG, Modélisation hydraulique.

## **ABSTRACT:**

In the light of the global climatic changes that appear to influence the frequency and the intensity of floods, and whose damage is still growing; it is crucial to understand the hydrological processes, their spatio-temporal setting and their external shape.

The purpose of this study is to map the flood risk which inevitably includes the combination of hazards and the vulnerable socio-economic issues.

Some developments and adjustments conducted in the city of Batna; that is to say, covering the channels to protect the city from the floods would have inevitably repercussions on the conditions of the water flow and the risks that may result from it.

We will do a situational analysis and modeling; allowing to evaluate the impact of these changes. In fact, using the operating Geographic Information System (SIG), would allow us to perform a more detailed spatial analysis about the extent of the flooding risk, through the approval of the hydraulic modeling programs in different frequencies.

The results suggest that the developments carried out in the form of a covered dual-orifice-channel cannot go with flows frequencies that exceeded the decadal recurrence. In its aftermath, an important residual risk would become non-explicit.

Based on this summary analysis, decision makers can have relevant data such as the extent of the flood and the flood level needed to assess the level of risk.

**Keywords:** Risk, Hazard, Vulnerability, Batna, Floods, modeling, GIS, Hydraulic modeling.

## SOMMAIRE

ABSTRACT & RESUME

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE ..... 2

### **Chapitre 01. CADRE THEORIQUE : LE RISQUE D'INONDATION, TYPOLOGIE, GRAVITE, ET GESTION.**

Introduction..... 7

1. Le risque d'inondation..... 7

2. Risque : aléa et vulnérabilité..... 8

3. Typologie des inondations .....	10
4. La gravité des inondations.....	11
4.1. L'inondation de Bâb El oued à Alger le 9 et le 11 Novembre 2001.....	13
4.2. L'inondation de Ghardaïa le 01 octobre 2008.....	14
5. La gestion du risque d'inondation.....	15
5.1. La prévention .....	17
5.2. La prévision.....	18
5.3. La protection et la gestion de crise.....	18
6. Modélisation du risque d'inondation.....	19
6.1. La modélisation hydrologique .....	20
6.2. La modélisation hydraulique.....	20
6.3. Le modèle cartographique.....	21
7. Les systèmes d'information géographique.....	21
Conclusion.....	21

## **Chapitre 02. PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE**

Introduction.....	23
-------------------	----



1. Situation géographique de la ville de Batna .....	23
2. Les caractéristiques climatologiques.....	24
2.1. Les précipitations.....	25
2.1.1. La variation annuelle des précipitations.....	25
2.1.2. La variation saisonnière des précipitations .....	26
2.1.3. Les variations mensuelles des précipitations.....	27
2.2. Les températures.....	28
2.3. Evaporation.....	29
2.4. L'évapotranspiration et bilan.....	30
2.5. Le ruissellement.....	30
2.6. L'infiltration.....	31
3. Délimitation des sous bassins drainant la ville de Batna.....	31
3.1. Le Remplissage des cuvettes (FILL SINKS).....	31
3.2. La direction des flux (FLOW DIRECTION).....	32
3.3. Accumulation d'écoulement (FLOW ACCUMULATION).....	34
3.4. La définition et détermination du réseau d'écoulement (STREAM DEFINITION).....	35
3.5. La segmentation du réseau d'écoulement (STREAM SEGMENTATION).....	36
3.6. Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT GRID DELINEATION).....	37
3.7. Délimitation des sous-bassins en format vecteur (CATCHMENT POLYGON PROCESSING).....	38
3.8. Conversion le réseau hydrographique en mode vecteur (DRAINAGE	

LINE PROCESSING).....	38
3.8. La délimitation des sous bassin drainant la ville de Batna.....	39
Conclusion.....	40

**Chapitre 03. ESTIMATION ET CARTOGRAPHIE DES PLUIES EXTREMES DANS  
L'IMLUVIUM DE BATNA.**

Introduction.....	43
1. Présentation et étude physique de l'impluvium de Batna.....	44
2. L'analyse fréquentielle.....	45
2.1. Le test de stationnarité, test d'indépendance et celui d'homogénéité.....	45
2.2. Les lois de distribution des pluies annuelles maximales.....	46
2.2.1. La loi Généralisée des Valeurs Extrêmes GEV.....	46
2.2.2. La loi de Gumbel.....	46
2.2.3. La loi Log-Normale.....	47
2.2.4. L'estimation des paramètres des fonctions de distribution.....	47
2.3. La Validité des modèles.....	47
3. L'interpolation.....	47
3.1. L'IDW ou la pondération inverse à la distance.....	48
3.2. Le Spline ou la méthode polynomiale locale optimisée.....	48
3.3. Le krigeage ordinaire.....	48

4. Résultats et discussion.....	48
4.1. Résultats des deux tests.....	48
4.2. Le choix de distribution et les quantiles calculés.....	55
4.3. L'interpolation des pluies Extrêmes estimées.....	56
Conclusion.....	59

## **Chapitre 4** ETUDE PHYSIQUE DE L'IMPLUVIUM DE BATNA

1. Etude physique de l'impluvium de Batna.....	61
1.1. Les caractéristiques géométriques.....	61
1.1.1. La surface et le périmètre.....	61
1.1.2. La forme.....	61
1.2. Les reliefs.....	61
1.2.1. La carte hypsométrique.....	62
1.1.2. La carte des pentes.....	63
1.3. Le réseau d'écoulement.....	64
1.3.1. Le réseau hydrographique.....	65
1.4. La densité de drainage.....	66
1.5. La géologie.....	67

1.5.1. Carte de perméabilité.....	68
1.6. Le couvert végétal.....	69
2. Aléa inondation dans l'impluvium de Batna.....	71
Conclusion.....	77

## **Chapitre 5 ANALYSE HYDROLOGIQUE**

Introduction.....	79
1. Les données physiques et pluviométriques des sous-bassins.....	79
2. Le calcul des paramètres.....	81
2.1. Le coefficient de ruissèlement pour chaque sous- bassin.....	81
2.2. Le temps de concentration pour chaque sous- bassin.....	83
2.2. 1. Formule de Giondotti.....	84
2.2.2. Formule de Turazza.....	84
2.2.3. Formule de Ventura.....	84
2.3. Intensité maximale des précipitations pendant une durée égale au temps de concentration.....	85
3. Le calcul des débits max $Q_{max}$ pour chaque sous-bassin.....	86
3.1. La formule de Turazza.....	86
3.2. La formule de Burkli-Ziegler.....	87
4. L'analyse fréquentielle des débits max de la station hydrométrique de Fesdis.....	88

5. La comparaison des résultats et validation.....	89
Conclusion.....	90

## **Chapitre 6 ETUDE HYDRAULIQUE**

Introduction.....	92
1. La modélisation hydraulique sous HEC RAS .....	93
Conclusion.....	104

## **Chapitre 6 ANALYSE DE LA VULNERABILITE ET DE SYNTHESE**

1. Analyse de la vulnérabilité.....	107
1.1. Densité de la population par district.....	107
1.2. Tissu urbain.....	108
1.3. Le réseau routier.....	109
2. Etude de synthèse.....	114
Conclusion.....	116
COCLUSION GENERALE.....	118

## **REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE**

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b> Typologie des inondations.....	10
<b>Figure 2.</b> Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007.....	12
<b>Figure 3.</b> Nombre de personnes affectées par les catastrophes naturelles entre 2000 et 2007..	12
<b>Figure 4.</b> La gestion du bassin versant dans le contexte de la prévention du risque hydrologique.....	17
<b>Figure 5.</b> Champs d'intervention dans la gestion des inondations.....	19
<b>Figure 6.</b> La situation géographique de la zone d'étude.....	23
<b>Figure 7.</b> La ville de Batna.....	24
<b>Figure 8.</b> La variation saisonnière des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).....	27
<b>Figure 9.</b> La variation mensuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).....	28
<b>Figure 10.</b> Températures moyenne mensuelle Ain Skhouna (1971-2011).....	29
<b>Figure 11.</b> Le Remplissage des cuvettes (FILL SINKS) sous Arc Hydro Tools.....	32
<b>Figure 12.</b> Le principe du codage (direction des flux) .....	33
<b>Figure 13.</b> La direction des flux (FLOW DIRECTION) sous Arc Hydro Tools.....	33
<b>Figure 14.</b> Le principe du codage de l'accumulation des flux.....	34
<b>Figure 15.</b> Accumulation des flux (FLOW ACCUMULATION) sous Arc Hydro Tools.....	35
<b>Figure 16.</b> La définition des ruissèlements (STREAM DEFINITION) sous Arc Hydro Tools.....	36
<b>Figure 17.</b> Les segmentations du réseau d'écoulement.....	36
<b>Figure 18.</b> La segmentation des flux (STREAM SEGMENTATION) sous Arc Hydro Tools.....	37

<b>Figure 19.</b> Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT GRID DELINEATION) sous Arc Hydro Tools.....	38
<b>Figure 20.</b> Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT POLYGON PROCESSING) en format vecteur sous Arc Hydro Tools.....	39
<b>Figure 21.</b> Les sous-bassins et le réseau hydrographique en format vecteur.....	39
<b>Figure 22.</b> La délimitation du sous-bassin de Tazoult.....	40
<b>Figure 23.</b> Le sous-bassin de Tazoult.....	40
<b>Figure 24.</b> L'impluvium de Batna.....	44
<b>Figure 25.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Tazoult).....	49
<b>Figure 26.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Batna).....	49
<b>Figure 27.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Batna).....	50
<b>Figure 28.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Segeune).....	50
<b>Figure 29.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Ben Tanoune).....	51
<b>Figure 30.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Ras El Ma).....	51
<b>Figure 31.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Timgad).....	52
<b>Figure 32.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Ain Skhoune).....	52
<b>Figure 33.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Oued El Ma).....	53
<b>Figure 34.</b> Comparaison graphiques des ajustements (Station de Ain Yagout).....	53
<b>Figure 35.</b> Interpolation IDW.....	56
<b>Figure 36.</b> Interpolation par Spline.....	57
<b>Figure 37.</b> Interpolation KO.....	57

<b>Figure 38.</b> Les pluies maximales centennales de l'impluvium de Batna.....	59
<b>Figure 39.</b> Carte hypsométrique de l'impluvium de Batna.....	63
<b>Figure 40.</b> Carte des pentes en %.....	64
<b>Figure 41.</b> Carte du réseau d'écoulement.....	65
<b>Figure 42.</b> Carte du réseau hydrographique.....	66
<b>Figure 43.</b> La densité de drainage.....	67
<b>Figure 44.</b> Carte Lithologique du l'impluvium de Batna.....	68
<b>Figure 45.</b> Carte de perméabilité du l'impluvium de Batna.....	69
<b>Figure 46.</b> Carte du couvert végétal du l'impluvium de Batna.....	70
<b>Figure 47.</b> Aléa inondation dans l'impluvium de Batna.....	77
<b>Figure 48.</b> Les sous bassins drainant la ville de Batna.....	80
<b>Figure 49.</b> Classification supervisée d'une image satellitaire des sous bassins qui drainent la ville de Batna.....	82
<b>Figure 50.</b> Ajustement des débits max par la loi de Gumbel.....	89
<b>Figure 51.</b> La fenêtre principale du logiciel HEC-RAS.....	92
<b>Figure 52.</b> Les entités modélisées sous ARC GIS.....	95
<b>Figure 53.</b> Les entités modélisées sous HEC Ras.....	95
<b>Figure 54.</b> La fenêtre des données géométriques du logiciel HEC ras.....	96
<b>Figure 55.</b> Le profil transversal du canal Ceinture.....	97
<b>Figure 56.</b> Le profil transversal du canal Talweg.....	97
<b>Figure 57.</b> Intégration des débits pour chaque canal et pour différentes période de retours..	98



<b>Figure 58.</b> Conditions aux limites pour chaque canal.....	98
<b>Figure 59.</b> Le choix du régime d'écoulement.....	99
<b>Figure 60.</b> La vitesse d'écoulement en m/s (canal ceinture).....	99
<b>Figure 61.</b> La vitesse d'écoulement en m/s (canal Talweg).....	100
<b>Figure 62.</b> Résultats de simulation à l'entrée du canal Ceinture.....	100
<b>Figure 63.</b> Résultats de simulation à l'entrée du canal Talweg.....	101
<b>Figure 64.</b> la simulation de la crue décennale.....	102
<b>Figure 65.</b> La simulation de la crue cinquantiennale.....	103
<b>Figure 66.</b> La simulation de la crue centennale.....	103
<b>Figure 67.</b> La simulation de la crue millénaire.....	104
<b>Figure 68.</b> La densité de la population par district.....	108
<b>Figure 69.</b> Le tissu urbain.....	109
<b>Figure 70.</b> Le réseau routier.....	110
<b>Figure 71.</b> L'extension AHP. ....	111
<b>Figure 72.</b> Carte de vulnérabilité.....	114
<b>Figure 73.</b> Carte du risque d'inondation.....	115

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Les coordonnées de la station météorologiques Ain Skhouna.....	25
<b>Tableau 2.</b> La variation annuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).....	26
<b>Tableau 3.</b> La variation saisonnière des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).....	26
<b>Tableau 4.</b> La variation mensuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).....	27
<b>Tableau 5.</b> Températures moyenne mensuelle Ain Skhouna (1971-2011).....	28
<b>Tableau 6.</b> L'évaporation moyenne mensuelle Ain Skhouna (1971-2011).....	29
<b>Tableau 7.</b> Les paramètres du bilan hydrique selon THORNTHWAITE.....	30
<b>Tableau 8.</b> Les valeurs des paramètres du bilan hydrique selon THORNTHWAITE Ain Skhouna (1971-2010).....	31
<b>Tableau 9.</b> Paramètres statistiques des données.....	45
<b>Tableau 10.</b> Résultats du test Pearson Khi-Deux ( $\chi^2$ ).....	54
<b>Tableau 11.</b> Résultats des critères AIC et BIC.....	54
<b>Tableau 12.</b> Hauteurs de pluies Extrêmes estimées en mm.....	55
<b>Tableau 13.</b> Erreurs quadratique moyenne (EQM) pour chaque type d'interpolation.....	58
<b>Tableau 14.</b> Caractéristiques des altitudes de l'impluvium de Batna.....	62
<b>Tableau 15.</b> Répartition altimétrique de l'impluvium de Batna.....	62
<b>Tableau 16.</b> Répartition Superficie / Pente.....	63
<b>Tableau 17.</b> Classes de perméabilité des sols.....	69

<b>Tableau 18.</b> Sources des données et acquisition.....	71
<b>Tableau 19.</b> Les paramètres en entrée.....	72
<b>Tableau 20.</b> La détermination de l'importance relative des facteurs par échelle de 1 à 9 (Saaty, 1991).....	73
<b>Tableau 21.</b> Matrice de comparaison des paires.....	74
<b>Tableau 22.</b> Détermination du poids de chaque critère.....	74
<b>Tableau 23.</b> Les valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice.....	75
<b>Tableau 24.</b> Le calcul du ratio de cohérence.....	75
<b>Tableau 25.</b> La pondération pour les différentes classes d'un même critère.....	76
<b>Tableau 26.</b> Les caractéristiques physiques des sous-bassins.....	79
<b>Tableau 27.</b> Les valeurs de $P_{J \max}$ pour chaque sous- bassin et pour différentes périodes de retour en mm.....	80
<b>Tableau 28.</b> Estimation de la rétention initiale $P_0$ .....	81
<b>Tableau 29.</b> Les valeurs $C_r$ pour chaque sous- bassin et pour différentes périodes de retour.....	83
<b>Tableau 30.</b> Le temps de concentration pour chaque sous-bassin.....	85
<b>Tableau 31.</b> Les valeurs de I pour chaque sous- bassin et pour différentes périodes de retour en mm.....	85
<b>Tableau 32.</b> Les débits max selon la formule de Turazza en $m^3/s$ .....	86
<b>Tableau 33.</b> Les débits max selon la formule de Burkli-Ziegler en $m^3/s$ .....	87
<b>Tableau 34.</b> Paramètres statistiques la série des débits annuels.....	88
<b>Tableau 35.</b> Résultats des tests statistiques appliqués aux débits max (station de Fesdis).....	88

<b>Tableau 36.</b> Les débits max et les intervalles de confiances de la station hydrométrique de Fidis par la loi de Gumbel.....	89
<b>Tableau 37.</b> La comparaison des résultats.....	90
<b>Tableau 38.</b> Les valeurs utilisées du coefficient de Manning selon la nature du sol.....	94
<b>Tableau 39.</b> Résultat de simulation par plusieurs scénarios.....	102
<b>Tableau 40.</b> Les indices de la vulnérabilité.....	111
<b>Tableau 41.</b> La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité (Partie 1).....	112
<b>Tableau 41.</b> La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité (Partie 2).....	113

## **INTRODUCTION GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Nos sociétés ont toujours été confrontées aux inondations, les cours d'eau représentent à la fois une richesse et une menace pour les riverains (Bravard et al, 1997). Cette dualité a longtemps été considérée comme globalement bénéfique, mais aujourd'hui il semble que cet équilibre se soit rompu (Beloulou, 2008).

Le changement climatique introduit une nouvelle variable dans la recherche d'une gestion durable du risque d'inondation. La prise en compte d'une variabilité des conditions climatiques implique une adaptation des stratégies de réduction du risque d'inondation (Kreis, 2004).

L'Algérie, est parmi les régions méditerranéennes qui sont affectées par des crues qui engendrent des inondations dues généralement aux débordements des cours d'eau traversant des villes et des agglomérations (Yahiauoui, 2012). Les plus récentes et les plus meurtrières sont celle d'Alger à Bâb El-Oued, novembre 2001 : 733 morts et des dégâts matériels très lourds et celle de Ghardaïa, octobre 2008 : 40 morts et des dégâts matériels importants.

La ville de Batna ne fait pas exception puisqu'elle a connu des épisodes pluvieux en 1983, 1987, 2004 et 2007 qui ont généré des crues importantes dont les effets sont restés vivants dans les esprits en raison du niveau de vulnérabilité de cette ville.

Le risque d'inondation est défini comme la combinaison de l'aléa inondation et les enjeux exposés (vulnérabilité aux inondations). L'aléa désigne un événement menaçant ou une probabilité d'occurrence dans une région ou au cours d'une période donnée d'un phénomène pouvant engendrer des dommages (Département des Affaires Humaines de l'Organisation des Nations Unies-ONU/DAH, 1992). La vulnérabilité exprime l'importance des dommages potentiellement subits par des enjeux soumis à un aléa d'intensité donnée. La notion d'enjeu intègre les personnes, les biens et les activités susceptibles d'être affectés par l'aléa (Hostache, 2006).

La gestion du risque d'inondation est basée sur trois concepts indissociables, la prévention, la prévision et la gestion de la crise ou de la protection. La prévention, hors contexte de crise, est basée sur l'analyse de crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques. Elle vise à caractériser l'aléa et la vulnérabilité le plus finement possible pour protéger l'existant, informer les populations et limiter l'implantation des biens

et des personnes dans les zones fortement exposées, sans contrainte de temps majeure sur la durée des études mises en œuvre. La prévision vise à anticiper la survenue d'une inondation et ses conséquences. La gestion de crise rassemble l'ensemble des moyens mis en œuvre pour protéger, informer, et secourir les populations. Elles nécessitent des outils opérationnels pour des décisions rapides (Hostache, 2006).

La méconnaissance de la variabilité spatio-temporelle du régime hydrologique au niveau des bassins versants amène forcément à une gestion non adaptée de l'espace qui peut générer des dégâts importants souvent irréversibles. La mesure des débits extrêmes apparaît inévitable voire indispensable et revêt un intérêt majeur pour les hydrologues en termes de prévention des risques. Les cours d'eau non équipés de stations hydrométriques posent une grande problématique en termes de prévention du risque d'inondation, ce qui fait appel aux méthodes statistiques de la transformation des pluies en débits. L'analyse fréquentielle et l'estimation des précipitations associées aux événements extrêmes constituent la première étape.

D'où la nécessité d'une modélisation hydraulique qui vise à prédire numériquement l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue tel que le débit, la vitesse, la hauteur d'eau et les surfaces inondées (Hostache, 2006). Cette analyse a pour objet de faire un diagnostic des zones susceptibles d'être touchées par une crue, pour déterminer l'étendue de débordement des cours d'eau et les hauteurs d'eau. Notre méthode est basée sur une modélisation hydraulique qui consiste à transformer les débits fréquents en une hauteur d'eau correspondante en tenant compte de la morphologie des cours d'eau. Pour cela nous avons utilisé le logiciel HEC RAS.

Le système de modélisation HEC RAS est développé par le corps d'ingénieurs de l'armée américaine, est un logiciel capable de modéliser différents types d'écoulement (fluvial, torrentiel ou mixte) à travers différents systèmes (naturels ou artificiels) et de calculer les profils des eaux de surface (Julien, 2009).

L'évolution des connaissances et des technologies a permis d'établir des méthodes de plus en plus précises basées sur des concepts hydrologiques et hydrauliques. Par contre, aucune des méthodes existantes ne permet de réaliser une évaluation à la fois préventive et quantitative précise liée au risque d'inondation (Yahiaoui, 2012).

Les aménagements de rivières ont longtemps été entrepris localement sans tenir compte de leur impact à l'aval (Kreis, 2004). Les autorités de la ville de Batna ont décidé de se lancer dans des actions d'aménagements de grande envergure pour des raisons environnementale et esthétique visant à couvrir les principaux cours d'eau traversant la ville, en leur substituant des canaux à double orifice et avec des dimensionnements et des pentes bien déterminés. Mais sommes-nous certains que ces ouvrages, dans leur conception et leur dimensionnement, sont à même de répondre à des débits de fréquences rares?

L'élaboration de scénario de risque liée à l'aléa crue dans la ville de Batna et en mettant en évidence le déficit probable en dimensionnements des ouvrages réalisés, peut constituer un document d'aide à la discision en termes de protection et de gestion des crises.

La vulnérabilité résulte de l'action humaine, qu'elle soit délibérée ou non (Adger, 2006). Pour déterminer cette vulnérabilité nous avons fait appel à une analyse multicritère sous un système d'information géographique SIG, qui évalue l'impact d'un phénomène selon plusieurs facteurs et transcrit leur importance sous forme d'une carte. Cette dernière est incontestablement le meilleur moyen de situer le risque (Givone, 1998). La carte du risque a été élaborée par la superposition de deux cartes aléa et vulnérabilité. Elle montre les différents niveaux d'exposition au risque d'inondation dans la ville de Batna et permet de comparer l'étendu de l'inondation et les enjeux menacés.

Le travail mené dans le cadre de cette thèse s'articule autour de six parties organisées selon un déroulement et une méthodologie répondant à cette problématique. Nous avons commencé par un cadre théorique qui représente des généralités et des explications qui permettent un meilleur éclaircissement et qui met en évidence certains concepts essentiels liés au risque d'inondation, puis nous sommes passés à un cadre physique qui a pour objet de décrire les caractéristiques physiques de la zone d'étude.

Nous avons procédé dans le chapitre trois à la modélisation hydrologique qui a pour but d'estimer les débits max pour chaque sous bassin à différentes récurrences (périodes de retours) afin d'effectuer une analyse fréquentielle des données de pluies journalières maximales.

Nous avons consacré le chapitre trois à une étude hydraulique qui nous permet d'établir un diagnostic des zones susceptibles d'être touchées par les inondations.



Nous avons élaboré par la suite une cartographie des enjeux exposées sur la base d'une analyse multicritère qui montre que plusieurs zones s'inscrivent dans la vulnérabilité extrême et qui doivent faire l'objet d'une attention particulière.

Le dernier chapitre est réservé à l'élaboration d'une carte du risque inondation dans la ville de Batna par la superposition de deux cartes l'aléa et la vulnérabilité.

L'analyse spatiale par requête sur la base de données SIG doit déboucher sur l'élaboration d'une cartographie du risque qui constitue un instrument de suivi et de gestion du risque d'inondation dans cette ville et définir les actions prioritaires à envisagés pour répondre aux débits récurrents dépassant les capacités des nouveaux ouvrages réalisés.

## **CHAPITRE I**

### **CADRE THEORIQUE**

## **Introduction :**

Les inondations représentent un danger pour les biens et les personnes dans la plupart des régions du globe (Kreis, 2004). D'après les informations (IDD: la base de données en matière de catastrophes internationales) du Centre de Recherche sur l'Epidémiologie des Désastres (CRED, 2007), les inondations sont au cours des deux dernières décennies au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde.

Elles se définissent comme des phénomènes naturels fréquents induisant des dégâts humains et matériels importants, causés dans la majorité des cas par le débordement des cours d'eau.

Le risque d'inondation est devenu une préoccupation majeure et essentielle dans la plupart des régions du globe, l'augmentation du nombre d'inondation catastrophique c'est d'abord la conséquence d'une occupation des sols non conforme aux aptitudes du milieu (construction sur les zones inondables, aménagement incohérent des lits des oueds).

Ce chapitre représente des généralités et des définitions qui permettent une meilleure explication de certains concepts fondamentaux liés aux risques d'inondation.

## **LE RISQUE D'INONDATION, TYPOLOGIE, GRAVITE, ET GESTION.**

### **1. Le risque d'inondation :**

La littérature nous offre de nombreuses définitions du phénomène inondation, mais elles convergent toutes vers la synthèse suivante :

L'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. (MEDD-PRIM<sup>®</sup>). D'après le même dossier, Au sens large, les inondations comprennent les débordements d'un cours d'eau, les remontées de nappes, les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages, les inondations par rupture d'ouvrages de protection, les inondations estuariennes résultant de la conjonction de fortes marées, de situations dépressionnaires et de la crue des fleuves. C'est un phénomène de submersion temporaire, naturelle ou artificielle, d'un espace terrestre (Scarwell et al, 2004).

L'excès d'écoulement superficiel des eaux se manifeste par les crues des cours d'eau ou bien, en dehors de tout réseau hydrographique organisé, par le phénomène de ruissellement. A l'extrême, ces phénomènes peuvent engendrer des inondations, l'inondation par débordement

de cours d'eau dans le premier cas et inondation par ruissellement dans le second (Fouchier, 2010). Dans notre cas nous avons étudié les inondations liées aux débordements des cours d'eau au niveau de la ville de Batna.

De nombreux géographes et hydrologues ont adopté le critère qu'une rivière est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen (Salomon, 1997). Il s'agit là en effet d'un écart de fonctionnement hydrologique par rapport au débit de base.

C'est un phénomène naturel et saisonnier qui correspond à une élévation du niveau des eaux. Elle ne provoque pas de perturbations majeures lorsque son ampleur est modérée. Mais une crue est susceptible de présenter des risques lorsque le débit et le volume d'eau sont tels qu'il y a débordement par rapport au lieu d'écoulement habituel (le lit mineur), on parle alors d'inondation (Beloulou, 2008). Les inondations sont des phénomènes plus ou moins localisés qui surviennent aléatoirement sur les cours d'eau (Kreis, 2004).

## **2. Risque : aléa et vulnérabilité :**

La notion de risque est communément définie comme la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité (Ancey et al, 2005). Il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé (Torterotot, 1993).

Le risque correspond ainsi à la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (Morin, 2008). Il se différencie du danger en ce qu'il implique une prise de risque plus ou moins assumée de la part de la société (Luhmann, 1993). Les pertes peuvent être estimées en termes de vies humaines, de destruction d'infrastructures ou en termes financiers (Undro, 1979).

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité.}$$

L'aléa constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement (Morin, 2008). C'est un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensités aléatoires (Lacina, 2012). C'est la probabilité d'occurrence d'un phénomène donné dans un lieu donné et avec une récurrence donnée.

La vulnérabilité représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédisposent les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (Morin, 2008). C'est la sensibilité des populations et des activités localisées dans une zone exposée à un aléa (Lacina, 2012).

La vulnérabilité est l'ensemble des conditions déterminées par des facteurs ou processus physiques, sociaux, économiques ou environnementaux qui accentuent la sensibilité d'une collectivité aux conséquences des aléas (Nations Unies, 2005). Et selon Leone et al, (2006) la vulnérabilité est une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés.

Les principaux dommages directs causés par l'aléa inondation sont les dommages aux personnes, aux bâtis, aux activités socioéconomiques et à l'environnement.

Selon l'Institut Français de l'Environnement (IFEN), le risque est lié à un aléa d'origine naturelle ou anthropique dont les effets prévisibles mettent en jeu un grand nombre de personnes, provoquent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées (IFEN, 2002).

Le risque est forcément le résultat du croisement de deux facteurs intimement liés à savoir l'aléa et la vulnérabilité.

Ainsi, une inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée, aucun élément vulnérable n'y étant en théorie présent en termes de sécurité civile (Tanguy, 2012). Si au contraire elle touche une zone densément peuplée, où des infrastructures importantes sont implantées, le risque sera présent et pourra être fort (Cutter et al, 2003).

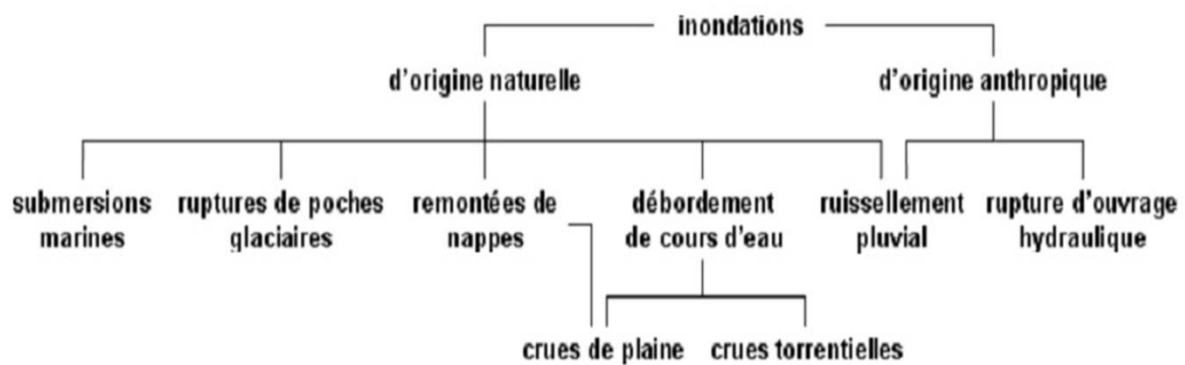
La définition des risques d'inondation peut être envisagée selon deux points de vue hydrologique ou géographique (Anh Tuan Luong, 2012).

Dans le premier cas, on met l'accent sur les zones inondables, identifiées à l'aide de modèles hydrauliques, et qui sont les lieux où les crues des rivières risquent d'avoir lieu (Anh Tuan Luong, 2012). Ils raisonnent maintenant à une échelle spatiale prenant tout le bassin versant en compte (CEMAGREF, 1993).

Actuellement, on comprend mieux comment les rivières débordent et où elles vont déborder, les scientifiques parviennent à estimer ces zones en se basant sur les modèles hydrauliques (Anh Tuan Luong, 2012). Dans le second cas, on utilise la combinaison des conditions géographiques et des facteurs environnementaux et socio-économiques pour déterminer les zones à forte probabilité de dommages (Anh Tuan Luong, 2012).

### 3. Typologie des inondations :

Les inondations au sens large regroupent plusieurs types de phénomènes. Une typologie classique des inondations, schématisée sur la figure 1, consiste à les distinguer selon leur origine, naturelle ou anthropique, puis pour les crues naturelles, selon leur rapidité (Fouchier, 2010).



**Figure. 1.** Typologie des inondations.

Source : Fouchier, 2010.

Les inondations provoquées par les crues rapides ou crues torrentielles se distinguent ainsi des inondations liées aux crues lentes de plaine. Ces dernières se produisent lorsque les rivières sortent pendant une longue période, de quelques jours à quelques semaines, de leur lit mineur, soit en raison de fortes précipitations, soit en raison d'une remontée de leur nappe alluviale. La cinétique de ces crues, qui concernent des bassins versants de grande taille (au delà de 1000 km<sup>2</sup>), permet souvent de les anticiper correctement. (Fouchier, 2010).

À l'inverse, les crues torrentielles se caractérisent par la soudaineté de leur apparition et de leur évolution (quelques heures) avec une réponse rapide aux précipitations souvent intenses et un temps de montée bref (Borrell, et al, 2005). Elles sont provoquées par des précipitations

intenses sur des bassins versants de quelques dizaines à quelques centaines de km<sup>2</sup>. On parle également de phénomène de crues éclairs. Leur cinétique rapide rend leur anticipation délicate (Fouchier, 2010).

Une crue se définit par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe (ou débit maximum) et son volume (Klemes, 1975).

Il existe une interdépendance entre la fréquence (la probabilité d'occurrence) et l'importance (gravité) de ce risque, les crues avec des fréquences rares sont les plus brutales et les plus catastrophiques.

La désignation centennale ou millénaire caractérise une probabilité moyenne d'apparition de la crue chaque année, mais ne renseigne pas sur la durée qui sépare deux événements. Ainsi, la crue de projet est une crue de récurrence donnée (fonction de l'environnement et d'impératifs technologiques) servant à calculer les dimensions des ouvrages hydrauliques et la résistance des ouvrages de génie civil (Glossaire International d'Hydrologie).

#### **4. La gravité des inondations :**

Les humains vivent dans le monde avec ces aléas naturels qui sembleraient de plus en plus fréquents et intenses (Anh Tu Ngo, 2014). En effet, ces dernières années, les inondations restent le premier phénomène à risque d'origine naturelle à travers le monde (Berz, 2000 ; Luong, 2012). Elles peuvent être un risque majeur aux conséquences humaines et matérielles extrêmement préjudiciables (Beloulou, 2008). Elles peuvent provoquer des dégâts matériels, humains et environnementaux très lourds et irréversibles.

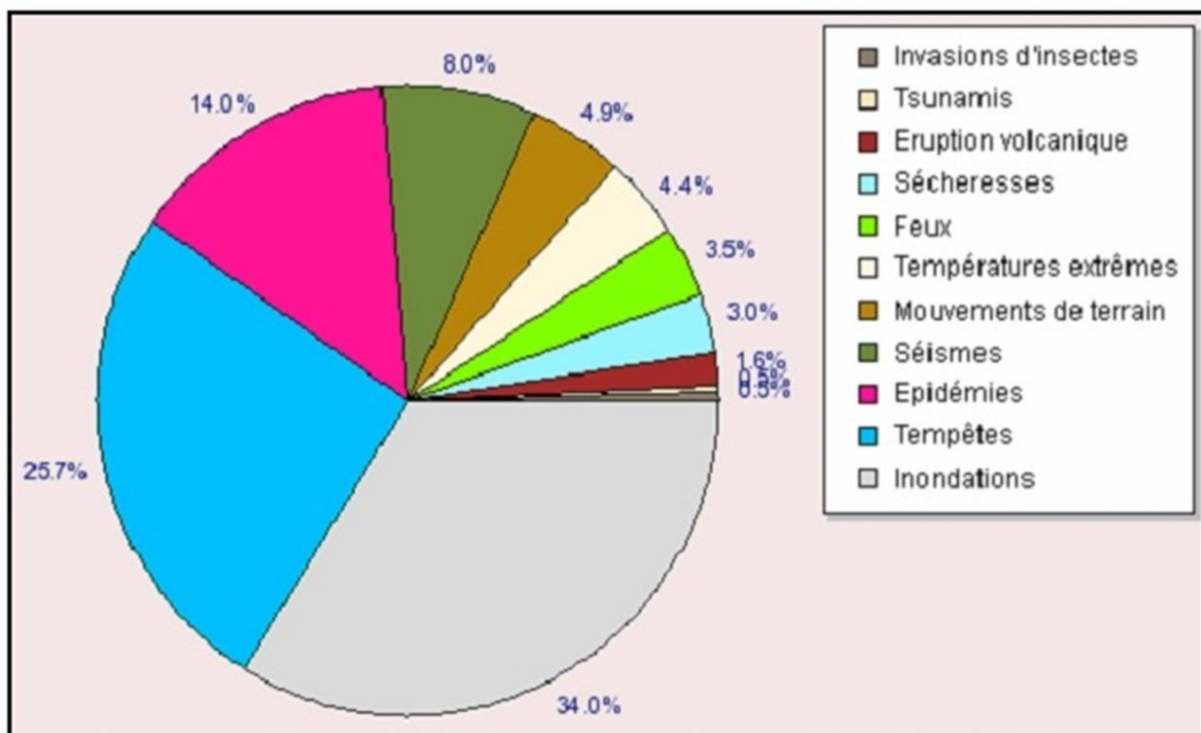
Souvent, les catastrophes causées par l'eau font régresser le processus de développement pendant des dizaines d'années (Beloulou, 2008). Les inondations peuvent être l'un des facteurs limitant le développement des capacités de la société humaine, en particulier dans les pays pauvres et en développement où la capacité d'alerte et l'expérience de gestion du risque sont encore limitées (Anh Tu Ngo, 2014).

Selon le rapport de CRED (the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters), on recense une moyenne de 37 inondations catastrophiques par an à travers le monde entre 1900 et 2013. Elles représentent 34% des catastrophes enregistrées à l'échelle mondiale entre 1990

et 2007. Chaque année, les inondations affectent en moyenne près de 31 millions de sinistrés et causent en moyenne plus de 60 000 décès.

Le nombre de personnes touchées par les catastrophes s'est considérablement accru, atteignant près de 200 millions en 2007 contre 135 millions en 2006. Sur ce total, la grande majorité (164 millions) ont été victimes d'inondations. Entre 2000 et 2006, 95 millions de personnes étaient touchées en moyenne chaque année par cet aléa (Figure 3) (CRED, 2007).

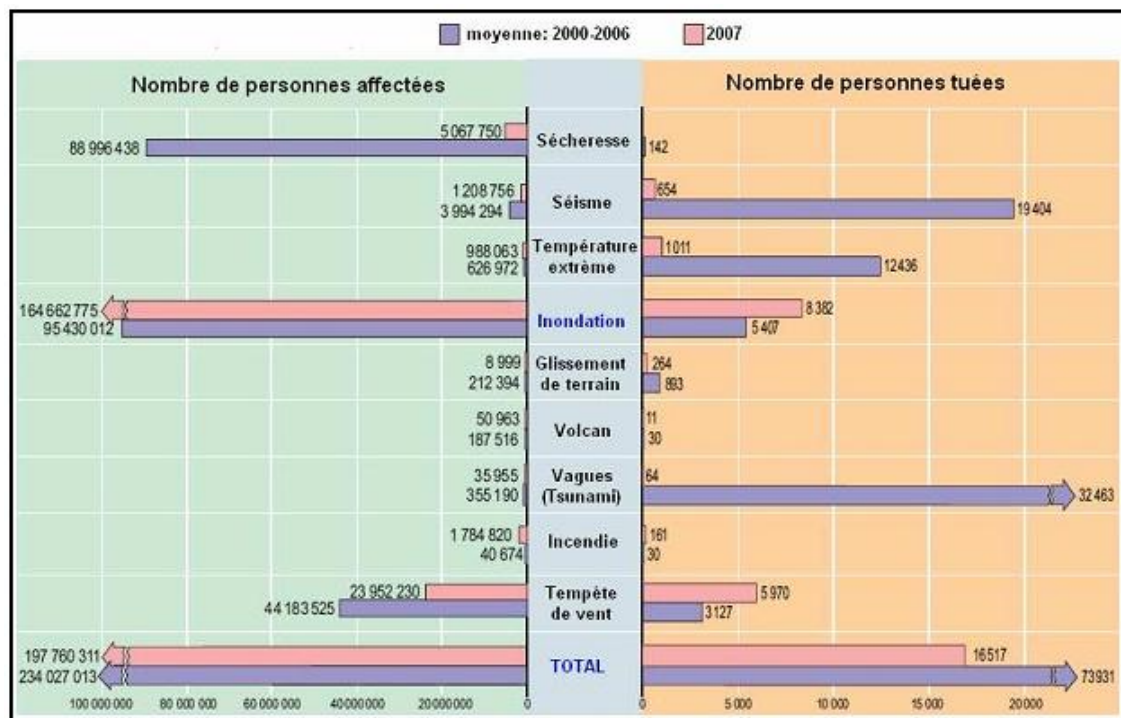
Les conséquences sont en constante augmentation et deviennent plus en plus fatales et très lourdes chaque année.



**Figure. 2.** Type de catastrophes naturelles survenues dans le monde de 1990 à 2007.

Source : CRED, 2007.





**Figure. 3.** Nombre de personnes affectées par les catastrophes naturelles entre 2000 et 2007.

Source : CRED, 2007.

L'Algérie est l'un des pays touchés par ces phénomènes, les villes algériennes ont connu des épisodes pluvieux qui ont généré des crues dommageables, nous citerons les plus importantes.

#### **4.1. L'inondation de Bâb El oued à Alger le 9 et le 11 Novembre 2001 :**

Les pluies, qui ont survenu à Alger les 09, 10 et 11 novembre 2001, ont atteint 262 mm dont 204 mm en 24 heures et ont causé l'une des inondations les plus catastrophiques et les plus meurtrières qu'a connu le pays. 733 morts et des milliers de blessés.



**Photo 1.** L'inondation de Bâb El Oued (Alger).

Source : Giovanola et al, 2002

#### **4.2. L'inondation de Ghardaïa le 01 octobre 2008 :**

Vingt minutes seulement ont suffi aux pluies 'diluviennes' du 01 octobre 2008 pour causer la mort de plus de 34 personnes et transformer en ruines la vallée du M'Zab à Ghardaïa (photo 2), totalement inondée par des eaux boueuses (El Watan, Edition du 04-10-2008).



**Photo 2.** L'inondation de Ghardaïa du 01 octobre 2008.

Source : <http://video-aol.com/video-detail>.

Le cumul pluviométrique atteint lors de ces événements est très supérieur aux capacités de stockage des obstacles à l'écoulement (barrages, retenues collinaires et bassins de rétention), aux capacités de rétention des sols et aux capacités d'évacuation des oueds ; le débit de l'oued M'Zab, enregistré le 1<sup>er</sup> Octobre 2008, a été de l'ordre de  $900 \text{ m}^3/\text{s}$  (crue centennale) et la hauteur de submersion a atteint par endroits les 8 m (Beloulou, 2008).

La ville de Batna ne fait pas exception puisqu'elle a connu des crues importantes dont les effets sont restés vivants dans les esprits, en raison du niveau de vulnérabilité de cette ville.



**Photo.3.** L'inondations dans la ville de Batna.

Source : Le Matin d'Algérie, 23 Aout 2015.

### **5. La gestion du risque d'inondation :**

Les risques constituent une question essentielle d'aménagement du territoire, dans la mesure où l'existence d'un aléa sur un territoire donné conditionne l'organisation de cet espace par les sociétés humaines (Beucher et al, 2009).

La lutte contre les inondations n'est pas une préoccupation nouvelle, les rivières ont depuis longtemps fait l'objet de travaux visant à brider leurs débordements afin de ménager les activités humaines (Bravard, 2000). Le risque hydrologique représenté par les crues résulte

de la cohabitation de cet aléa hydrologique et de nos sociétés, installées en très grande majorité à proximité des cours d'eau (Fouchier, 2010). La gestion du risque d'inondation doit en conséquence intervenir à la fois au niveau de l'aléa et de la vulnérabilité. Elle doit répondre à deux objectifs principaux qui sont de limiter l'implantation des biens et des personnes au sein des zones fortement exposées et de protéger l'existant (Hostache, 2006).

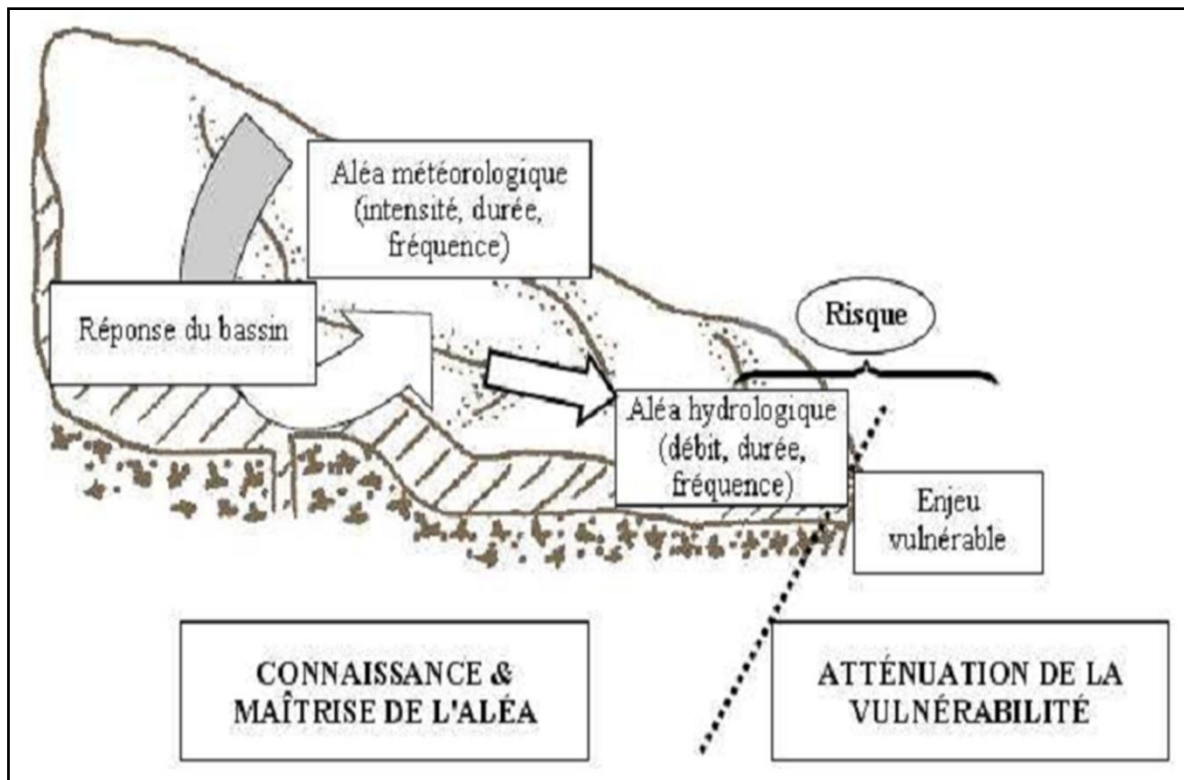
La gestion du risque inondation est basée sur la prévention, la prévision, la protection et la gestion de la crise.

La prévention est un aspect de la gestion des inondations hors contexte de crise. Contrairement à la prévention, la prévision et la gestion de crise correspondent à des actions en état d'urgence. La prévision vise à anticiper la survenue d'une inondation et ses conséquences. La gestion de crise rassemble l'ensemble des moyens mis en œuvre pour protéger, informer, et secourir les populations (Hostache, 2006).

Pour gérer les inondations, l'accent est aujourd'hui mis plus sur la prévention (mesures institutionnelles et juridiques) plus que sur la protection (mesure technique), dont l'usage fut longtemps dominant. Mais ce paradigme techniciste continue d'être très présent (Beucher et al, 2009).

Du fait de la double dimension du risque hydrologique, sa réduction passe à la fois par l'atténuation de la vulnérabilité, et par la maîtrise de l'aléa (Fouchier, 2010). La gestion du risque d'inondation doit s'inscrire à l'échelle du bassin versant et respecter le fonctionnement naturel des rivières (Kreis, 2004).

La connaissance de l'aléa hydrométéorologique est du ressort de l'hydrologue. Selon l'échelle temporelle adoptée, elle recouvre deux aspects : la prévention permise par la connaissance du risque sur le long terme et l'anticipation avec la connaissance du risque immédiat (Fouchier, 2010). Pour protéger les populations, les stratégies relèvent souvent de la prédétermination des crues rares faisant référence à l'évaluation statistique des débits associés à différentes périodes de retour, ou de la prévision à court terme. La première a pour objectif de mettre en place des Plans de Protection des Risques d'Inondations (PPRI), destinés à réglementer l'urbanisation et l'aménagement dans les zones inondables; la seconde permet d'anticiper les événements critiques et mettre les populations à l'abri avant et pendant la crue (Beloulou, 2008).



**Figure 4.** La gestion du bassin versant dans le contexte de la prévention du risque hydrologique.

Source : Cudennec, 2007.

### 5.1. La prévention :

Le diagnostic du risque d'inondation permet d'identifier les enjeux à protéger et les hydro systèmes à réhabiliter (Kreis, 2004).

La prévention vise à gérer et réduire le risque (aléa et vulnérabilité) d'inondation. Elle inclut d'une part l'information des populations concernant leur vulnérabilité aux inondations et les démarches à suivre en cas de crise, et d'autre part la mise en place de moyens de protection et l'organisation des secours (Hostache, 2006).

La prévention permet de choisir un niveau de protection correspondant au degré maximum d'aléa contre lequel on souhaite se protéger, cette protection passant par le biais d'aménagements structurels (digues, bassins de rétention) et non structurels (règlementation de l'occupation du sol, contraintes d'urbanisme). La connaissance préventive du risque permet donc d'orienter les choix politiques d'occupation du territoire et de protection des enjeux par des aménagements (Fouchier, 2010).

Dans une démarche de prévention face au risque d'inondation, la priorité est donnée à prédiction de façon précise de l'ampleur et les conséquences de crues potentielles, sans contraintes trop importantes sur la durée des études mises en œuvre. Le retour d'expérience, ultérieur à la crise, vise à tirer des enseignements des crues survenues par le passé afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et d'aider la gestion des crues à venir (Hostache, 2006).

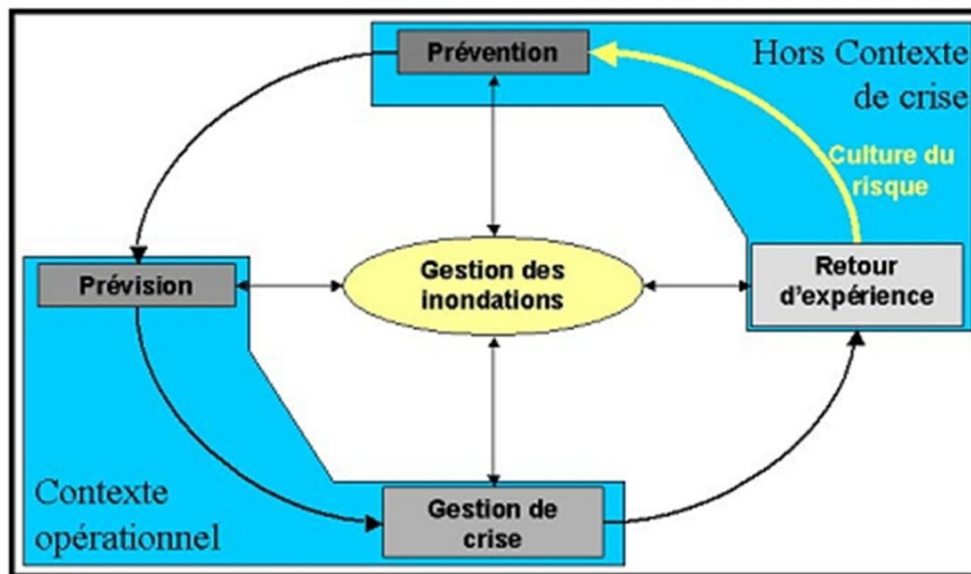
## **5.2. La prévision :**

La prévision vise à anticiper la survenue d'une crue et ses conséquences afin d'alerter les populations et de mettre en place des secours plus efficaces. Contrairement à la prévention, la prévision est fortement influencée par le temps (Hostache, 2006).

Elle s'intéresse à des inondations réelles, en cours de formation, qui risquent d'atteindre des zones vulnérables. En conséquence, la prévision s'applique aux états d'urgence, qui impliquent une réaction quasiment instantanée afin de fournir des informations très rapidement, quitte à obtenir des précisions moindres que dans le cas de la prévention. (Hostache, 2006).

## **5.3. La protection et la gestion de crise :**

La gestion de crise rassemble toutes les actions qui sont entreprises en période de crue afin de secourir et protéger les populations et les biens. Dans le cadre de la gestion de crise, les étendues inondées et les voies de circulation coupées sont des informations très utiles pour l'aide aux organismes d'intervention et de secours. Ces informations sont, comme on le verra par la suite, accessibles à partir d'images satellitaires ou de photographies aériennes de crue (Hostache, 2006).



**Figure 5.** Champs d'intervention dans la gestion des inondations.

Source : Hostache, 2006.

Les aléas qui dépassent le niveau de protection déterminé représentent le risque résiduel (Gendreau, et al. 2003, Borrows, 2006). Il peut s'agir par exemple de la crue qui dépasse la crue de projet qui a servi au dimensionnement d'un ouvrage de protection. La maîtrise de ce risque résiduel repose alors sur les systèmes de surveillance et de prévision, l'alerte et la gestion de crise (Fouchier, 2010).

Les aménagements ne permettent pas de protéger des événements les plus rares, c'est la raison pour laquelle seules les crues les plus fréquentes ne sont plus observées après aménagement. Les inondations sont donc moins fréquentes, mais occasionnellement les riverains qui se croyaient protégés sont inondés. Les mesures structurelles ont des limites qui ne pourront pas être beaucoup améliorées dans le futur (Bravard, 2000, Kreis, 2004).

## **6. Modélisation du risque d'inondation :**

Cette modélisation, vise à mesurer quantitativement le risque au niveau d'un élément de surface tel qu'une parcelle ou tout autre découpage approprié du territoire. Pour cela, elle propose une modélisation quantifiée parallèle et indépendante des deux variables. Pour réaliser une quantification de ces variables pour une zone bien déterminée, il faut pouvoir obtenir une modélisation spatiale des paramètres en question (Yahiaoui, 2012).



Pour les deux variables analysées, comme pour leur synthèse en terme de risque, la méthodologie propose une représentation cartographique adaptée de manière à fournir un document facilement interprétable (Yahiaoui, 2012).

### **6.1. La modélisation hydrologique :**

L'étude hydrologique consiste à estimer, en un point d'un cours d'eau, un débit de pointe de crue de période de retour  $T$  donnée, ou pour être plus précis, un débit qui a chaque année une chance sur  $T$  d'être dépassé (Bachi, 2011). L'hydrologie comporte l'ensemble des démarches et procédés qui mènent à la détermination des débits dans une rivière, incluant leur probabilité d'occurrence (Pierrick, 2001).

Le modèle hydrologique intervient pour définir les conditions d'entrée (Yahiaoui, 2012).

Il y a deux approches en hydrologie: l'approche déterministe et l'approche statistique.

L'approche déterministe considère tous les apports et facteurs pouvant influencer le débit (ex: pluie, neige, eau dans le sol, etc.) et les introduit généralement dans un modèle qui estime le débit. L'approche statistique permet d'estimer des débits, d'une probabilité donnée, à partir de lois statistiques qui ont été ajustées à partir de séries de données de débits mesurés (Pierrick, 2001).

### **6.2. La modélisation hydraulique :**

Une inondation, au sens d'aléa, est un phénomène naturel très complexe dont l'analyse nécessite des outils performants et élaborés, par exemple les modèles hydrauliques. Ces derniers ont pour principal attrait de simuler numériquement des crues hypothétiques ou réelles ce qui permet de caractériser l'aléa dans l'espace et le temps (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement, débits, durées de submersion...). Ils permettent ainsi de prédire les conséquences potentielles d'une crue et de fournir des informations très utiles aux décideurs, tant en contexte de crise, que pour la prévision et la prévention. (Hostache, 2006). La modélisation hydraulique vise à prédire numériquement l'évolution spatiotemporelle des caractéristiques hydrauliques au cours d'une crue tel que le débit, la vitesse, la hauteur d'eau et la surfaces inondées (Hostache, 2006).

La simulation numérique ne peut pourtant s'affranchir du monde réel, de la véritable rivière, pour confirmer des hypothèses et évaluer les modèles numériques construits. Le calage d'un modèle hydraulique suppose de contraindre celui-ci avec des connaissances concernant la crue tel que niveaux d'eau, débits, surfaces inondées etc. (Vidal, 2005).

L'hydraulique concerne les applications, calculs et traitements qui permettent d'obtenir les niveaux d'eau à partir de ces débits calculés à l'échelle du tronçon. Dans le cas des inondations, l'hydrologie est la discipline qui permet d'obtenir les débits et leurs périodes moyennes de retour. L'hydraulique, quant à elle, est la discipline qui permet d'obtenir les niveaux d'eau et accessoirement les vitesses correspondant à ces débits (Pierrick, 2001).

### **6.3. Le modèle cartographique :**

Il permet la traduction des résultats sous forme de cartes complémentaires et repose sur un modèle numérique de terrain (MNT), qui doit être compatible avec celui utilisé par le modèle hydraulique; il intervient à la fois comme préprocesseur et post processeur du modèle hydraulique notamment (Yahiaoui, 2012).

### **6.4. L'occupation des sols :**

La vulnérabilité de l'occupation des sols aux inondations traduit le fait que les dommages économiques directs et indirects, et plus au moins sévères, apparaissent lorsque l'eau inonde une parcelle (Yahiaoui, 2012).

## **7. Les systèmes d'information géographique :**

le SIG est un outil d'analyse spatiale reposant sur la superposition de données iconographiques, qualitatives et quantitatives, toutes géoréférencées dans le même système de projection (Grivel, 2008).

Les SIG manipulent de l'information géographique qui désigne les éléments suivants : arpentage, géodésie cartographie, cadastre, positionnement global (GPS), photogrammétrie et télédétection, bases de données à référence spatiale relatives aux caractéristiques de l'environnement et du bâti. Les SIG permettent de gérer ces bases de données à référence spatiale et à produire des documents cartographiques et des analyses statistiques et spatiales

qui servent de base à la formulation de diagnostics territoriaux et de plans de gestion pour les utilisateurs (Anh Tu Ngo, 2014).

**Conclusion :**

Ce premier chapitre introduit les différents concepts liés au risque d'inondation qui ont pour but d'expliquer les mécanismes de ce risque, ses composantes et sa gestion.

L'étude des inondations nécessite une panoplie d'informations hydrologiques, hydrauliques, topographiques et d'occupation du sol pour arriver enfin à une gestion globale et efficace.

Les SIG jouent un rôle incontournable dans la cartographie et la gestion du risque inondation.

## **CHAPITRE II**

### **PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE**

## Introduction :

Il est nécessaire, voir indispensable d'appréhender les composantes du milieu physique pour la réalisation d'une étude hydrologique fine et objective.

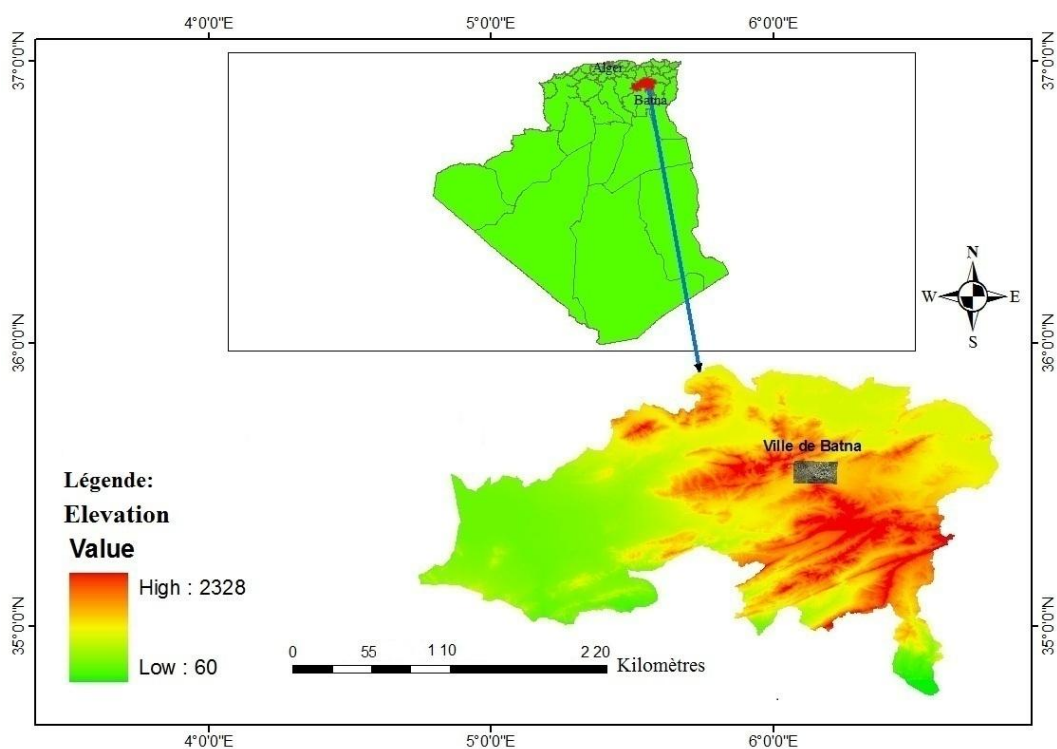
Ce chapitre a pour but de décrire les caractéristiques physiques de la zone d'étude notamment les caractéristiques météorologiques qui ont une influence plus en moins directe sur la dynamique des inondations.

Le premier chapitre est consacré à la description générale de la zone d'étude où les caractéristiques géographiques sont d'abord présentées, et nous avons procédé par la suite à une étude climatique et physique.

## PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE LA ZONE D'ETUDE.

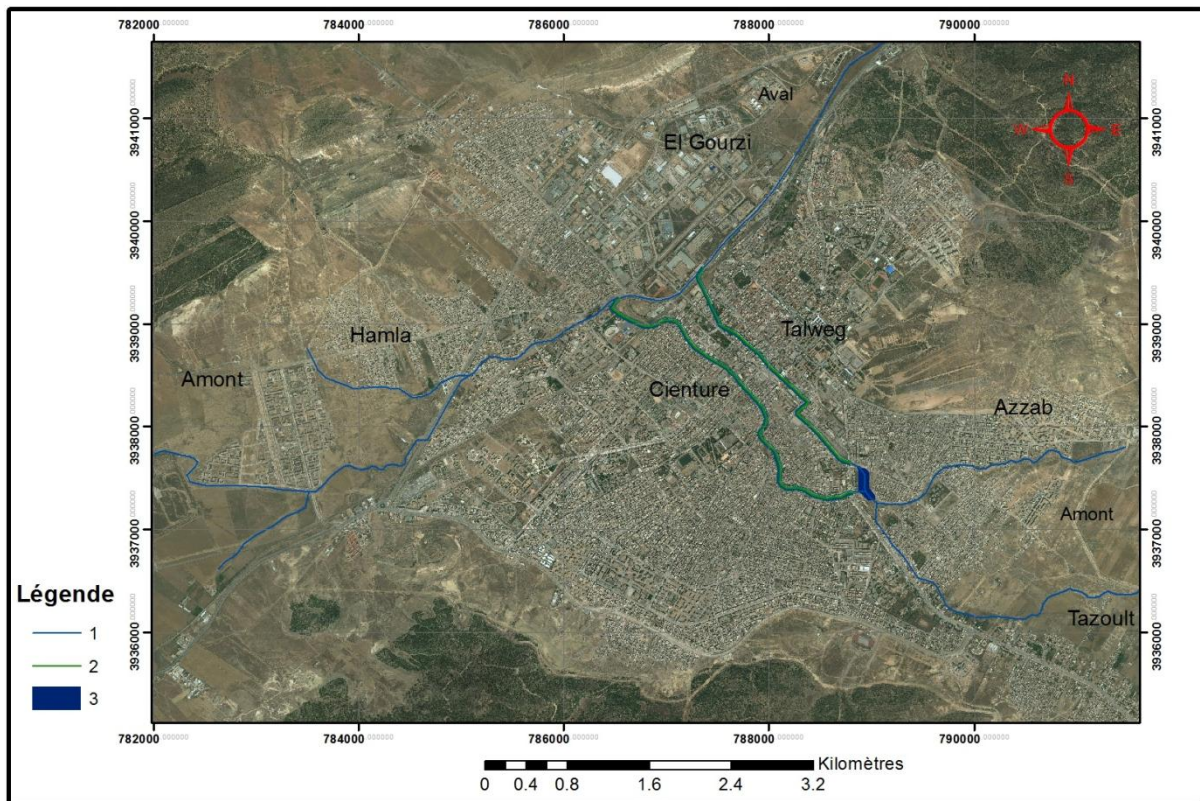
### 1. Situation géographique de la ville de Batna :

La ville de Batna se situe à 435 km au sud-est de la capitale Alger. Elle se localise entre 6°7' et 6° 13' de longitude Est et 35°34' et 30° 31' de latitude Nord (Figure 7).



**Figure 6.** La situation géographique de la zone d'étude.

L'espace urbain est traversé par plusieurs cours d'eau et canaux qui se déversent vers Oued El Gourzi (Figure 7).



1. Cours d'eau 2. Canal 3. Réservoir.

**Figure 7.** La ville de Batna.

La ville est implantée sur une cuvette entre deux chaînes montagneuses avec une altitude qui varie entre 900 et 1040 m et dont l'essentiel de l'espace d'étude (40 %) se situe entre 0 et 3 % de pente allongeant la durée de submersion. Le climat de la région est qualifié de semi-aride qui se caractérise par l'irrégularité de précipitations et leur caractère torrentiel expliquant l'aspect hautement vulnérable de cette ville. Par ailleurs vue l'étendue de la ville sur le plan surface par rapport au bassin versant, l'imperméabilisation des sols joue en faveur du ruissellement et augmente le risque d'inondation.

## 2. Les caractéristiques climatologiques :

Notre étude climatique est basée sur les données de la station météorologiques Aïn Skhouna, située à quelque kilomètre au nord de la ville. La station enregistre pour une période qui s'étale de 1971 à 2011, (42 ans).

**Tableau 1.** Les coordonnées de la station météorologiques Ain Skhouna.

Source : ONM Ain Skhouna.

La longitude	La latitude	L'altitude
6° 22' 30'' Est.	35° 43' Nord.	827 m

## 2.1. Les précipitations :

Selon actu-environnement, les précipitations sont des apports d'eau parvenant au sol sous forme liquide (pluie ou rosée) ou solide (neige ou grêle) en provenance directe ou indirecte de la condensation de la vapeur d'eau atmosphérique. Les précipitations (pluie ou neige) sont mesurées à la surface de la terre en millimètres. Le terme lame d'eau tombée est également employé pour quantifier les précipitations.

### 2.1.1. La variation annuelle des précipitations :

- La moyenne annuelle de la série est de : 382.7
- la précipitation maximale est observée durant l'année 2004 pour une valeur de 596.8.
- la précipitation minimale est observée durant l'année 1983 pour une valeur de 155.3.

Le tableau ci-dessous résume la variation annuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

**Tableau 2.** La variation annuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna

Années	1971	1972	1973	1974	1975	1976
P (mm)	302.5	521.6	330.3	229.1	296.3	480.6
Années	1977	1978	1979	1980	1981	1982
P (mm)	298.7	193.1	242.9	411.4	199.2	467.5
Années	1983	1984	1985	1986	1987	1988

P (mm)	155.3	359.7	462.9	355.3	327.8	169.9
Années	1989	1990	1991	1992	1993	1994
P (mm)	234	437.3	300.3	445.1	188	215.5
Années	1995	1996	1997	1998	1999	2000
P (mm)	283.4	393.2	379	269.4	308.5	292.8
Années	2001	2002	2003	2004	2005	2006
P (mm)	224.1	287	503	596.8	252	351.4
Années	2006	2007	2008	2009	2010	2011
P (mm)	351.4	293.8	348.4	349.8	280.6	185

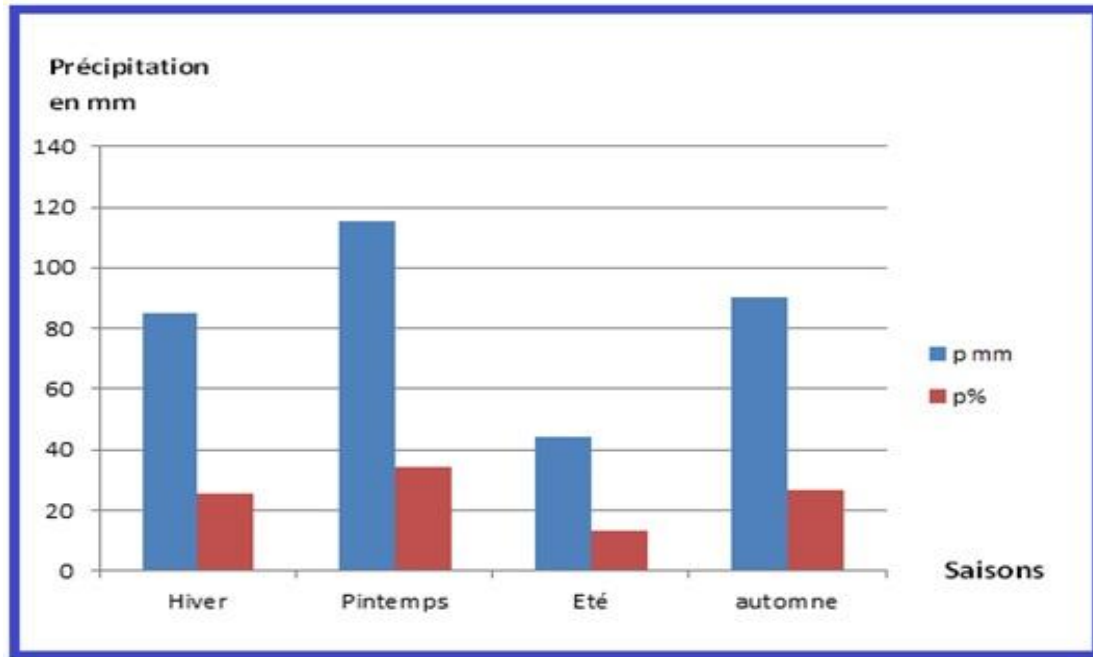
### 2.1.2. La variation saisonnière des précipitations :

**Tableau 3.** La variation saisonnière des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna

Saison	Hivers	Printemps	Eté	Automne
<b>P (mm)</b>	85.1	115	44.06	90.19
<b>P(%)</b>	25.4	34.4	13.1	26.9
<b>Nombre de jours moyens</b>	28	24	10	20





**Figure 8.** La variation saisonnière des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna.

La saison pluvieuse est le printemps avec 115.1 mm avec un nombre de jours pluvieux moyen est de 24 jours. Par contre, la saison sèche est l'été avec 44 mm soit 13.1% des précipitations annuelles, avec un nombre de jour pluvieux moyen de 10 jours.

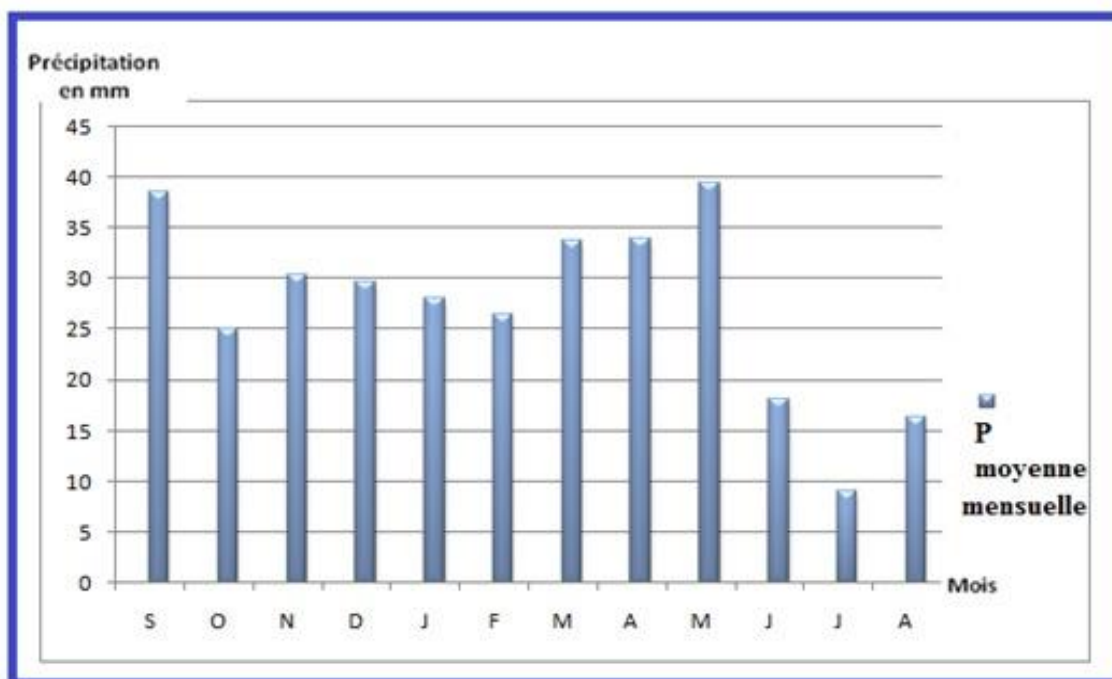
### 2.1.3. Les variations mensuelles des précipitations :

La hauteur maximale des précipitations mensuelles observées au mois de mai, avec une moyenne de 39.5 mm, soit 12 % des précipitations annuelles, et la hauteur minimale observée au mois de juillet avec une moyenne de 9 mm, soit 2.7 % précipitations annuelle.

**Tableau 4.** La variation mensuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	38.6	25.1	30.4	29.7	28.1	26.5	33.8	33.9	39.5	18.1	9	16.3
P %	11.7	7.6	9.2	9	8.5	8	10.2	10.9	12	5.5	2.7	4.9



**Figure 9.** La variation mensuelle des précipitations Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna.

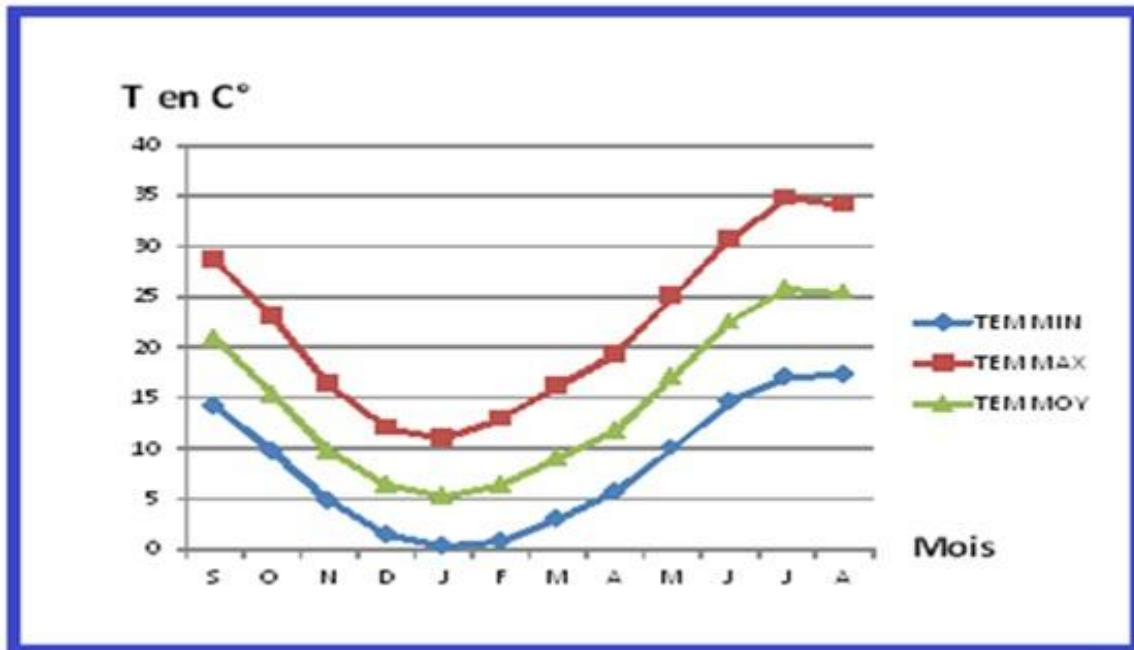
## 2.2. Les températures :

Les températures subissent un gradient thermique décroissant avec l'altitude (Beloulou, 2008).

**Tableau 5.** Températures moyenne mensuelle Ain Skhouna (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhouna.

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
T (C°)												
minimale	14.1	9.7	4.85	1.53	0.27	1.72	9.2	5.6	10	14.5	17.1	17.2
maximale	28.6	23	16.3	12	11.1	12.9	16.1	19.3	25	30.7	34.8	34.1
moyenne	20.8	15.3	9.7	6.3	5.2	6.3	9	11.7	17	22.5	25.8	25.4



**Figure 10.** Températures moyenne mensuelle Ain Skhoua (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhoua.

D'après la figure, on remarque une chute des températures au mois d'octobre jusqu'à février et elles augmentent par la suite pour atteindre leurs maximums en juillet, avec une valeur moyenne de 25,8 °C.

La valeur minimale des températures moyennes est observée en janvier 5,2°C.

La zone d'étude fait partie du climat semi- aride ou la saison la plus chaude est l'été qui comporte trois mois juin, juillet et août, avec une moyenne des températures de 24,5°C, par contre la saison froide est l'hiver qui s'étale de décembre jusqu'à mars avec une moyenne des températures de 5,9°C.

### 2.3. Evaporation :

L'évaporation est le passage de la phase liquide de l'eau à sa phase gazeuse, elle est considérée comme une perte en eau des surfaces d'eau libre non captive.

**Tableau 6.** L'évaporation moyenne mensuelle Ain Skhoua (1971-2011).

Source : ONM Ain Skhoua.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Evaporation	195	138	93	79	82	91	124	157	199	164	366	355

#### 2.4. L'évapotranspiration et bilan :

L'évapotranspiration est définie comme étant la somme des quantités d'eau exprimées en mm, évaporées par la surface du sol et transpirées par les plantes. Les phénomènes d'évaporation interviennent dans le cycle hydrologique dès le moment où les précipitations, sous forme liquide ou solide, atteignent la surface du sol (Beloulou, 2008).

**Tableau 7.** Les paramètres du bilan hydrique selon THORNTHWAITE

Ain Skhouna.

Source : ONM Ain Skhouna.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	annuelle
P (mm)	38.6	25.1	30.4	29.7	28.1	26.5	33.8	33.9	39.5	18.1	9	16.3	330
T (C°)	20.8	15.3	9.7	6.3	5.2	6.3	9	11.7	17	22.5	25.8	25.4	14.6
ETP (mm)	94.5	58.7	28.9	14.8	11.0	14.8	25.8	38.7	69.1	106.8	132	128	724
P-ETR	-61	- 31.7	7.5	18.6	18.3	15.2	7.4	-7.2	- 45.7	- 110.4	-153	- 133	-
RFU	0	0	7.5	26.1	44.4	59.6	67	59.8	14.1	0	0	0	-
EXD	0	0	7.5	18.6	18.6	15.2	7.4	0	0	0	0	0	67
DE	61	31.7	0	0	0	0	0	7.2	45.7	110.4	153	133	542

Le bilan établi par la formule du THORNTHWAITE qui prend en considération les précipitations, l'évapotranspiration, la réserve facilement utilisable, le déficit et l'excès d'eau. D'après le bilan du THORNTHWAITE la précipitation est supérieure à l'évapotranspiration ETP de novembre jusqu'à mars avec un écart maximum de 18.6 au mois de décembre.

## 2.5. Le ruissellement :

Le ruissellement est l'excès de pluie qui n'arrive pas à s'infiltrer dans le sol, coule à sa surface, s'organise en filets et rejoint rapidement le cours d'eau où il peut provoquer des débits de crue élevés après des temps de réponse relativement courts (de l'ordre d'une heure pour les petits bassins) (Beloulou, 2008).

## 2.6. L'infiltration :

L'infiltration est le processus par lequel l'eau pénètre et s'introduit dans le sol à partir de la surface.

**Tableau 8.** Les valeurs des paramètres du bilan hydrique selon THORNTHWAITE Ain Skhouna.

Source : ONM Ain Skhouna.

Station d'Ain SKHOUNA	Précipitation moyenne PM	Température moyenne TM	Evapotranspiration ETP	Evapotranspiration Réelle ETR	La réserve facilement utilisable RFU	Déficit DE	Excès EXD	ETR %	Ruissellement R %	infiltration I %
	330	14.6	804.8	262.8	159.8	542	67	79.6	1.6	14.7

## 3. Délimitation des sous bassins drainant la ville de Batna :

Analyser la configuration géométrique des différents sous bassins par les approches traditionnelles manuelles demeure une opération fastidieuse et peu précise, c'est pour cela que nous avons opté pour l'outil Arc Hydro.

Arc Hydro est un ensemble de modèles de données et d'outils qui fonctionnent dans Arc GIS pour prendre en charge les analyses de données géo-spatiales et temporelles. Utilisez Arc Hydro pour délimiter et caractériser les lignes de partage des eaux aux formats raster et vecteur, définir et analyser le réseau hydro-géométrique, gérer les données chronologiques et exporter les données vers des modèles numériques (ESRI).

Grâce à Arc Hydro Tools, nous avons pu obtenir l'ensemble d'informations et des données qui décrivent le bassin versant notamment le sens d'écoulement, l'accumulation, la délimitation des sous bassins drainant la ville de Batna et le développement d'une

représentation vectorielle dans un environnement SIG. Avant de commencer l'analyse, le format du DEM en entrée doit être converti du GEO\_TIF vers GRID

Les différentes étapes pour déterminer les sous bassins sous Arc Hydro Tools :

### 3.1. Le Remplissage des cuvettes (FILL SINKS) :

Le remplissage constitue la première étape de cette analyse. Cette fonction remplit les valeurs dans le fichier d'élévations numériques pour les cellules considérées comme des cuvettes entourées par d'autres de haute altitude, cette anomalie est généralement due à la déformation du DEM. Une cuvette est une cellule avec une direction de drainage indéfinie. Le point d'écoulement est la cellule limite avec l'altitude la plus basse pour la surface de captation d'une cuvette. La limite z indique la différence maximale autorisée entre la profondeur d'une cuvette et le point d'écoulement et détermine quelles cuvettes vont être remplies et quelles cuvettes resteront intactes. La limite z n'est pas la profondeur maximale pour remplir une cuvette (ESRI).

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et FILL SINKS.

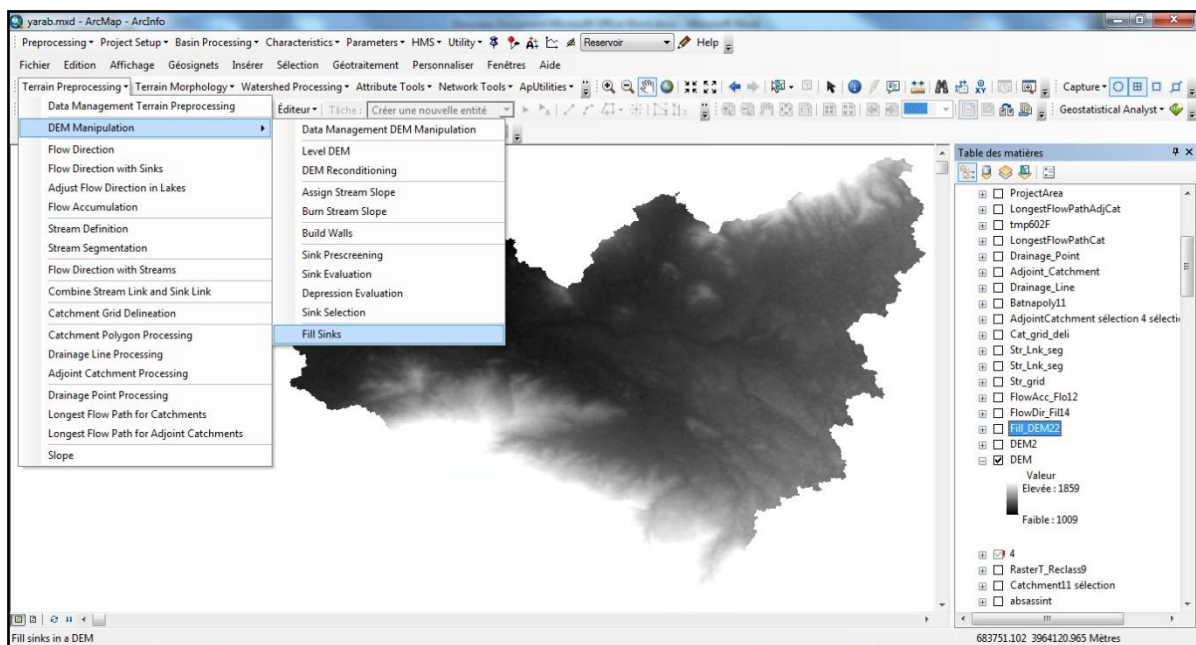


Figure 11. Le Remplissage des cuvettes (FILL SINKS) sous Arc Hydro Tools.

### 3.2. La direction des flux (FLOW DIRECTION) :

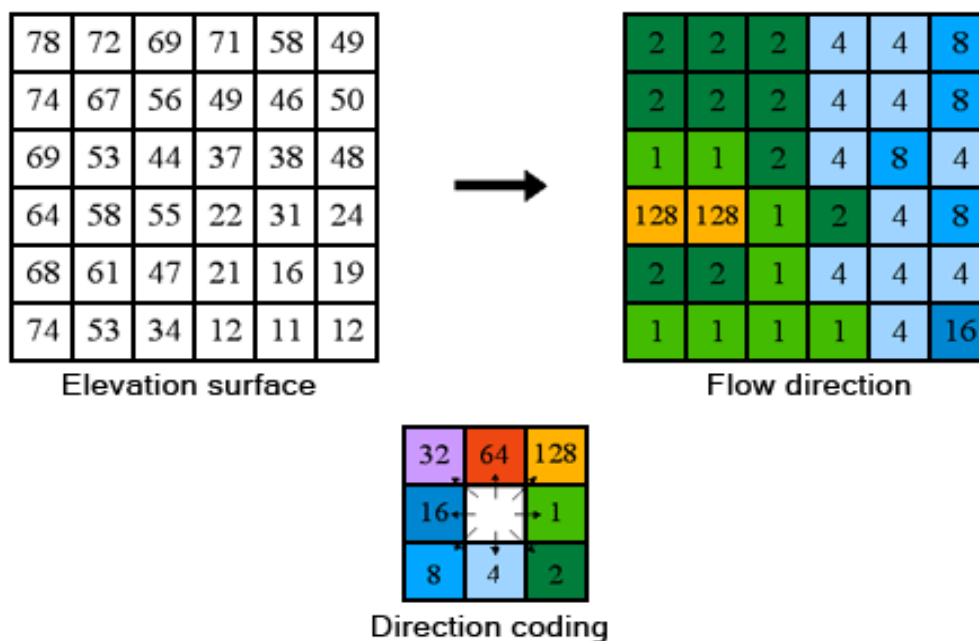
Cette fonction détermine la direction d'écoulement pour le réseau hydrographique de la zone d'étude, Les valeurs dans les cellules de la grille de la direction d'écoulement présentent la direction dans le sens de la pente la plus rapide pour chaque cellule.

Créer un raster de direction de flux à partir de chaque cellule vers son voisin de plus grande pente descendante (ESRI).

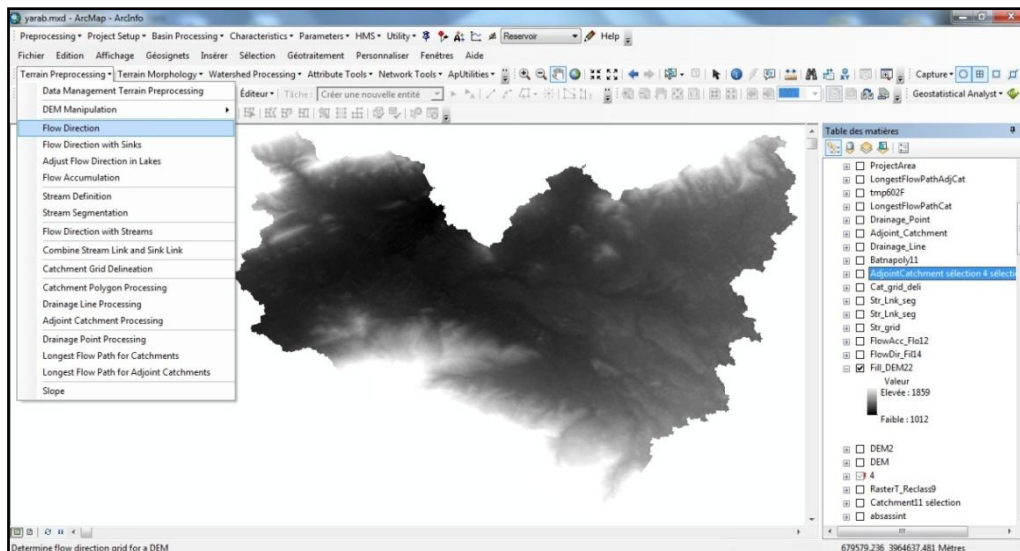
Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et FLOW DIRECTION.

Le principe d'Arc Hydro est d'établir vers quelle cellule s'écoule l'eau, à partir de la cellule centrale. Pour cela il calcule la pente entre la cellule centrale et les 8 cellules environnantes. Il considère que l'eau s'écoule vers la cellule qui a la pente la plus forte (Atilio, 2015).

Il y a huit directions en sortie valides relatives aux huit cellules adjacentes dans lesquelles le flux peut circuler. Cette méthode, généralement appelée "modèle de flux à huit directions (D8)", repose sur l'approche de Jensen et Domingue (1988). ESRI



**Figure 12.** Le principe du codage (direction des flux) (ESRI)



**Figure 13.** La direction des flux (FLOW DIRECTION) sous Arc Hydro Tools.

### 3.3. Accumulation d'écoulement (FLOW ACCUMULATION) :

Cette fonction calcule le nombre cumulé des cellules en amont pour chaque cellule dans la grille d'accumulation des flux. La grille en entrée pour cette fonction est celle de La direction d'écoulement.

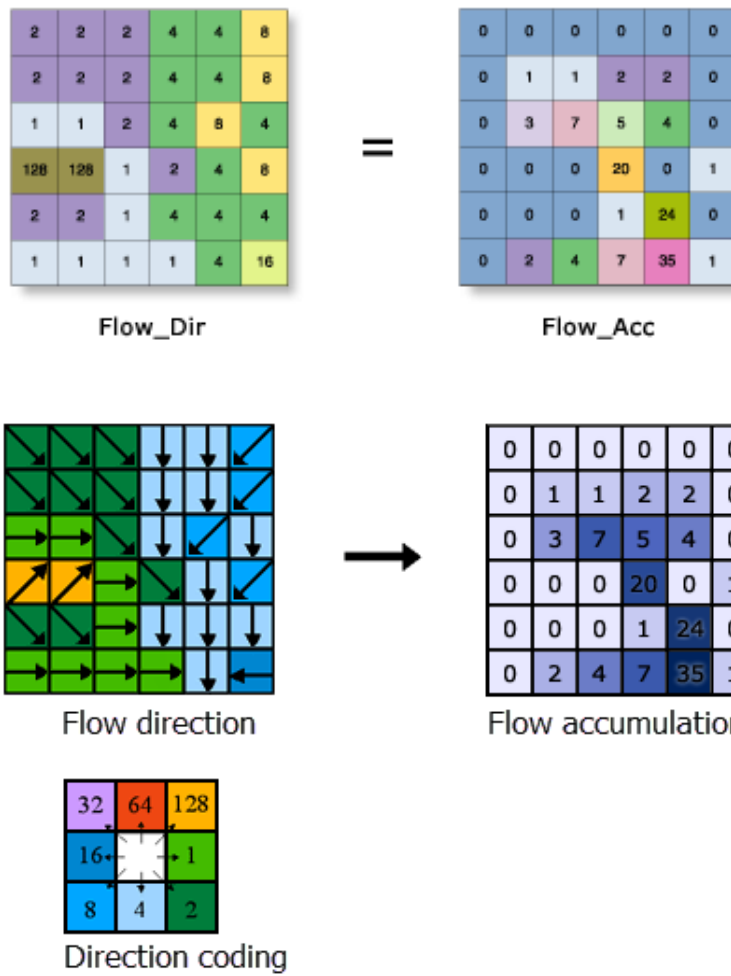
Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et FLOW ACCUMULATION.

Quand aucune cellule ne s'écoule vers la cellule considérée, la valeur est de 0, et quand plusieurs cellules s'écoulent vers la cellule considérée, la valeur est égale à la somme de valeurs d'écoulement de ces cellules (Atilio, 2015).

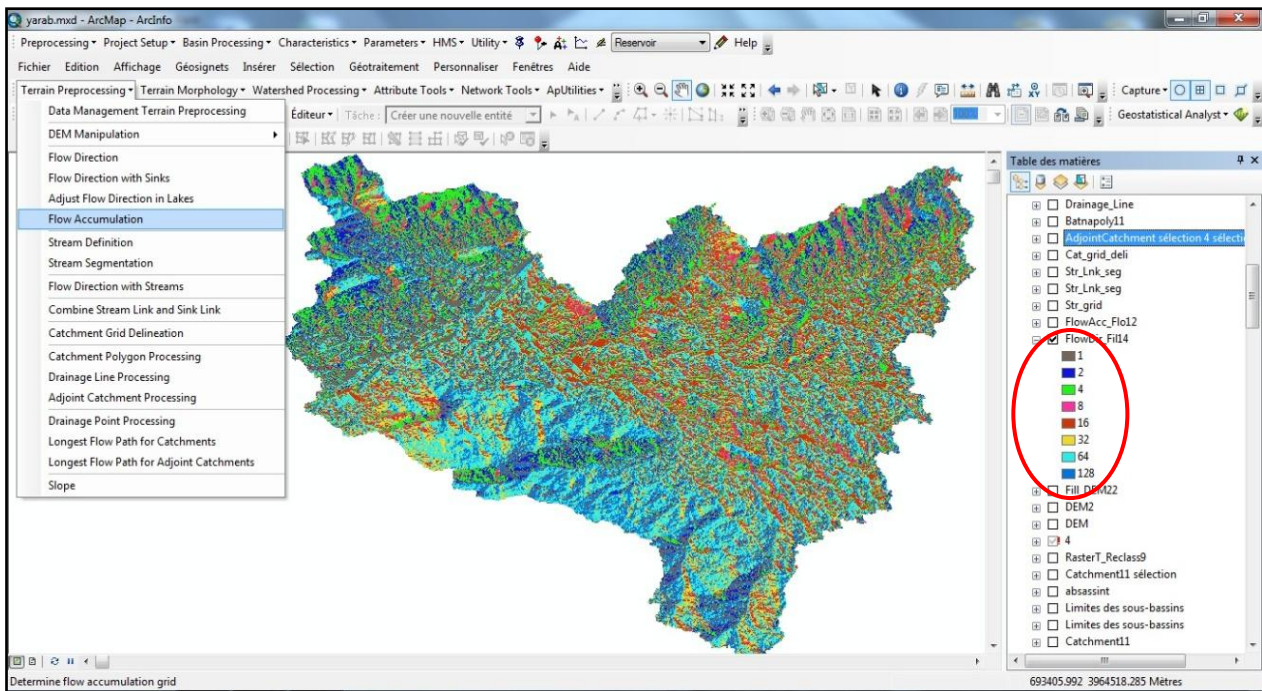
Les cellules dont la direction n'est pas définie sont en réception ; il n'existe pas d'écoulement vers le bas (ESRI).

Lorsque vous utilisez l'outil Accumulation de flux, vous obtenez un raster de flux cumulé relatif à chaque cellule, conformément à l'accumulation des pondérations de toutes ces cellules qui s'écoulent dans les cellules en pente descendante. (ESRI)





**Figure 14.** Le principe du codage (Accumulation d'écoulement) (ESRI).



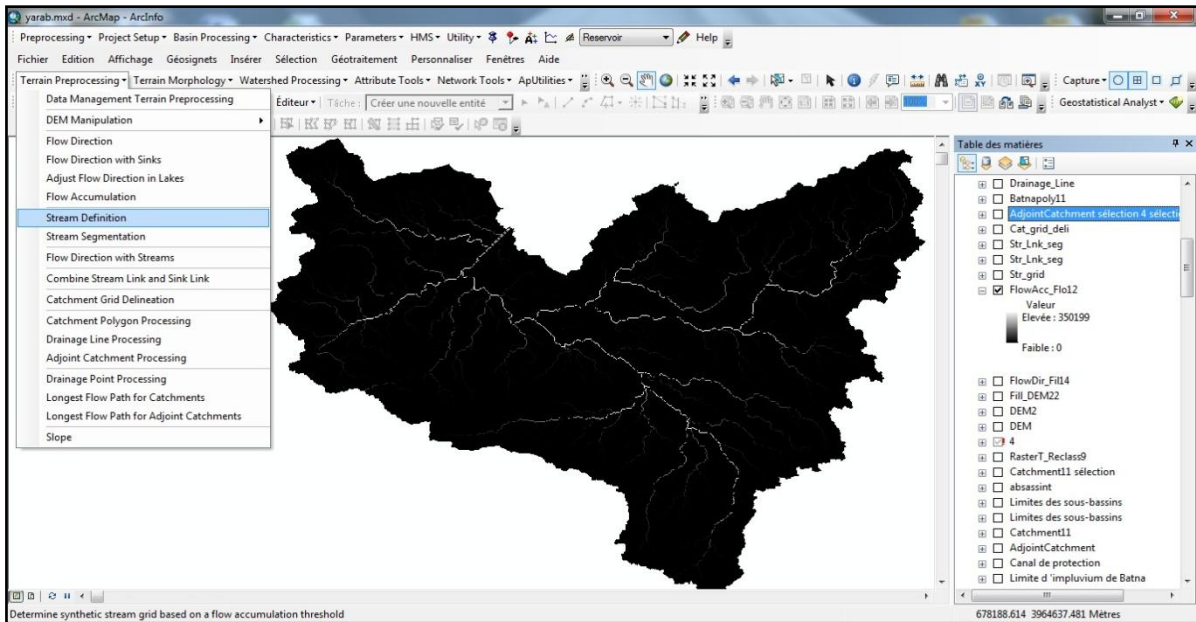
**Figure 15.** Accumulation des flux (FLOW ACCUMULATION) sous Arc Hydro Tools.

### 3.4. La définition et détermination du réseau d'écoulement (STREAM DEFINITION) :

Cette fonction calcule une grille des flux en se basant sur d'une grille d'accumulation de flux.

Les cellules de la grille d'accumulation des flux en entrée qui ont une valeur supérieure à un seuil (facultatif), attribuent une valeur de 1 dans la grille de flux.

Cette étape a pour objet d'extraire le réseau hydrographique à partir de l'accumulation de flux qui représente un réseau d'écoulements.

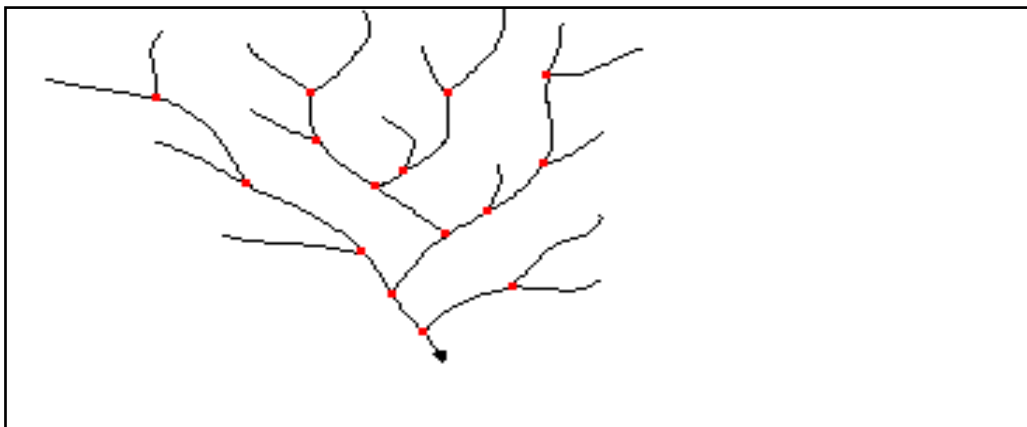


**Figure 16.** La définition des ruissèlements (STREAM DEFINITION) sous Arc Hydro Tools

### 3.5. La segmentation du réseau d'écoulement (STREAM SEGMENTATION) :

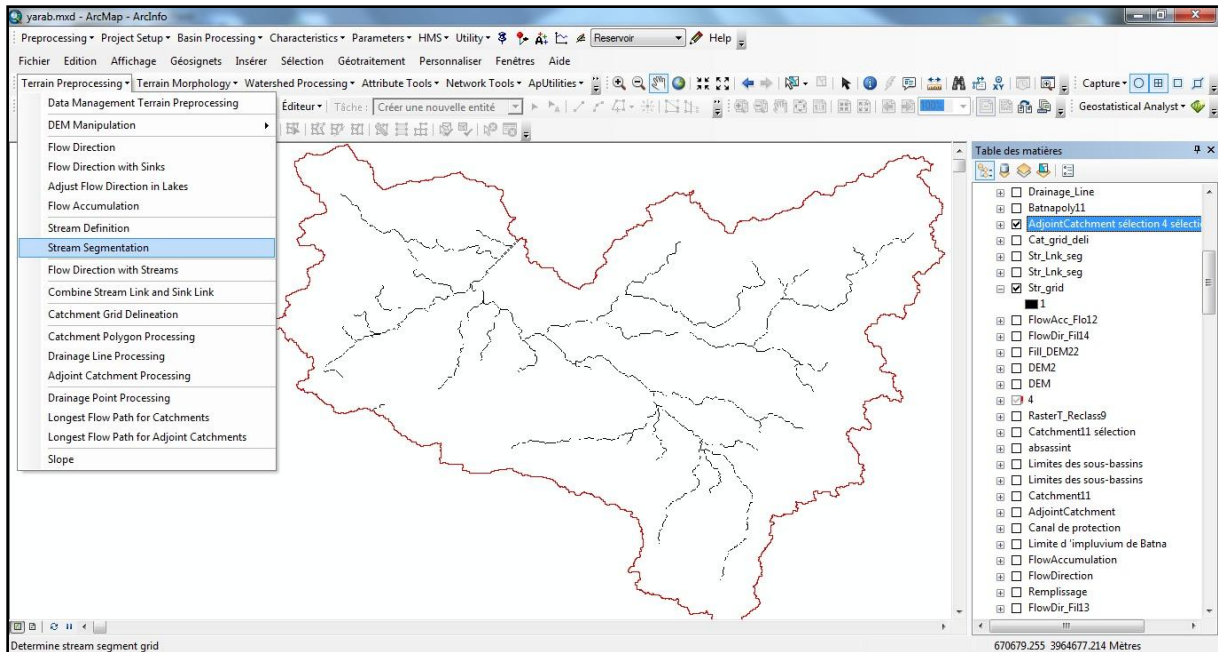
Cette étape partage le flux en segment, c'est-à-dire qu'elle crée une grille de segments des cours d'eau qui ont une identification unique. Toutes les cellules qui ont une identification unique ont le même code de réseau qui est propre à ce segment.

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et STREAM SEGMENTATION.



**Figure 17.** Les segmentations du réseau d'écoulement.

Les nœuds considérés sont les sources, les jonctions et les exutoires. Les pixels contigus entre deux nœuds auront le même identifiant de tronçon, et chaque tronçon sera numéroté différemment (Atilio, 2015).



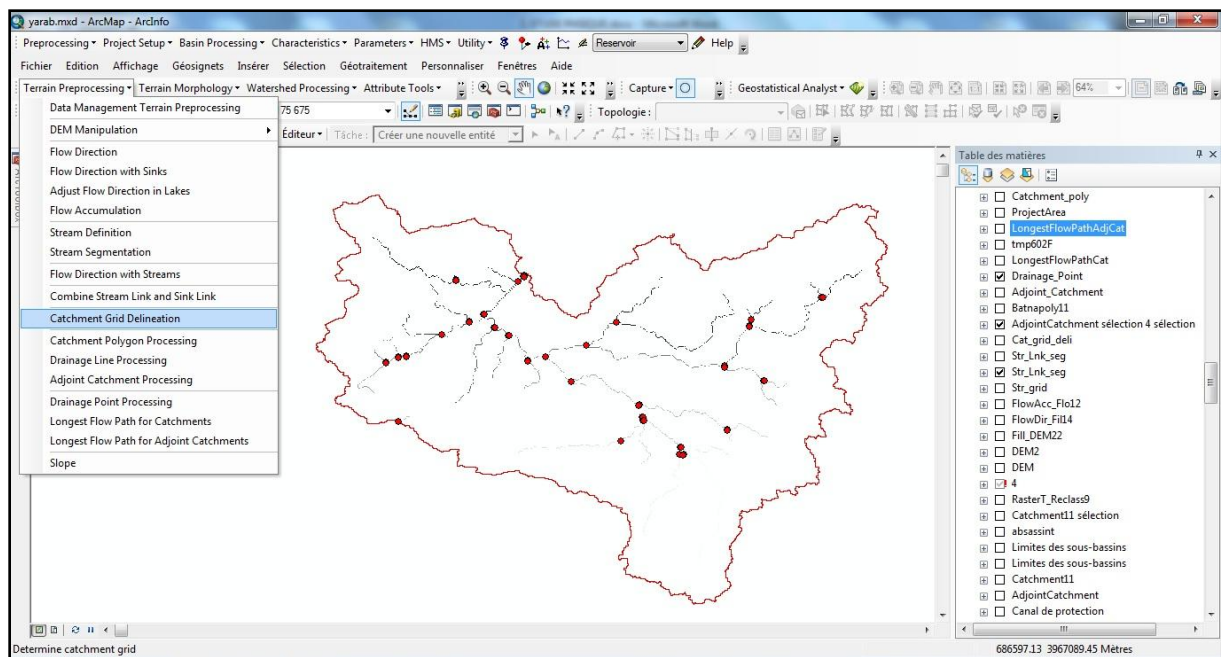
**Figure 18.** La segmentation des flux (STREAM SEGMENTATION) sous Arc Hydro Tools.

### **3.6. Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT GRID DELINEATION) :**

Cette fonction a pour objet de déterminer les sous-bassins de chaque tronçon du réseau hydrographique, les cellules qui se déversent dans chaque tronçon seront délimitées et regroupées ensembles.

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et CATCHMENT GRID DELINEATION.

Cette fonction crée une grille dans laquelle chaque cellule porte une valeur ou un code qui indique le bassin versant qui lui appartient.



**Figure 19.** Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT GRID DELINEATION) sous Arc Hydro Tools.

### 3.7. Délimitation des sous-bassins en format vecteur (CATCHMENT POLYGONE PROCESSING) :

Cette étape assure la conversion des sous-bassins du mode raster vers le mode vecteur.

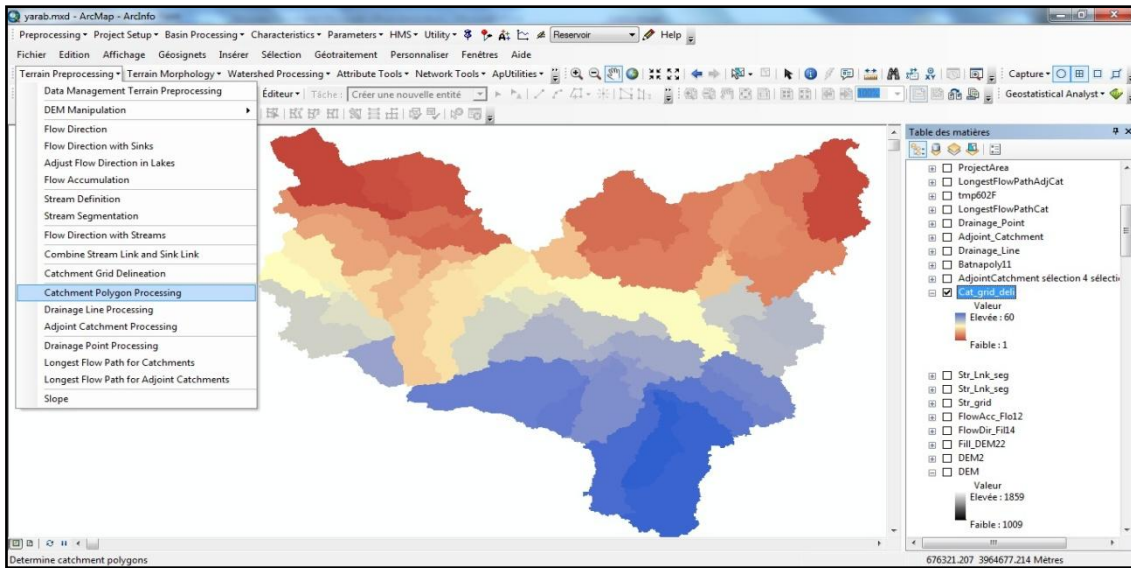
Le fichier en entrée est la délimitation des sous-bassins en format raster.

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et CATCHMENT POLYGONE PROCESSING.

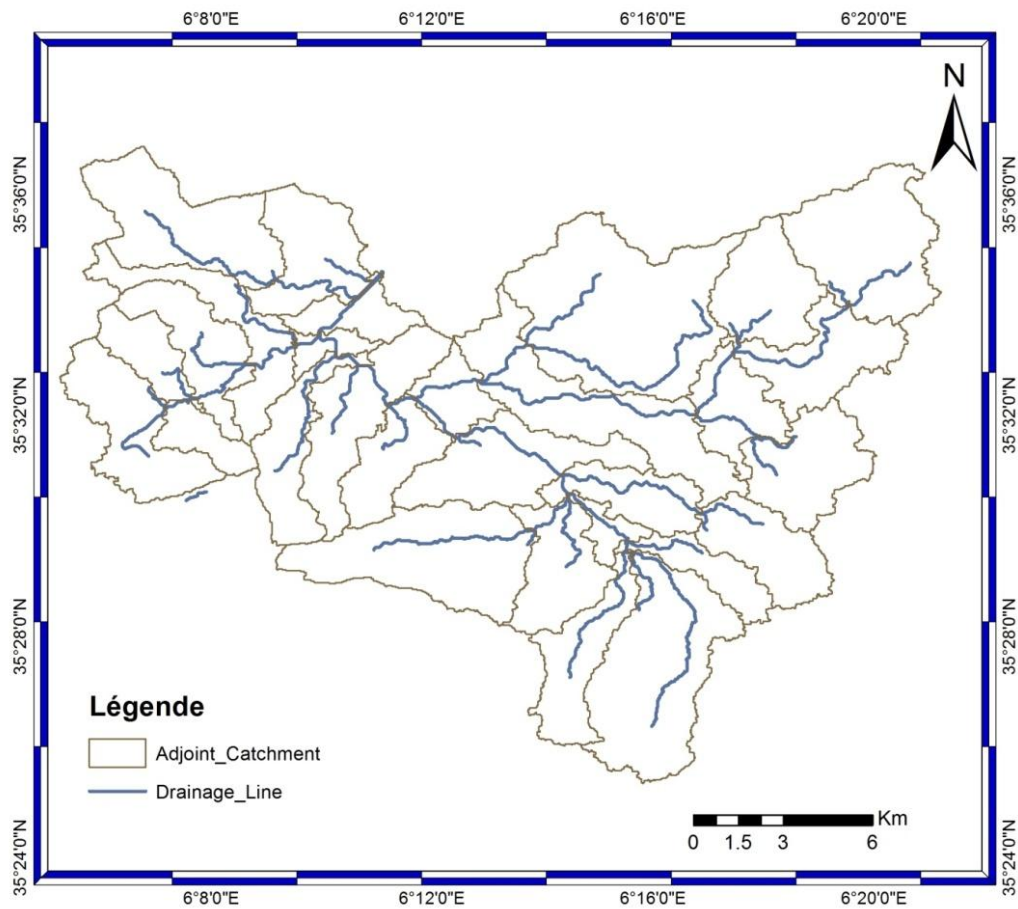
### 3.8. Conversion du réseau hydrographique en mode vecteur (DRAINAGE LINE PROCESSING)

Nous avons converti en vecteur le réseau hydrographique. Les fichiers en entrés sont la direction des flux et La segmentation du réseau d'écoulement

Pour exécuter cette fonction on utilise TERRAIN PREPROCESSING et DRAINAGE LINE PROCESSING.



**Figure 20.** Délimitation des sous-bassins (CATCHMENT POLYgone PROCESSING) en format vecteur sous Arc Hydro Tools.



**Figure 21.** Les sous-bassins et le réseau hydrographique en format vecteur.

### 3.9. La délimitation des sous bassin drainant la ville de Batna :

La connaissance des exutoires a facilité la détermination de chaque sous bassin, Figure 22.

Nous avons pu délimiter les sous bassins drainant la ville de Batna, et nous avons obtenu aussi leurs caractéristiques physiques telles que la superficie, le périmètre, la longueur de chaque talweg et la longueur du talweg principal aussi.

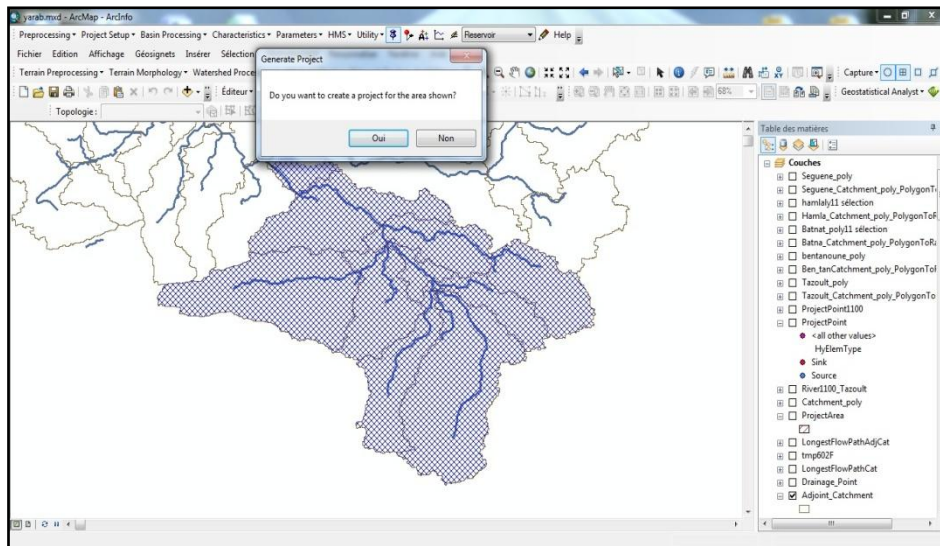


Figure 22. La délimitation du sous-bassin de Tazout.

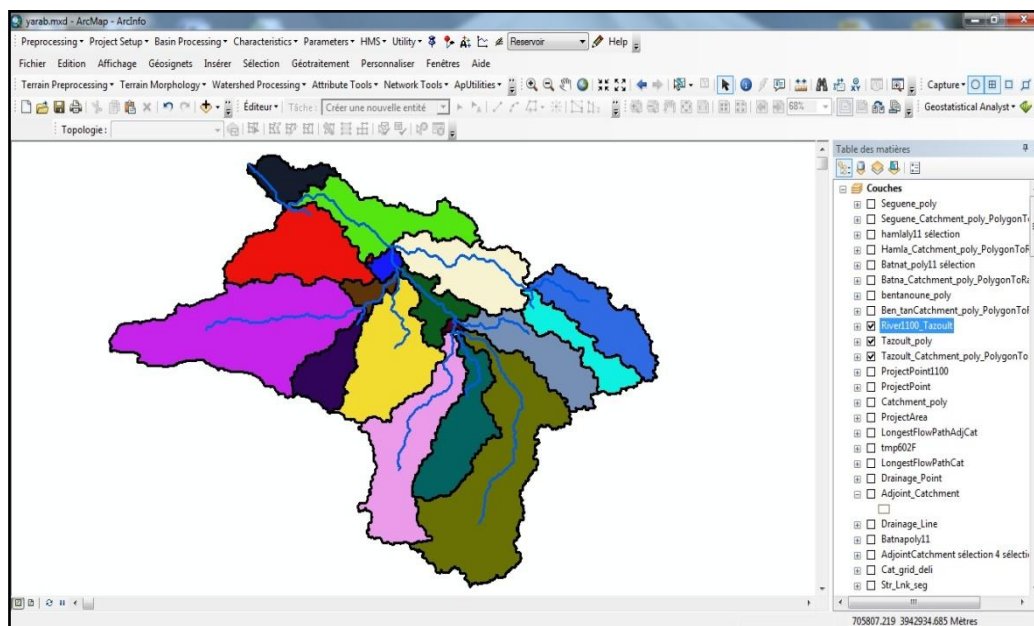


Figure 23. Le sous-bassin de Tazout.

## **Conclusion :**

Ce chapitre a pour objet en premier lieu de mettre en évidence les caractéristiques climatiques de la zone d'étude notamment les précipitations. Le climat de la zone d'étude est qualifié de semi aride qui se caractérise par l'irrégularité des précipitations.

La variation saisonnière des précipitations a montré que les saisons pluvieuses sont le printemps et l'automne avec des hauteurs considérables qui génèrent souvent des crues importantes.

Nous avons pu aussi extraire les caractéristiques géométriques des sous bassins qui contrôlent la réponse hydrologique des sous bassins drainant la ville de Batna et qui influencent fortement la dynamique des écoulements.

Nous avons réussi à déterminer avec précision les limites des sous bassins, leurs surfaces et le réseau hydrographique et ceci a été réalisé sous l'extension Arc hydro avec une série d'applications successives sur un DEM (DIGITAL MODEL ELEVATION), ce qui nous a fournit finalement des informations complètes et cohérentes sur les caractéristiques géométriques nécessaires à l'étude des inondations.



### **CHAPITRE III**

## **ESTIMATION ET CARTOGRAPHIE DES PLUIES EXTREMES DANS L'IMLUVIUM DE BATNA.**

## **Introduction:**

La répartition spatiale des pluies extrêmes qui couvre la totalité de l'impluvium de Batna nécessite en premier lieu une analyse fréquentielle des séries chronologiques des pluies maximales journalières annuelles avec l'application des lois empiriques, à savoir la loi de GEV, la loi de Gumbel et la loi Log-Normale. Ce qui nous a permis d'estimer les quantiles de pluies extrêmes ayant les périodes de retour de 5, 10, 20, 50 et 100 ans pour dix stations pluviométriques.

Ensuite, établir une cartographie des quantiles correspondant à la période de retour centennale par trois types d'interpolations.

Le terme précipitations extrêmes caractérise des événements pluviométriques de forte intensité se produisant sur un pas de temps court, et de faible occurrence à la fois dans le temps et dans l'espace (Berolo et al, 2003). Elles sont la cause principale des inondations dévastatrices qui génèrent des dégâts importants souvent irréversibles.

L'estimation des précipitations associées aux événements extrêmes est un sujet qui suscite de plus en plus d'intérêt dans le domaine des sciences de l'eau (Hubert et al, 2004). Et notamment dans le domaine de la conception des ouvrages assurant la protection contre les inondations (les infrastructures hydrauliques).

Dans la présente étude, nous avons commencé par une analyse fréquentielle des données de pluies journalières maximales enregistrées par dix stations pluviométriques (Figure 24). Qui consiste à étudier les événements passés afin d'en définir les probabilités d'apparition future (Degla et al, 2014). Cette analyse a été effectuée sur l'ensemble des séries de précipitations afin de s'assurer de l'indépendance, de l'homogénéité et de la stationnarité de ces dernières. Nous nous sommes appuyés sur plusieurs lois de distribution pour l'estimation des quantiles de précipitations. Le choix de la loi qui s'ajuste mieux aux données se base sur des tests d'adéquations, Il existe plusieurs tests statistiques qui permettent de juger du meilleur ajustement, et nous avons adopté les deux tests, Chi Deux  $\chi^2$  et les deux Critères d'information de BAYESIEN (BIC) proposé par Schwarz, 1978 et d'information d'Akaike (AIC) proposé par Akaike, 1974.

Cette approche est suivie par une interpolation spatiale des précipitations qui prévoit les hauteurs de pluies à des sites où il n'existe aucune donnée enregistrée. Nous avons utilisé

l'interpolation par l'inverse de la distance pondérée IDW, l'interpolation par Spline et le krigeage ordinaire (KO).

D'après le résultat de l'erreur quadratique moyenne (EQM), l'interpolation par la méthode Spline semble être la plus fiable.

### 1. Présentation et étude physique de l'impluvium de Batna :

L'impluvium de Batna (Figure 24), situé dans l'Est algérien, couvre une superficie de 807.68 km<sup>2</sup>, compris entre 35°25' et 35°47' de latitude Nord et entre 6°5' et 6°29' de longitude Est.

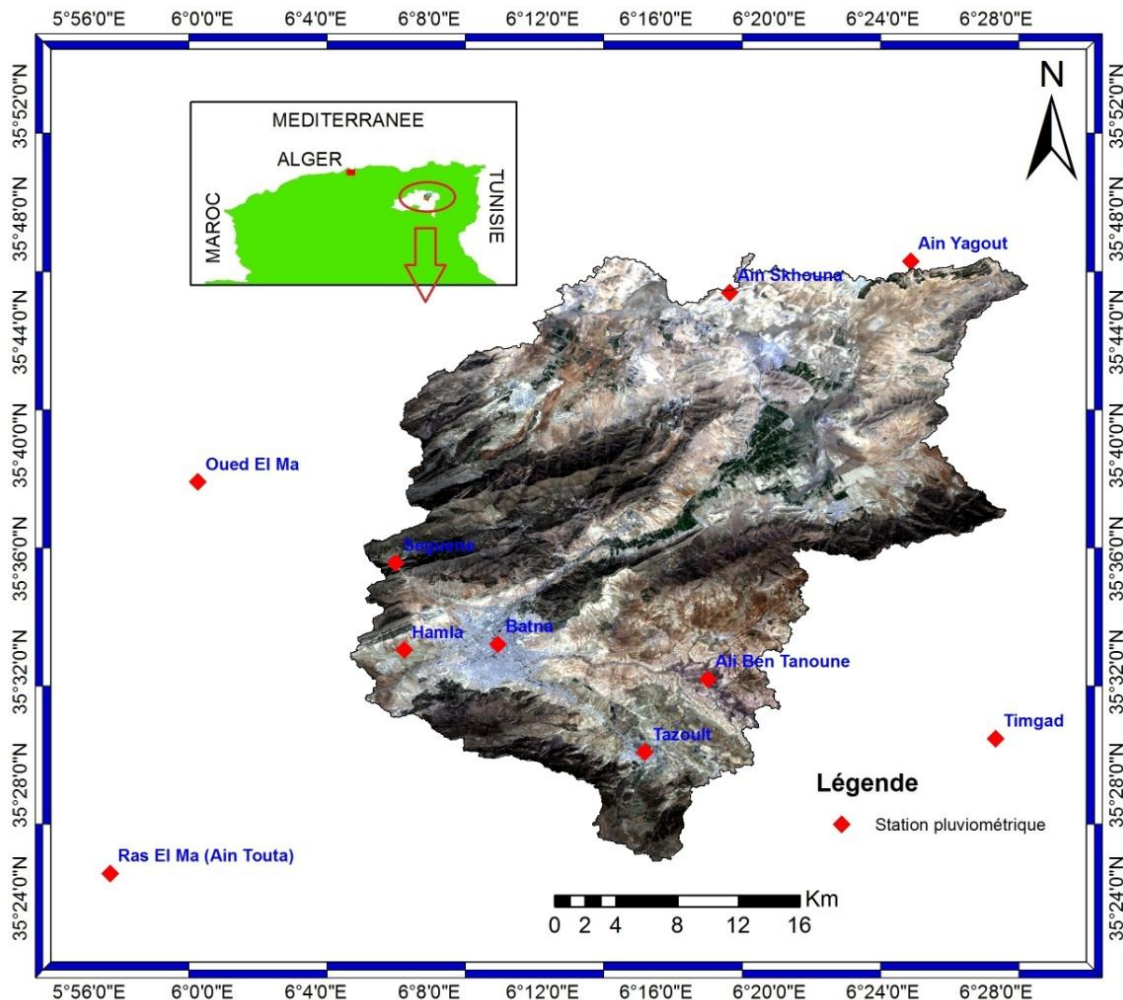


Figure 24. L'impluvium de Batna.

Les séries de pluies journalières enregistrées au niveau de chaque station pluviométrique couvrent une période de 44 années 1969 - 2012, à l'exception la série d'Ain Skhouna qui s'étale sur une période de 42 ans 1971 – 2012 (ANRH).

La constitution des échantillons est faite par l'extraction de la valeur maximale journalière de chaque année. La méthodologie des valeurs maximales de chaque année est apparait généralement préférée à la méthodologie des données supérieures à un seuil, aussi bien par les chercheurs que par les projeteurs (Cunnane, 1987).

Les paramètres statistiques des données exploitées sont calculés et résumés dans le tableau 1.

**Tableau 9.** Paramètres statistiques des données.

Série de précipitations	Valeur min en mm	Valeur max en mm	La moyenne en mm	Coefficient d'asymétrie (CS)	Coefficient De variation (CV)
Tazoult	20	94	46.3	0.903	0.423
Batna	12	64	36.7	0.293	0.366
Seguene	11	129	47.5	1.08	0.524
Hamla	10.1	94	34.6	1.4	0.522
Ben Tanoune	10	101	37.3	1.51	0.455
Oueds El Ma	12	94	38	1.2	0.45
Ras El Ma	10	94	36.9	1.23	0.502
Ain Yagout	11	120	39	1.8	0.48
Ain Skhouna	11	100	43	0.87	0.5
Timgad	13	93	35	1.5	0.41

## 2. L'analyse fréquentielle :

### 2.1. Le test de stationnarité, test d'indépendance et celui d'homogénéité:

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de (Kendall Aka et al, 1996), d'indépendance de Wald-Wolfowitz (Hache et al, 1999) et d'homogénéité de (Wilcoxon Siegel, 1956), (Alain et al., 2015).

Le test de stationnarité de KENDALL 1975 cité par (Manohar et al, 2005) est un test de corrélation sur le rang, il sert à détecter les tendances dans les séries (Yue et al, 2004). Celui d'indépendance de Wald-Wolfowitz est utile pour vérifier dans les observations, l'existence d'une dépendance séquentielle qui conduirait, lorsque celle-ci est avérée, à définir le type et le niveau de celle-ci avant de continuer l'étude du processus des fréquences. Ces tests statistiques permettent essentiellement d'évaluer la représentativité des répartitions observées par rapport aux valeurs connues de la population et servent à évaluer la significativité des observations (Albert et al, 2007).

Le test d'homogénéité de Wilcoxon sert à confirmer l'homogénéité des données de la série à analyser.

## **2.2. Les lois de distribution des pluies annuelles maximales: Ferrer, 1992.**

Une enquête de l'OMM, 1989 faite auprès de 55 agences de 28 pays révèle que 52 % de ces dernières ont pour habitude d'utiliser comme loi de distribution, la loi des valeurs extrêmes généralisées GEV, comme référence principale. Cette loi admet comme cas particuliers, les lois de Gumbel, Fréchet et Weibull. 31 % des agences utilisent soit une loi Pearson III (P3) soit une loi Log Pearson III (LP3) ou encore, une loi Pearson type III LN. Par ailleurs, (Rossi et al, 1984) ont remarqué que la loi des valeurs extrêmes à deux paramètres TCEV s'adaptait mieux à des séries des précipitations journalières maximales observées que des distributions plus traditionnelles ne pouvaient le faire.

Nous avons retenu la loi de GEV, la loi de Gumbel et celle de Log-Normale.

### **2.2.1. La loi Généralisée des Valeurs Extrêmes GEV:**

La loi GEV constitue une méthode statistique souvent employée en météorologie pour rechercher les valeurs extrêmes pour les précipitations ou les vents (Coles, 2001). Cette loi permet d'ajuster une courbe de régression en fonction de la fréquence d'apparition des événements dans le passé et de prévoir la probabilité d'apparition d'un événement de plus grande ampleur avec une période de retour plus longue que la série de mesures disponibles. Fallot, 2013.

$$F(X) = \exp \left[ - \left( 1 - K \left( \frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right)^{1/K} \right]$$

$\alpha$ ,  $\mu$  et  $K$  correspondent respectivement aux paramètres d'échelle, de position et de forme.

### **2.2.2. La loi de Gumbel :**

La loi de Gumbel est un cas particulier de la loi GEV ou  $K=0$ . Cette distribution statistique est un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes (Wilcoxon, 1945). Cette loi est souvent utilisée, car elle permet un ajustement linéaire à partir d'une double loi exponentielle selon une méthode décrite dans Gumbel, 1958 et illustrée dans (Fallot et al, 2013).

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( \frac{x-\mu}{\alpha} \right) \right]$$

### **2.2.3. La loi Log-Normale :**

Elle est aussi appelée loi de Galton. On dit qu'une série statistique s'ajuste mieux avec une distribution loi log-normale quand le logarithme de son variable aléatoire  $X$  suit une loi normale. Plusieurs études ont justement affirmé que le meilleur ajustement pour les régimes hydrologiques arides et semi arides est obtenu par la loi log normale (Dubreuil, 1974).

La Formule mathématique de la loi Log-Normale est la suivante.

$$F(x) = \frac{1}{x \cdot \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right] / \mu : \text{Est espérance de } \ln X \text{ et } \sigma : \text{écart-type de } \ln X.$$

### **2.2.4. L'estimation des paramètres des fonctions de distribution :**

Nous avons estimé les paramètres des fonctions de distribution en utilisant la méthode de type maximum vraisemblance. Cette méthode consiste à déterminer les paramètres de la loi choisie de façon à rendre l'échantillon le plus vraisemblable possible (Roche, 1963).

### **2.3. La Validité des modèles :**

A fin d'identifier la loi d'ajustement adéquate pour chaque série, il existe de nombreux tests d'adéquation. Nous avons adopté le test de Khi Deux ( $\chi^2$ ), qui constitue un premier mode de sélection par comparaison de l'adéquation de ces lois (Albert et al, 2007).

Il est difficile d'identifier la loi la plus adéquate graphiquement, ce qui nous a amenés à faire intervenir les deux Critères d'information de BAYESIEN (BIC) proposé par (Schwarz, 1978) et d'information d'AKAIKE (AIC) proposé par (Akaike, 1974).

Les formules mathématiques du (BIC) et (AIC) sont les suivantes :

$$\text{BIC} = -2 \log (L) + 2 k \log (N).$$

Où: L la vraisemblance, K le nombre de paramètres et N la taille de l'échantillon.

$$\text{AIC} = -2 \log (L) + 2(k).$$

Où: L la vraisemblance et K le nombre de paramètres.

### **3. L'interpolation :**

Le terme d'interpolation sert à désigner l'ensemble des méthodes de restitution de champs spatiaux continus à partir d'un semis de points (Daniel et al, 2009). C'est une fonction statistique qui estime les valeurs du phénomène étudié aux endroits où aucune valeur mesurée n'est disponible sur la base d'un échantillonnage.

Trois méthodes ont été utilisées, deux déterministes et une probabiliste (stochastique).

#### **3.1. L'IDW ou la pondération inverse à la distance :**

Elle a été développée par le National Weather, Service, aux États-Unis, en 1972, et est classée comme une méthode d'interpolation mathématique déterministe (Zaninetti et al, 2005). IDW est un algorithme simple qui donne plus de poids aux valeurs proches qu'aux valeurs éloignées (Shepard, 1968). Cette méthode d'interpolation permet d'assigner des valeurs estimées sur une grille, calculées par une moyenne pondérée par la distance des valeurs connues. (Lu et al, 2008) et (Soenario et al, 2010).

#### **3.2. Le Spline ou la méthode polynomiale locale optimisée :**

C'est une méthode d'interpolation selon laquelle les valeurs sont déterminées à l'aide d'une fonction mathématique qui réduit la courbure globale des surfaces et restitue une surface lisse passant exactement par les points en entrée (ESRI, 2010).

#### **3.3. Le krigeage ordinaire Cressie, 1988 :**

C'est une méthode stochastique dite géostatistique; elle est régulièrement utilisée pour caractériser des variables hydrométéorologiques et climatiques, à des échelles d'espace et de

temps très variables (Delhomme, 1976). Il prend en considération la covariance des points de données en intégrant la dispersion spatiale de ces points (Eric, 2009).

#### 4. Résultats et discussion :

Les résultats du test d'indépendance de Wald-Wolfowitz indiquent que les observations sont indépendantes à un seuil de 5% pour toutes les stations à l'exception des stations Hamla et Ain Yagout où les observations sont acceptées à un seuil de 1%.

Les deux autres tests sont valables pour les observations de toutes les stations à un seuil de 5%.

##### 4.1. Résultats des deux tests :

Nous avons calculé les valeurs des deux tests en utilisant le logiciel HYFRAN (Hydrological Frequency Analysis) développé par l'INRS-EAU du Canada.

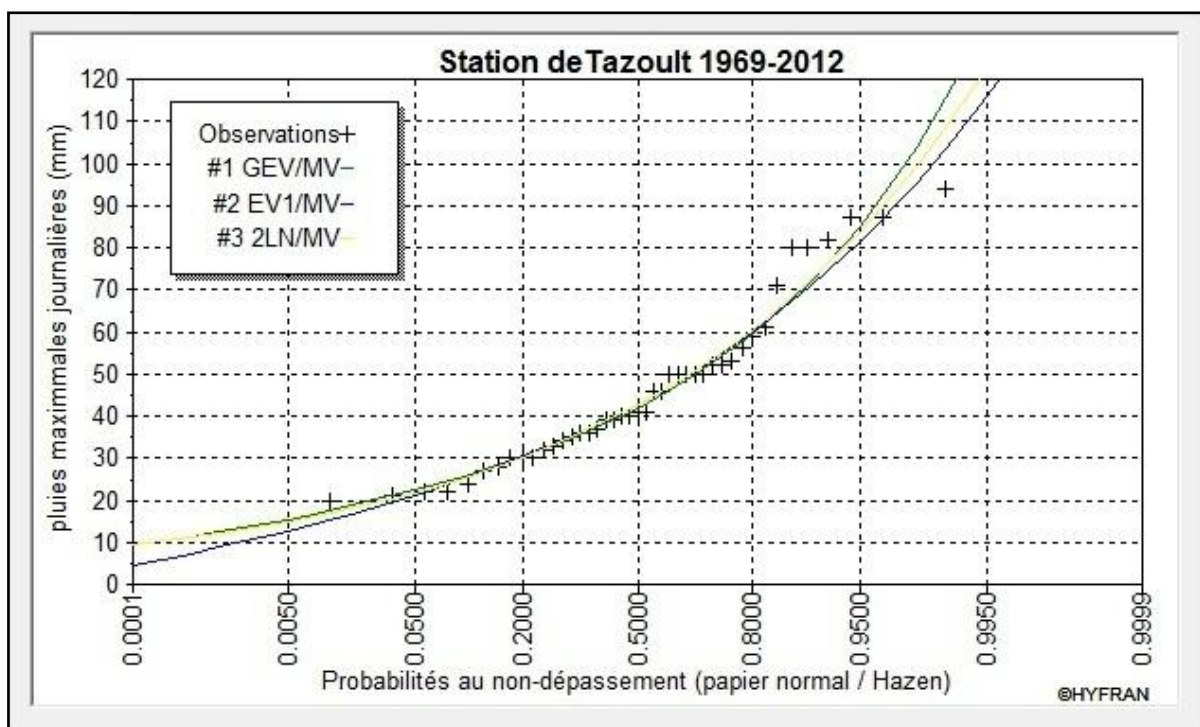
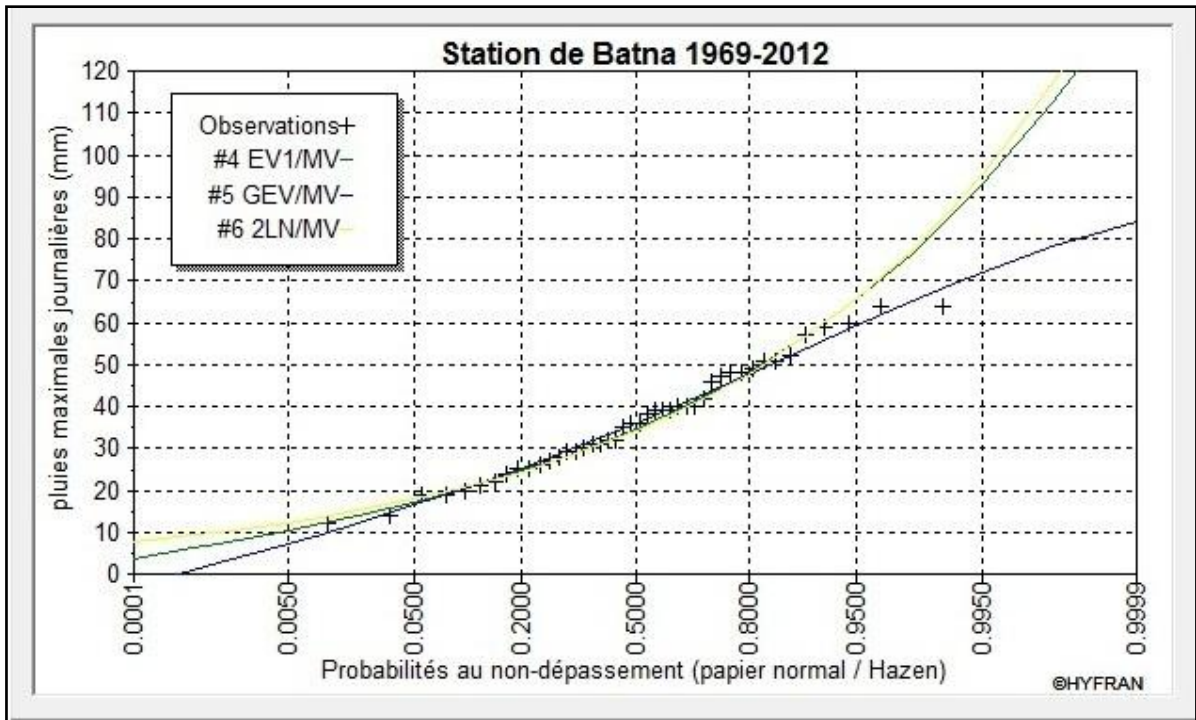
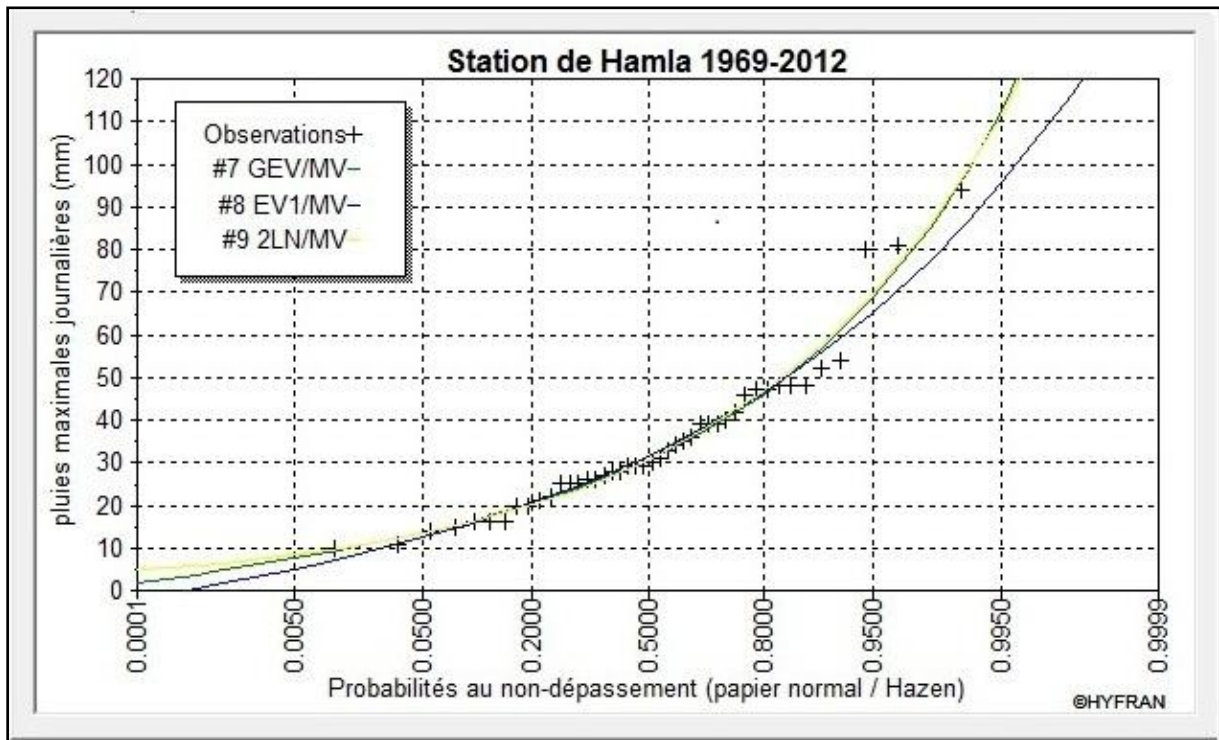


Figure 25. Comparaison graphique des ajustements (Station de Tazoult).

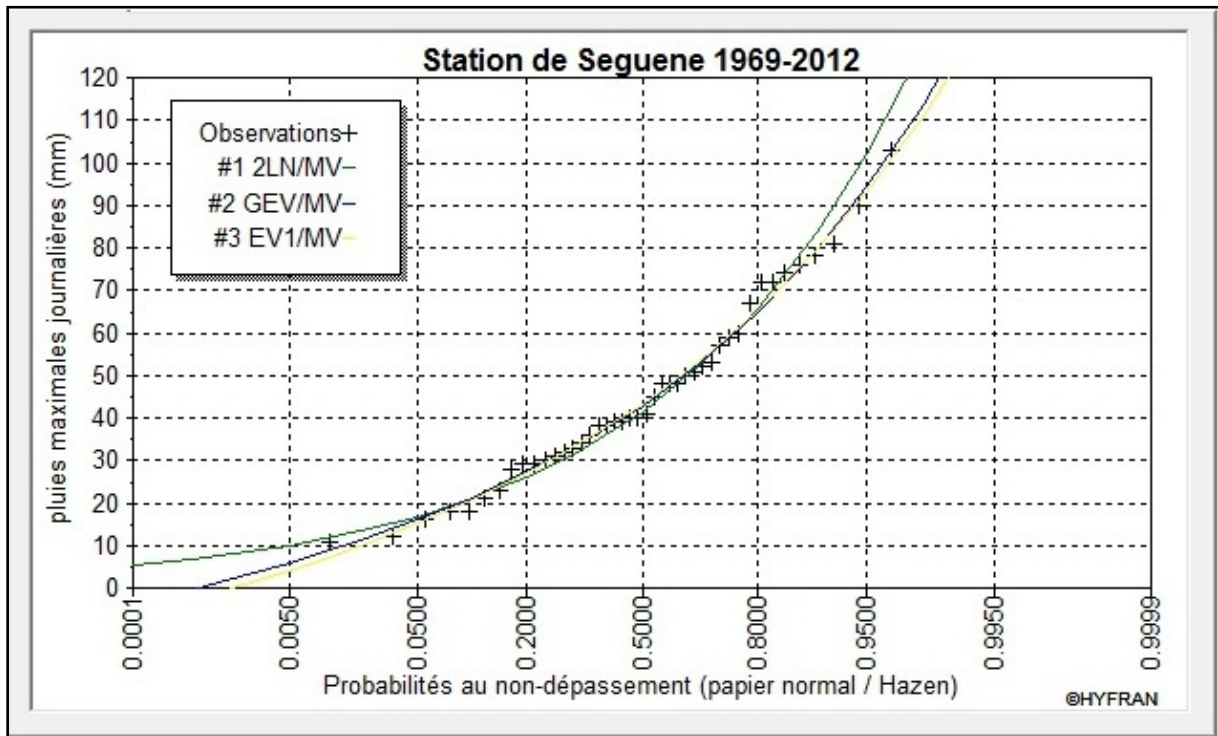




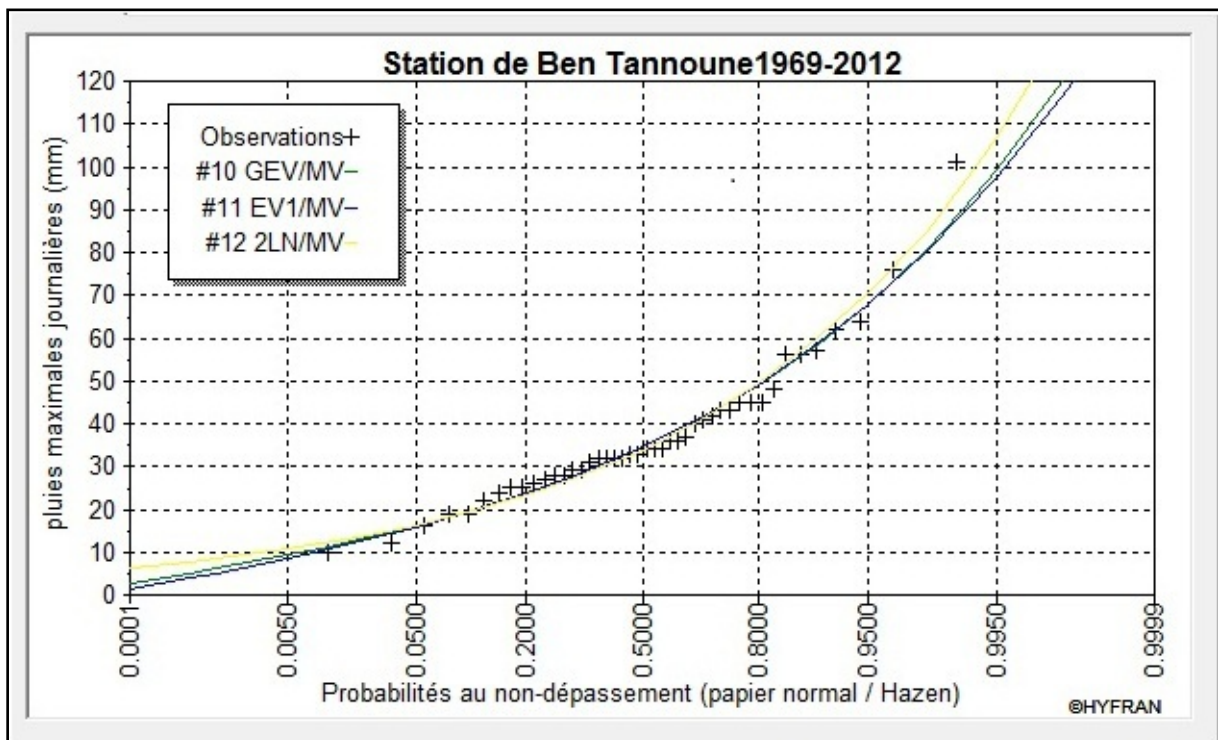
**Figure 26.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Batna).



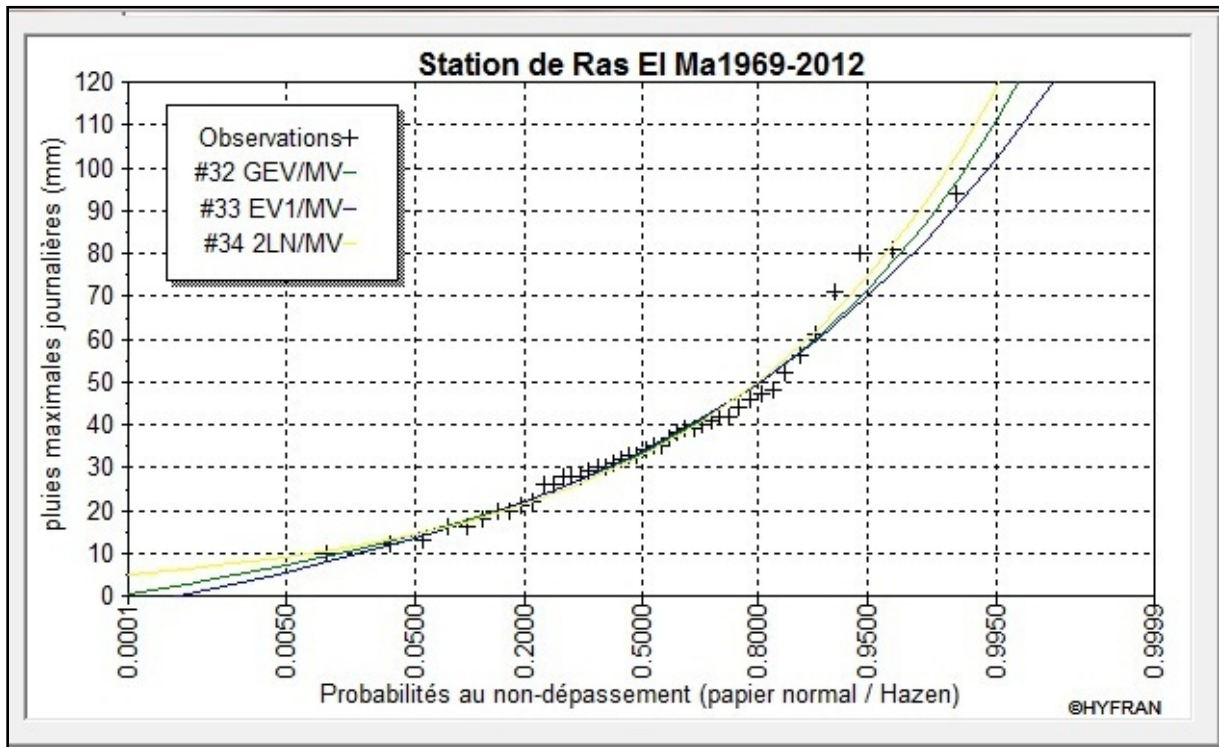
**Figure 27.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Batna).



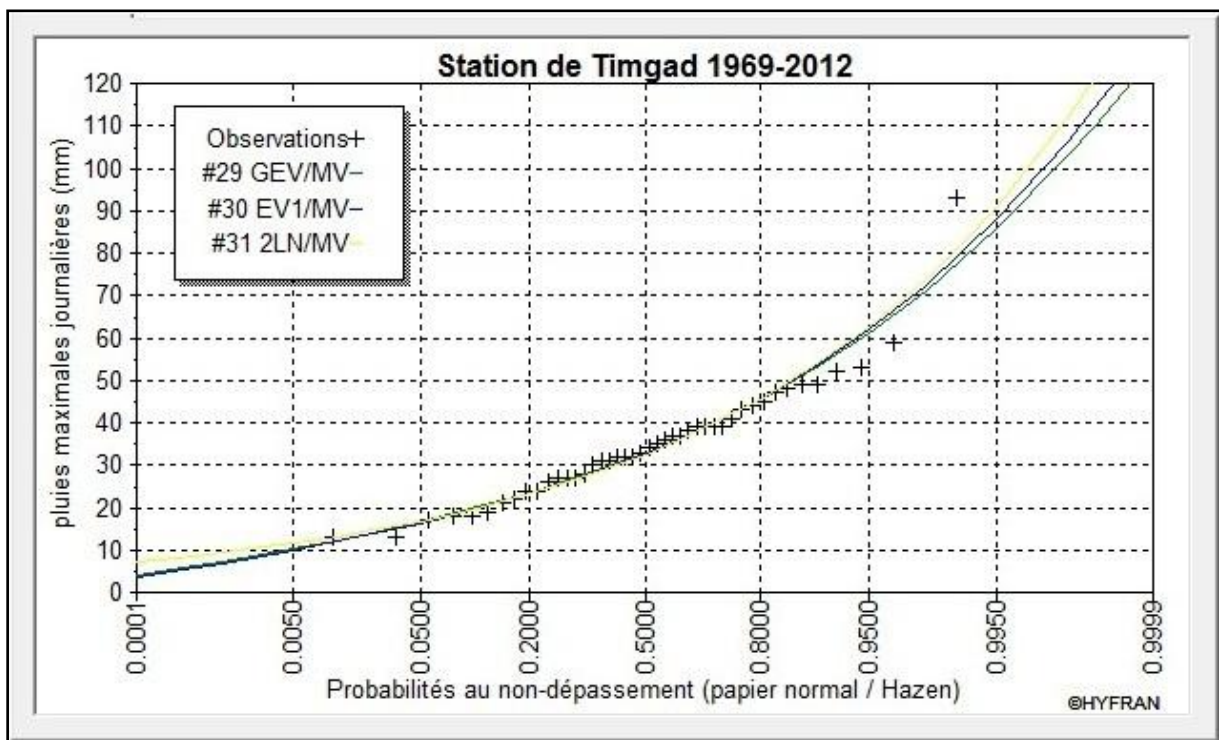
**Figure 28.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Segeune).



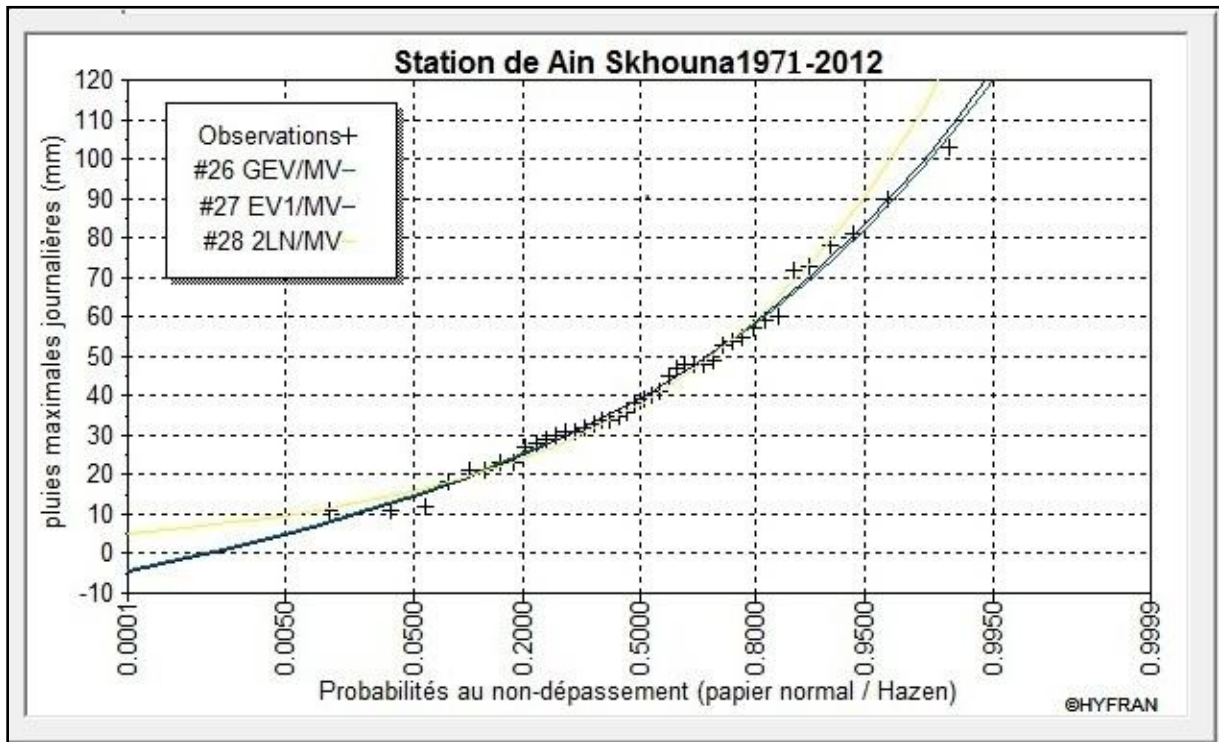
**Figure 29.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Ben Tanoune).



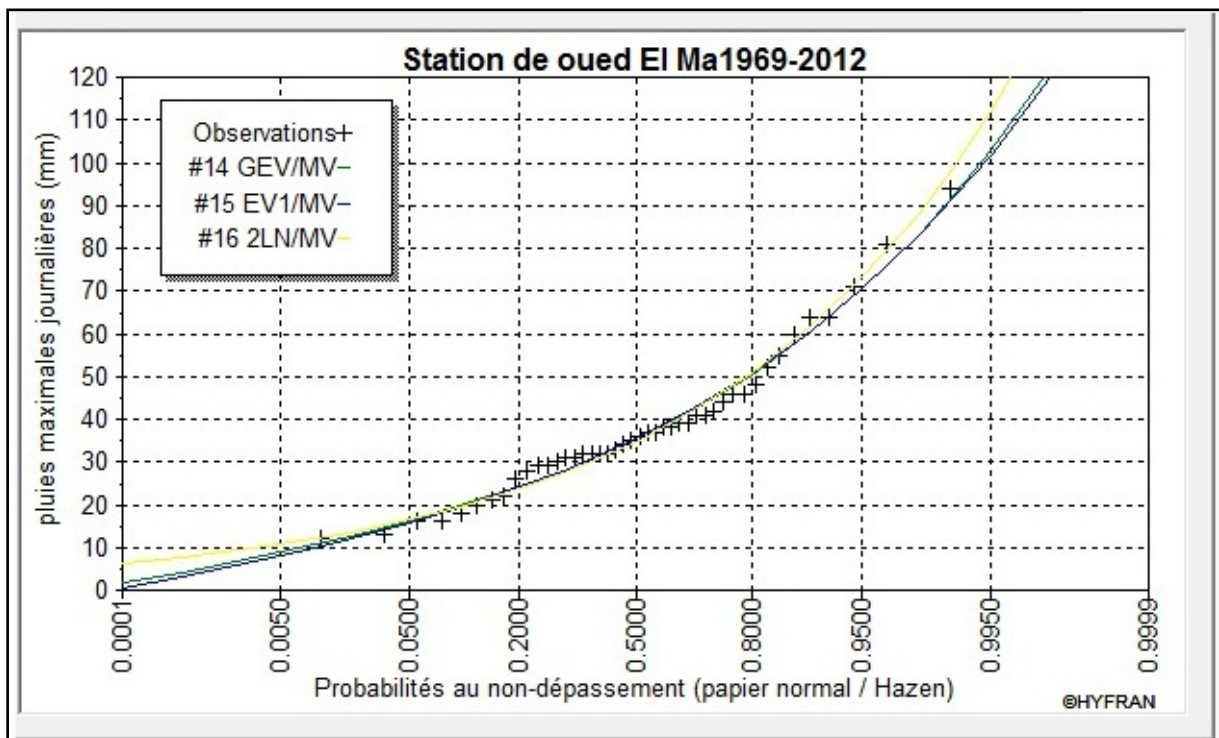
**Figure 30.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Ras El Ma).



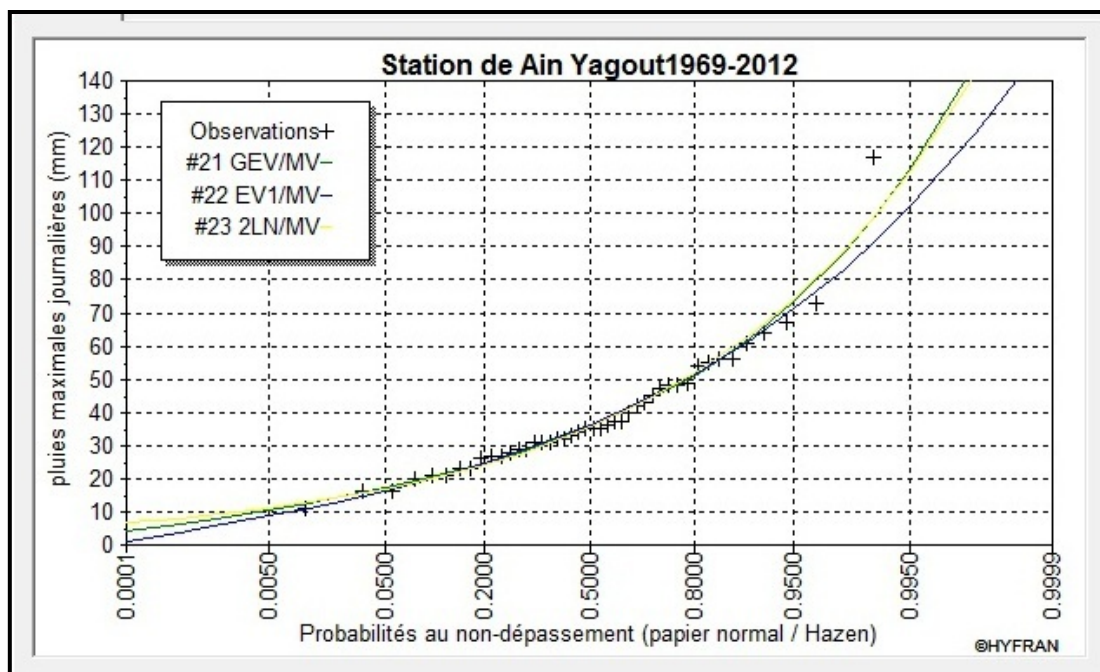
**Figure 31.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Timgad).



**Figure 32.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Ain Skhouna).



**Figure 33.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Oued El Ma).



**Figure 34.** Comparaison graphique des ajustements (Station de Ain Yagout).

**Tableau 10.** Résultats du test Pearson Khi-Deux ( $\chi^2$ ).

Série de précipitations	Les lois d'ajustement		
	Log-Normale	Gumbel	GEV
Tazoult	6.60	5.77	8.28
Batna	6.32	4.27	4.68
Segeune	5.09	7.14	4.68
Hamla	9.18	7.95	4.68
Ben Tanoune	10.82	5.09	5.09
Oueds El Ma	7.95	5.91	7.14
Ras El Ma	5.50	3.86	4.27
Ain Yagout	3.86	2.64	3.86

Ain Skhouna	1.81	2.95	2.95
Timgad	6.73	2.64	2.64

**Tableau 11.**Résultats des critères AIC et BIC.

Série de pluies	Critères	Log-normal	Gumbel	GEV
Tazoult	BIC	391.617	388.624	388.777
	AIC	386.264	385.056	383.425
Batna	BIC	360.401	360.003	361.924
	AIC	356.833	356.435	356.572
Seguene	BIC	406.241	409.353	405.691
	AIC	402.673	404.001	402.123
Hamla	BIC	375.710	372.804	371.706
	AIC	370.358	369.236	368.138
Ben Tanoune	BIC	370.415	369.388	373.098
	AIC	366.847	366.847	367.745
Oueds El Ma	BIC	374.193	373.821	377.553
	AIC	370.625	370.252	372.201
Ras El Ma	BIC	377.648	377.517	381.139
	AIC	374.080	373.949	375.786
Ain Yagout	BIC	375.081	374.828	378.300
	AIC	371.512	371.260	372.948
Ain Skhouna	BIC	376.250	377.474	379.949
	AIC	372.775	373.999	374.736
Timgad	BIC	357.034	356.792	360.529
	AIC	353.466	353.223	355.176

#### 4.2. Le choix de distribution et les quantiles calculés :

Sur la base de l'analyse visuelle de l'ajustement des lois et les résultats des deux tests, nous avons pu choisir la distribution adéquate aux données de chaque série.

Les résultats des pluies extrêmes à différentes périodes de retours pour l'ensemble des stations pluviométriques sont résumés dans le tableau 12.

**Tableau 12.** Hauteurs de pluies Extrêmes estimées en mm.

Station de mesure	Loi d'ajustement Adopter	Les paramètres	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans	1000 ans
Tazoult	Gumbel	$u=37.454$ $\alpha=14.815$	59.7	70.8	81.5	95.3	106	153
Batna	Gumbel	$u= 30.198$ $\alpha=11.8852$	48	56.9	65.5	76.6	84.9	112.5
Seguene	GEV	$\alpha =18.589$ $k=-0.03525$ $u= 36.043$	64.7	79.6	94.3	114	129	168
Hamla	GEV	$\alpha =12.215$ $k= -0.1035$ $u= 26.153$	46	57.1	68.6	84.9	98.1	149
Ben Tanoune	Gumbel	$u=29.8564$ $\alpha =12.8092$	49.06	58.7	67.9	79.8	88.7	117.2
Oueds El Ma	Gumbel	$u= 30.5098$ $\alpha =13.4468$	50.7	60.8	70.4	83	92.4	127.5
Ras El Ma	Gumbel	$u= 28.7063$ $\alpha =13.8735$	49.5	59.9	69.6	82.8	92.5	130.1
Ain Yagout	Gumbel	$u= 31.1324$ $\alpha =13.4394$	51	61	71	84	93	135.7
Ain Skhouna	Log-Normale	$\mu : 3.62975$ $\sigma =0.5315$	59	74.5	90.4	112	130	172
Timgad	Gumbel	$u=28.6737$ $\alpha =11.2371$	45.5	54	62	72.5	80.4	112

Les résultats montrent la prédominance de la loi de Gumbel qui a servi de modèle d'ajustement aux séries chronologiques de valeurs extrêmes dans le cadre de nombreuses études dans le monde (Koutsoyiannis, 2004). En Algérie, cette loi est la plus utilisée par la

plupart des services météorologiques officiels, pour décrire la fréquence des pluies extrêmes. Elle a l'avantage d'être très connue par les ingénieurs qui l'utilisent dans le cadre des travaux sur la fiabilité des infrastructures hydrauliques (Benkhaled, 2007).

#### 4.3. L'interpolation des pluies Extrêmes estimées :

Les mesures de pluie directes au sol provenant d'un réseau de pluviomètres sont ponctuelles (Renard et al, 2007). Elles sont avant tout une valeur indicative du volume de pluie recueilli en un point spécifique. Cette connaissance spatiale discrète est insuffisante, ou peu évidente à visualiser, notamment lors de l'interprétation d'événements pluvieux extrêmes (Comby, 1998). Ces valeurs nécessitent donc d'être interpolées dans l'espace afin de connaître avec précision la pluie surfacique (Laborde, 2000). A l'aide de l'extension Geostatistical Analyst du logiciel Arc Gis de l'institut ESRI (Environmental Systems Research Institute), nous avons pu effectuer les trois types d'interpolation (IDW, Spline et le krigeage ordinaire), nous avons pris comme exemple les valeurs de pluies à récurrence centennale.

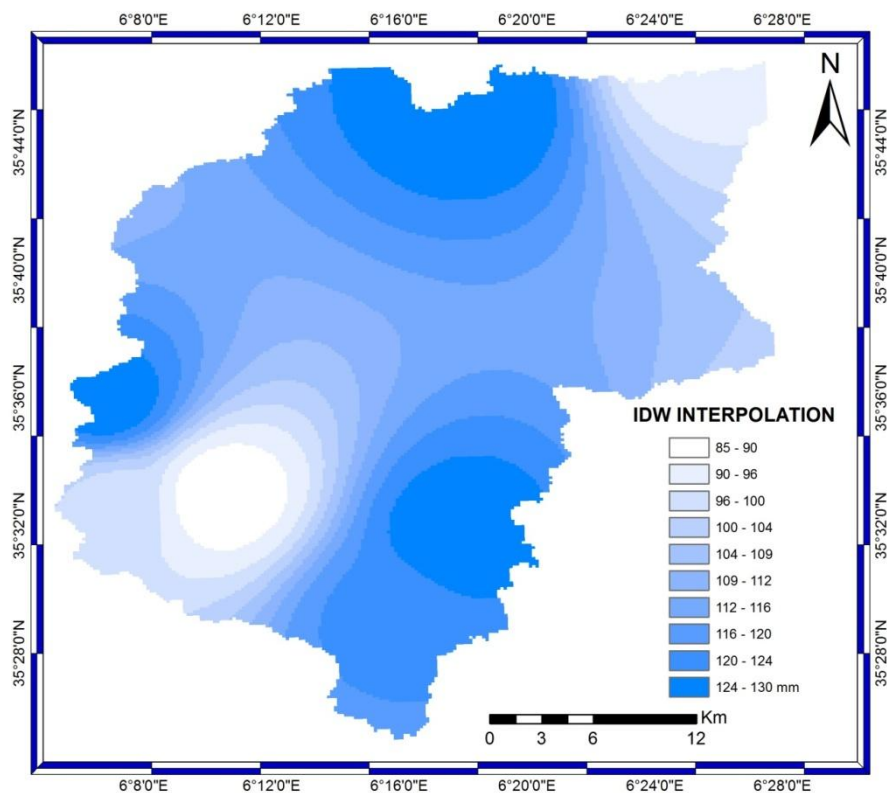
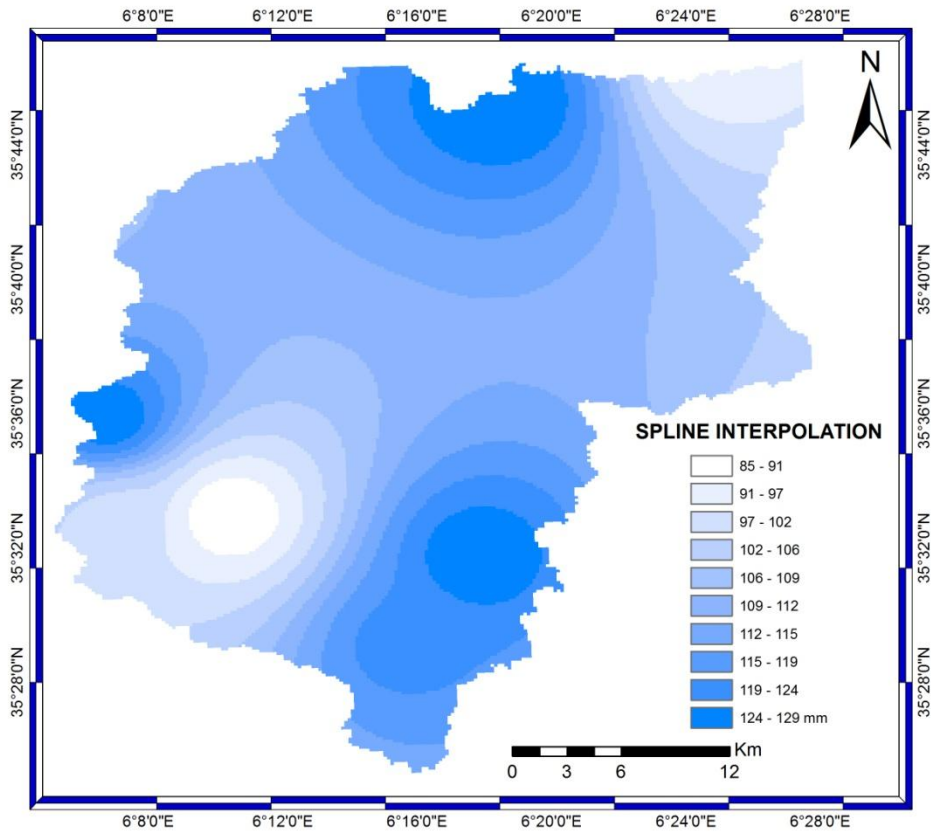
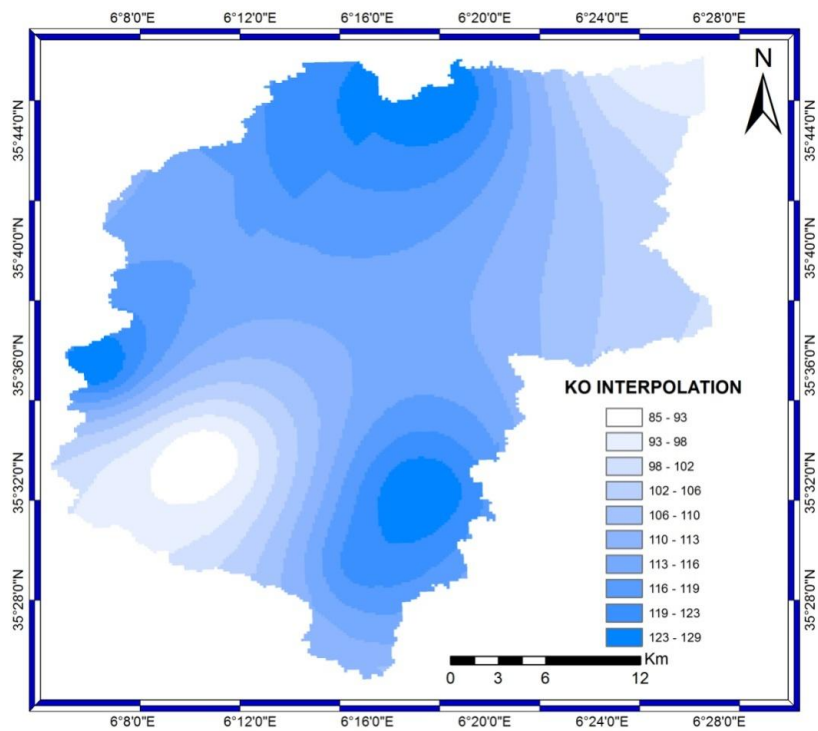


Figure 35. Interpolation IDW.





**Figure 36.** Interpolation par Spline.



**Figure 37.** Interpolation KO.

La méthode qui représente une meilleure interpolation des données est celle qui représente la valeur réduite de l'erreur quadratique moyenne (EQM).

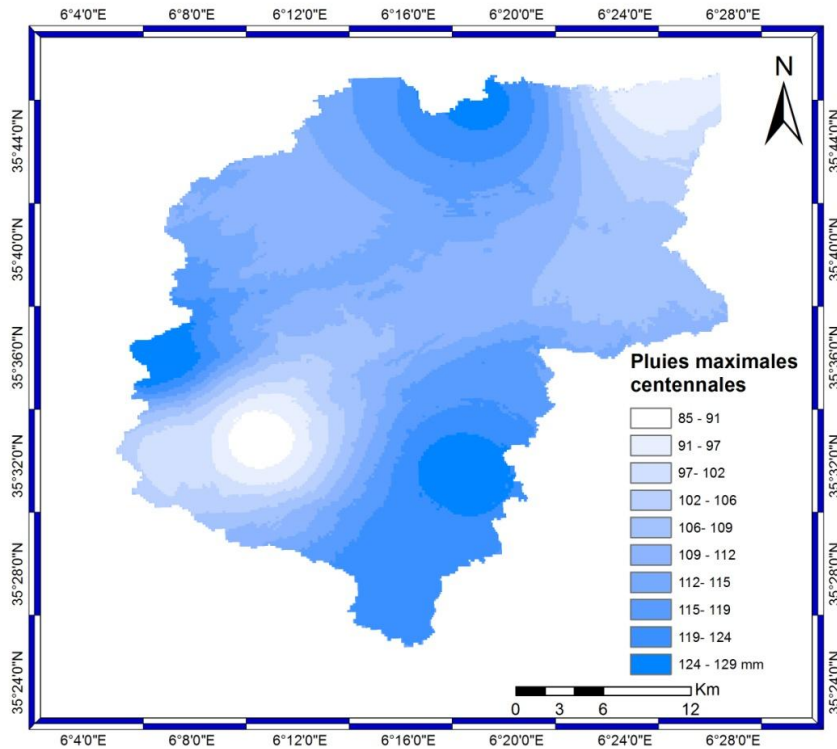
Geostatistical Analyst offre un outil de validation croisé permettant de calculer l'erreur de l'estimation pour apprécier et comparer la pertinence des méthodes utilisées.

**Tableau 13.** Erreurs quadratique moyenne (EQM) pour chaque type d'interpolation.

Méthode d'interpolation	Erreurs quadratique moyenne (EQM) en mm
IDW	23.63
KO	25.54
Spline	23.11

La spatialisation des données de précipitations avec l'interpolation Spline, figure 36, semble être la méthode la plus fiable par rapport aux autres méthodes avec un meilleur résultat de (EQM). Les méthodes statistiques utilisées ont mis en évidence la dimension spatiale des pluies extrêmes, qui montre une variabilité et une distribution inégale des précipitations au niveau de l'impluvium de Batna.

Nous avons superposé les résultats trouvés (Interpolation Spline), avec les données topographiques de l'impluvium de Batna (les altitudes), pour arriver finalement à une répartition et une spatialisation des pluies extrêmes très proche de la réalité.



**Figure 38.** Les pluies maximales centennales de l'impluvium de Batna.

### Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons procédé en premier lieu à une analyse fréquentielle des données de précipitations extrêmes à partir des données journalières de dix stations pluviométriques.

Cette analyse a permis l'estimation des quantiles de précipitations extrêmes pour différentes périodes de retours afin de trouver la loi d'ajustement adéquate pour chaque série de données.

In fine, l'interpolation a fourni des résultats pour des sites où il n'existe aucune donnée à partir de données échantillonnées (stations de mesure).

La comparaison de différentes méthodes d'interpolation utilisées à l'aide d'un outil de validation croisé a montré la pertinence de la méthode de SPLINE par rapport aux autres méthodes.

Cette représentation cartographique des précipitations extrêmes peut constituer une source d'information précieuse et un outil d'aide à la décision pour les concepteurs des infrastructures hydrauliques assurant la protection contre les inondations.

**CHAPITRE IV**

**ETUDE PHYSIQUE**

**DE L'IMPLUVIUM DE BATNA**

## 1. Etude physique de l'impluvium de Batna :

### 1.1. Les caractéristiques géométriques :

#### 1.1.1. La surface et le périmètre :

La surface et le périmètre du bassin versant ont été mesurés par des techniques de limitation et digitalisation.

**A**= 807.68 km<sup>2</sup>. **P**= 241.39 Km

#### 1.1.2. La forme :

L'indice de compacité de Gravelius (1914)  $K_C$  est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_C = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi A}} = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 2.37$$

Avec :

$K_C$  : l'indice de compacité de Gravelius

A : surface du bassin versant en km<sup>2</sup>

P : périmètre du bassin en km

$K_C = 2.37$ , le bassin est de forme allongée.

### 1.2. Les reliefs :

L'influence des reliefs est naturellement perceptible et se conçoit d'une façon claire sur les écoulements de surface, les reliefs influencent fortement sur la réponse hydrologique des bassins versants et sur le régime des écoulements en période de crue. La réalisation des cartes est basée sur l'exploitation des données d'un DEM (DIGITAL ELEVATION MODEL) de 30 m de résolution sous ARCGIS 10.

### 1.2.1. La carte hypsométrique :

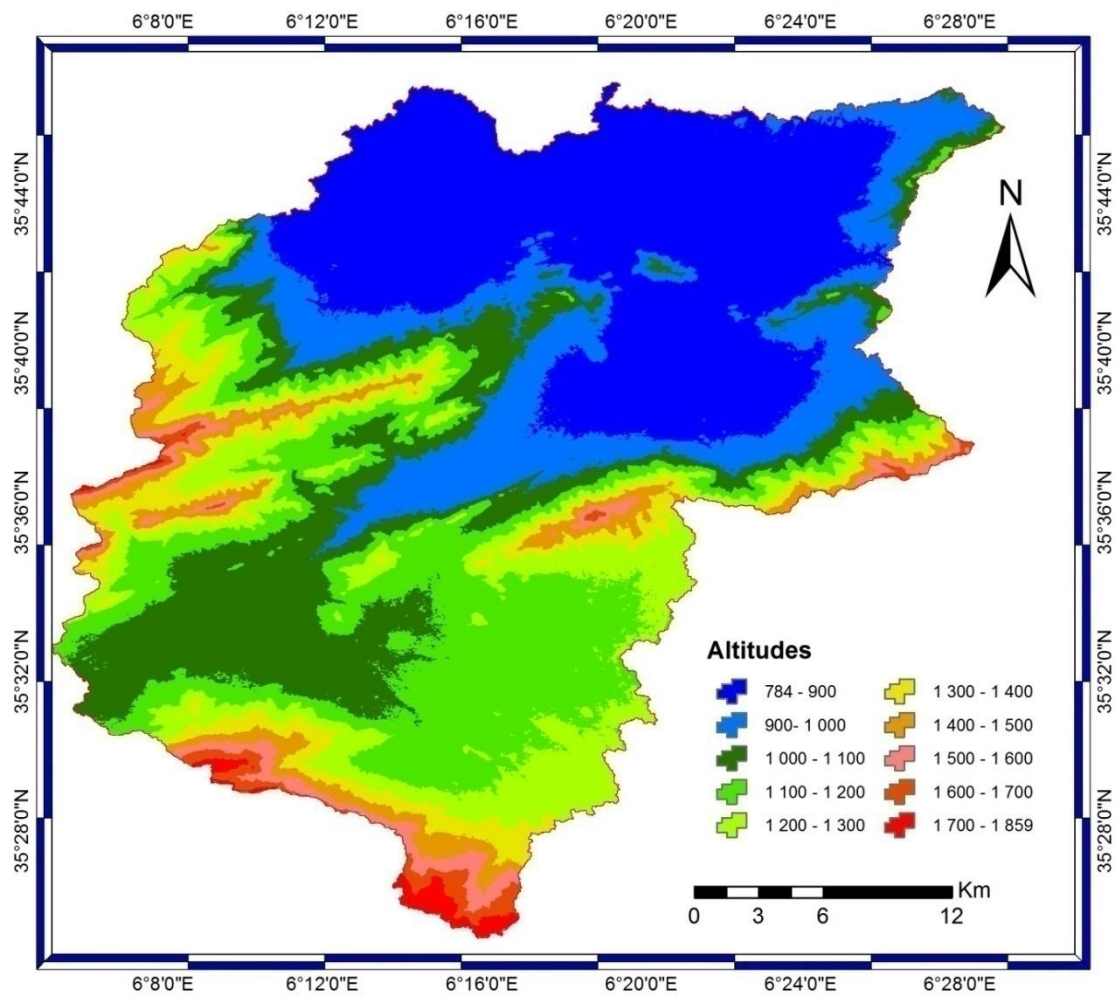
La carte hypsométrique offre une vision globale et synthétique des reliefs, elle représente la répartition des surfaces en Km<sup>2</sup> et peut être en % en fonction d'altitudes en m.

**Tableau 14.** Caractéristiques des altitudes de l'impluvium de Batna.

Altitude maximale	Altitude minimale	Altitude moyenne
1859 m	784 m	1074.88 m

**Tableau 15.** Répartition altimétrique de l'impluvium de Batna

Altitudes	Surface en Km <sup>2</sup>	Surface en %	Surface cumulé en Km <sup>2</sup>	Surface cumulé en %
784 - 900	223.83	27.83	223.83	27.83
891.5 - 1000	106.82	13.22	330.65	41.05
1000 - 1100	127.47	15.82	458.12	56.87
1100 - 1200	145.84	18.05	603.96	74.92
1200 - 1300	92.34	11.43	696.3	86.35
1300 - 1400	47.39	5.86	743.69	92.21
1400 - 1500	31.22	3.88	774.91	96.09
1500 - 1600	16.84	2.08	791.75	98.17
1600 - 1700	9.84	1.22	801.59	99.36
1700 - 1859	5.6	0.61	807.68	100 %



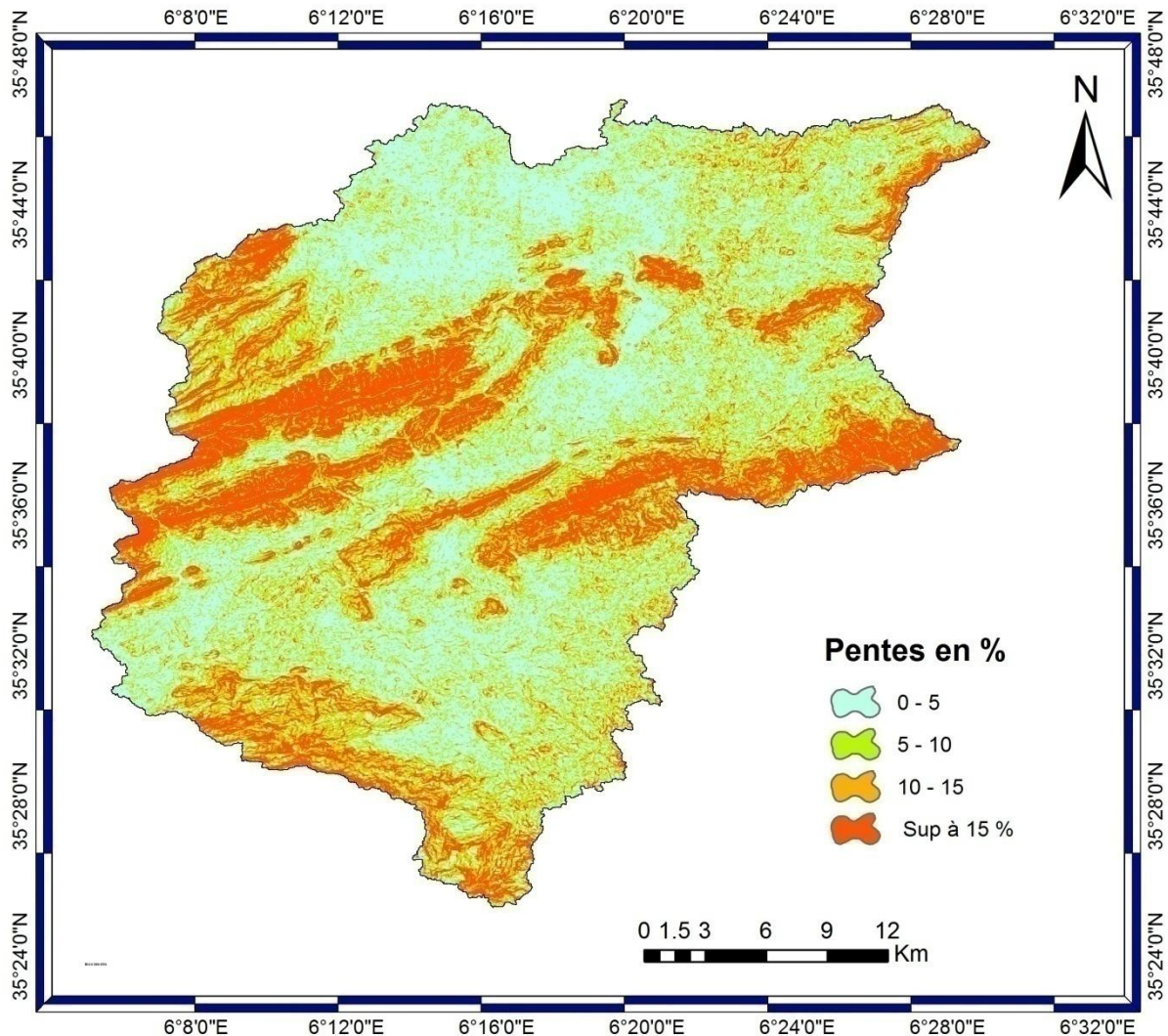
### 1.2.2. La carte des pentes :

La pente topographique influence puissamment l'importance et la gravité du ruissellement.

**Tableau 16.** Répartition Superficie / Pente.

Tranche de pente en %	Surface en Km <sup>2</sup>
0 – 5 %	268.38
5 – 10 %	257.38
10 – 15 %	119.46
Supérieur à 15 %	161.69

La tranche de pente faibles regroupe les zones dont les valeurs des pentes sont entre 0 et 5 %, les moyennes sont situées entre 5 et 10 %, les fortes se situent entre 10 et 15% et enfin les pentes très fortes sont ceux qui dépassent 15% qui caractérisent souvent un relief montueux.

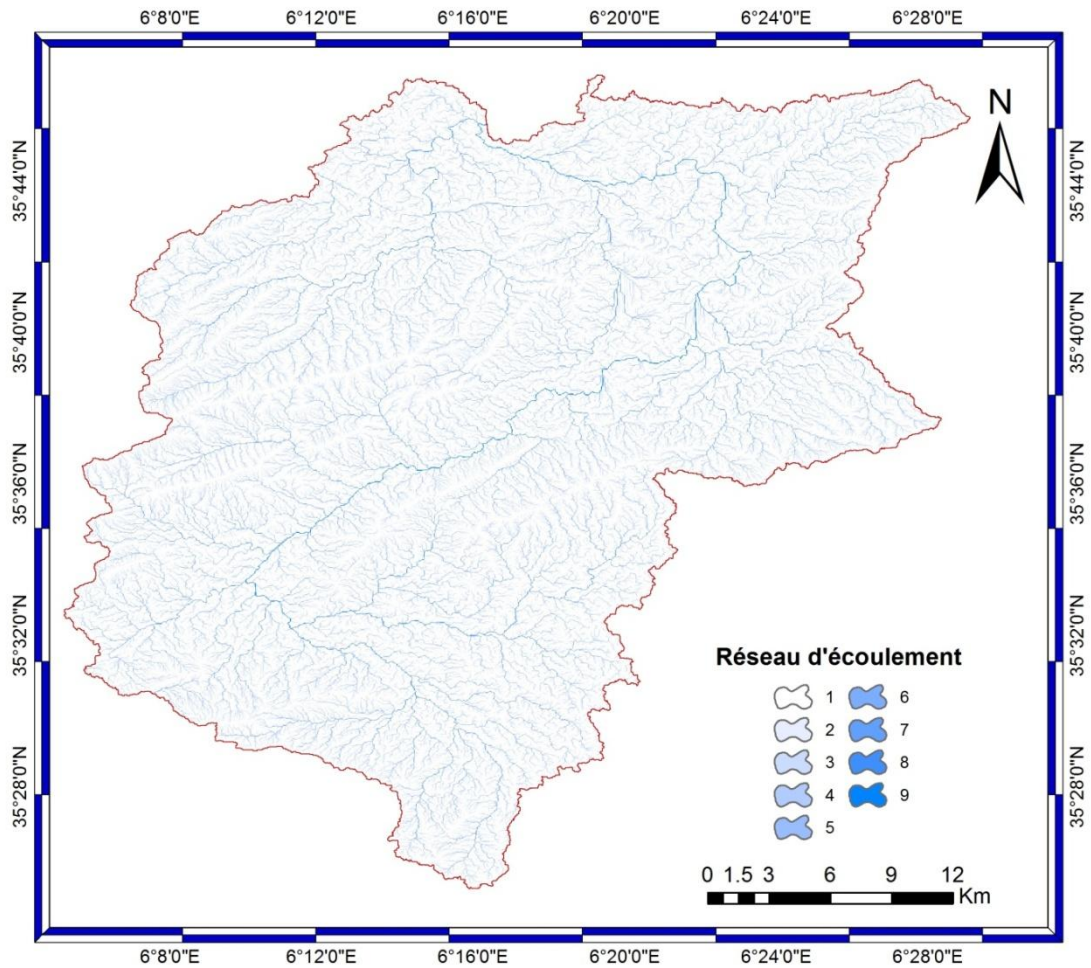


**Figure 40.** Carte des pentes en %.

### 1.3. Le réseau d'écoulement :

Le réseau d'écoulement ne possède aucune condition de qualification, il est construit à partir des données d'accumulation. Ce réseau constitue l'ensemble des drains qui convergent vers l'aval, les canaux, les fossés, les ravins et les cours d'eau.





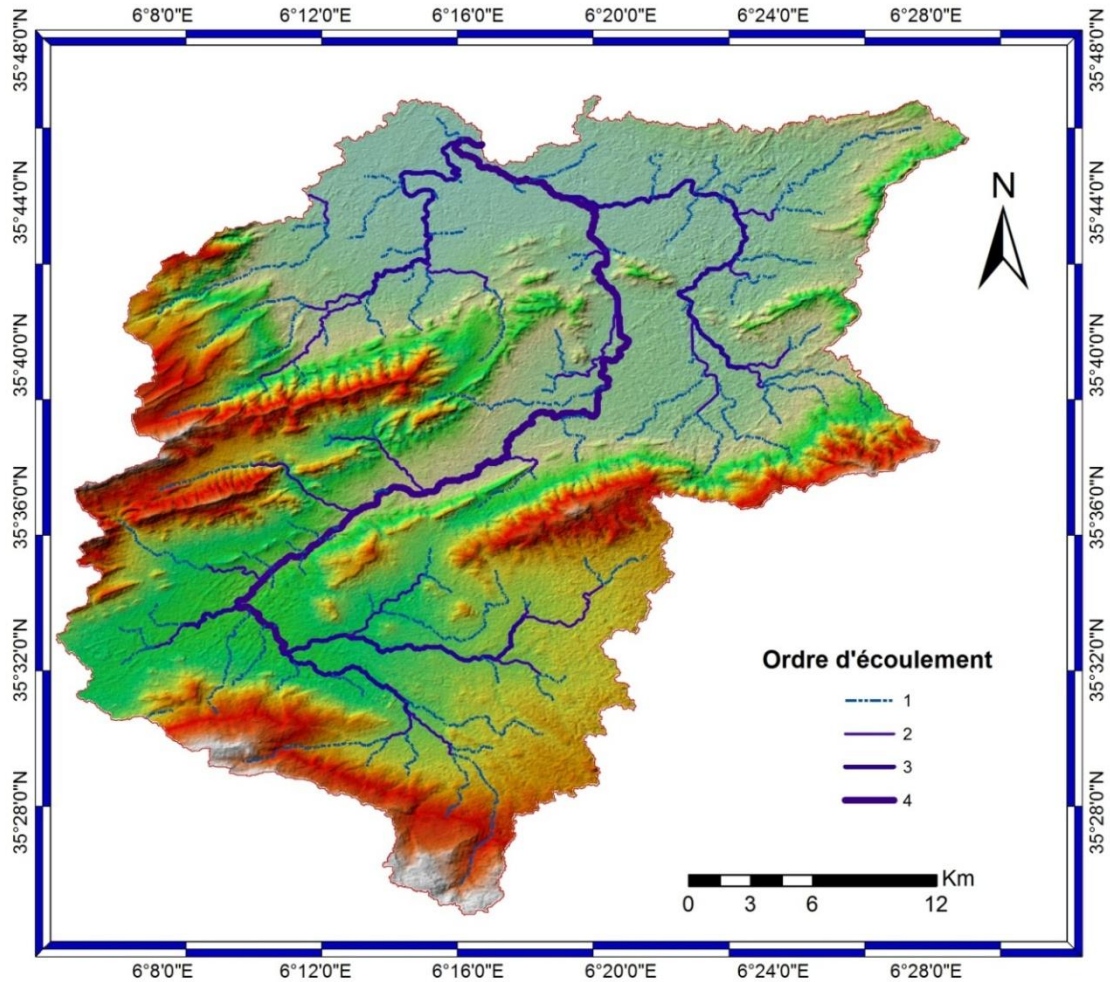
**Figure 41.** Carte du réseau d'écoulement.

### 1.3.1. Le réseau hydrographique :

Le développement du réseau hydrographique est lié à la nature lithologique des formations superficielles, la végétation, le climat et le type de relief en place (Beloulou, 2008).

La classification d'un réseau hydrographique est une hiérarchisation des éléments qui constituent ce réseau en donnant à chacun une valeur qui représente son importance.

Plusieurs types de classifications ont été élaborés et celle de STRAHLER est la plus utilisée. (Figure 42).



**Figure 42.** Classification du réseau hydrographique selon STRAHLER (1957).

#### 1.4. La densité de drainage :

La densité de drainage est la longueur totale du réseau hydrographique par unité de surface du bassin versant.

$$Dd = \frac{\sum L}{A} = 1041.93 / 807.68 = 1.29 \text{ km/km}^2$$

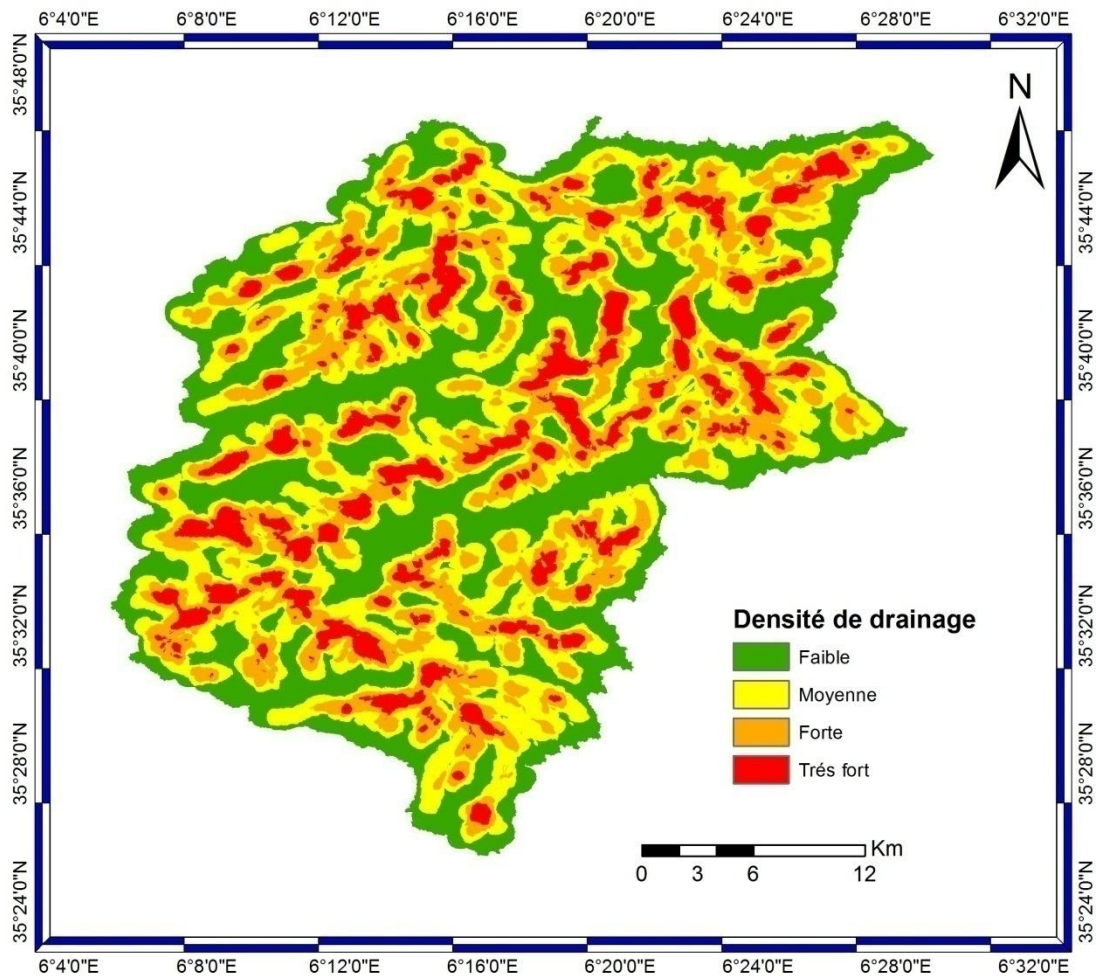
$D_d$  : densité de drainage en  $\text{km/km}^2$

L : longueur des cours d'eau en km

A : surface du bassin versant en  $\text{km}^2$

La densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie) des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatiques

et anthropiques. Selon Schumm, la valeur inverse de la densité de drainage,  $C=1/D_d$ , s'appelle : Constante de stabilité du cours d'eau (Bentekhici, 2006).



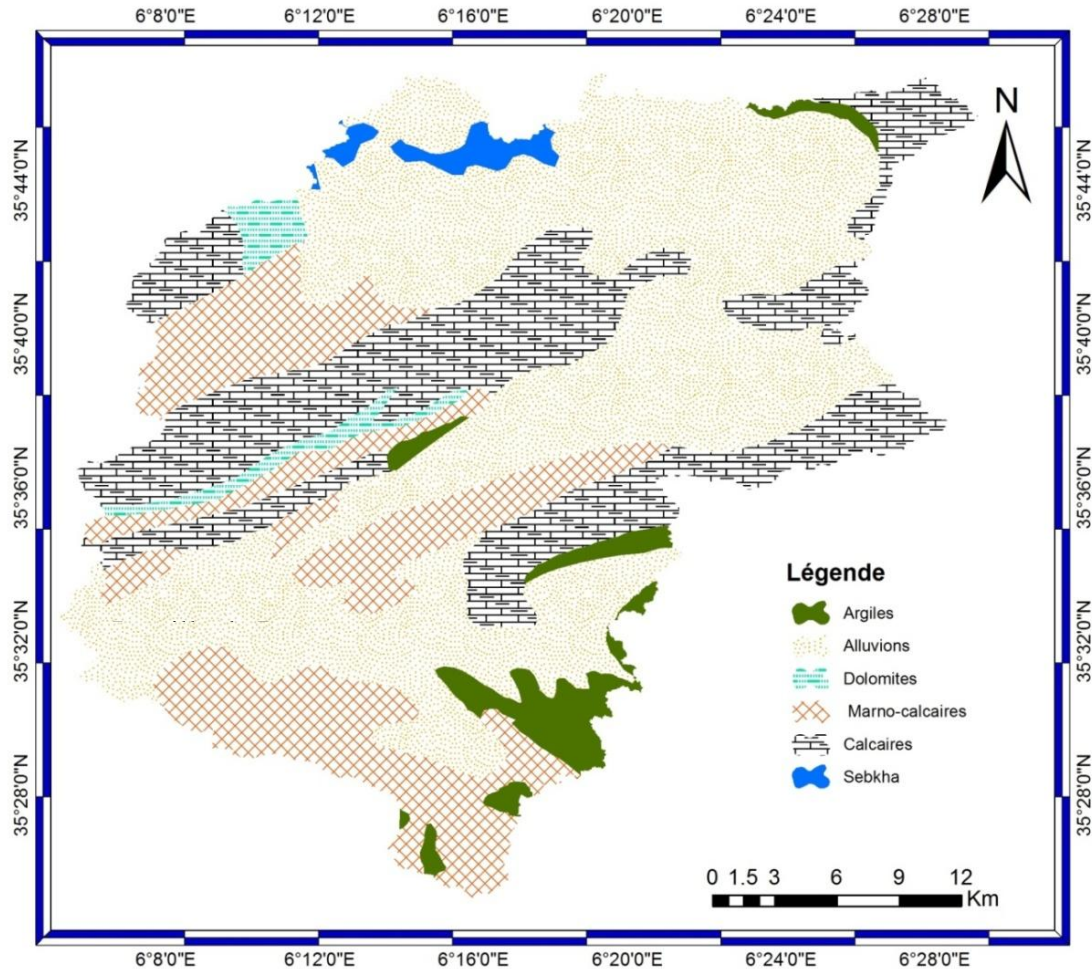
**Figure 43.** La densité de drainage.

### 1.5. La géologie :

L'impluvium de Batna fait partie des hauts plateaux constantinois de l'Est Algérien. La géologie de la région d'étude s'organise autour de l'évolution stratigraphique relativement simple, en effet le matériel rocheux affleurant débute par le trias en position diapirique se localisant essentiellement dans les montagnes qui entourent la ville de Batna.

Lui succède les termes de crétacé qui occupe les contours montagneux. Le miocène vient fossiliser le reste des formations en position de discordance avec un matériau des formes de calcaire et argile. Enfin le quaternaire dont le matériel est détritique et très varié allant des colluvions aux alluvions avec des textures très variées.

Cette répartition géologique s'articule sur l'espace géographique de l'impluvium avec des lithologies très variées présentant des résistances différentes et surtout des conditions de perméabilité différentes.



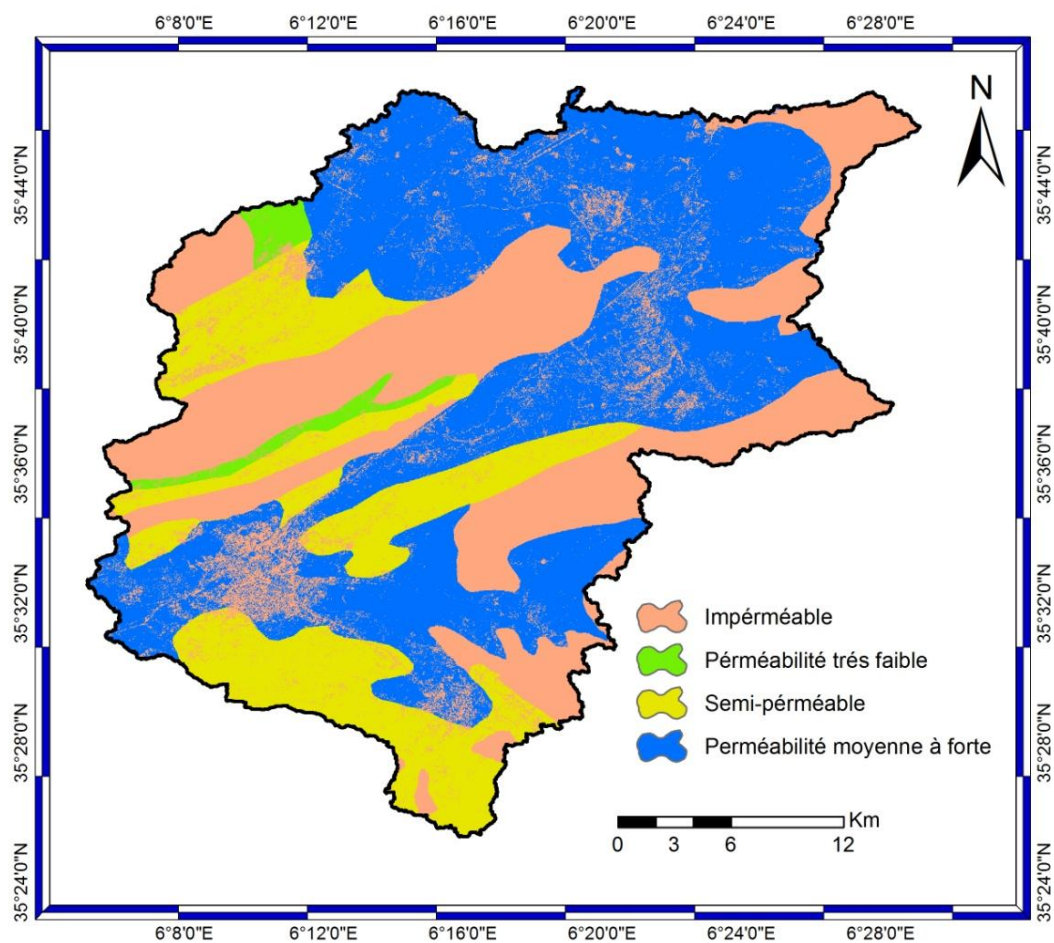
### 1.5.1. Carte de perméabilité :

Le degré de la perméabilité à une influence sur la gravité des inondations. Lorsque l'infiltration de l'eau dans un sol est durablement diminuée, le risque de ruissellement de surface est accru (Montoroi, 2012). La diminution de l'infiltration d'un sol est liée à son état de surface du sol et à sa morphologie interne (Casenave et al, 1989).

Sur la base d'une carte lithologique nous avons pu classer les sols d'après leurs perméabilités en quatre classes.

**Tableau 17.** Classes de perméabilité des sols.

Type du sol	Coefficient de Perméabilité (K) en m/s	Classes de perméabilité
Argiles	$10^{-8} - 10^{-9}$	Très faible perméabilité à imperméable
Marnes	$10^{-7} - 10^{-9}$	Perméabilité très faible
Dolomites	$10^{-5} - 10^{-7}$	Semi-perméable
Calcaire	$10^{-10} - 10^{-12}$	Imperméable
Marno-calcaire	$10^{-7} - 10^{-12}$	Imperméable
Alluvions	$10^{-1} - 10^{-4}$	Perméabilité moyenne à forte



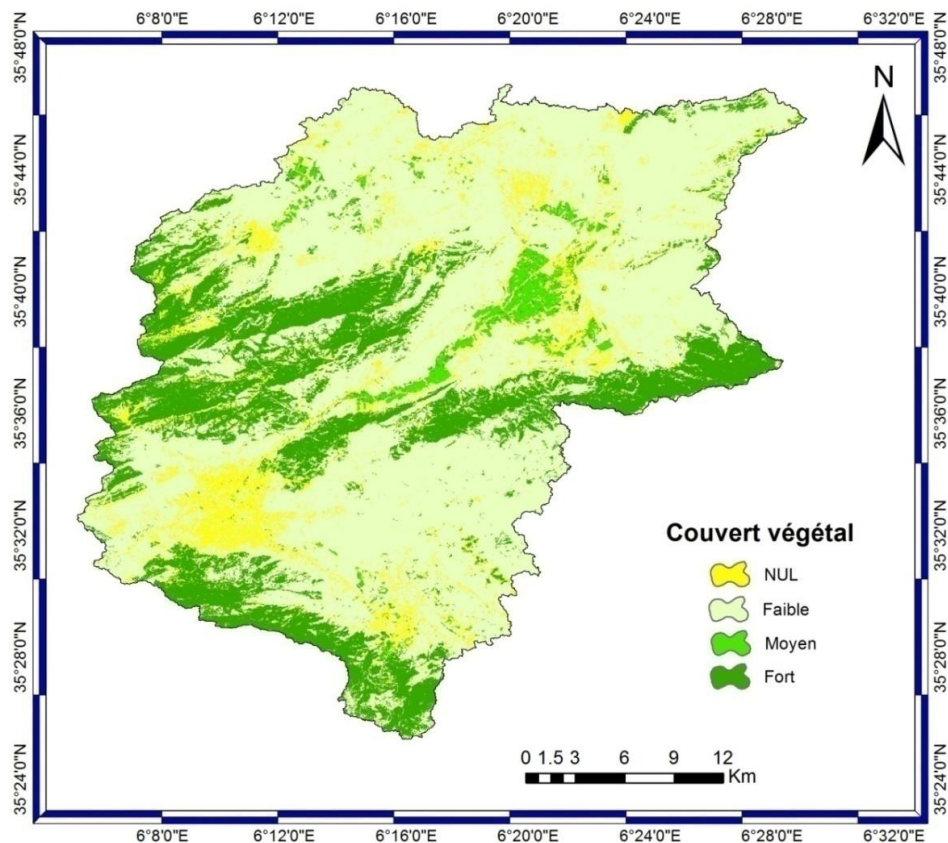
**Figure 45.** Carte de perméabilité du l'impluvium de Batna.

## 1.6. Le couvert végétal :

Le couvert végétal dans l'impluvium de Batna est dans un état de dégradation permanente, cette dégradation est due à plusieurs facteurs (naturels et/ou eutrophiques).

La figure 46, montre que plus de 60% de la superficie de l'impluvium représente des terrains nus et de faible couverture végétale. Cette perte alarmante du couvert végétal nécessite une intervention rapide et efficace.

La végétation joue un rôle important pour réduire le ruissellement, l'érosion, les glissements de terrain et les crues (Anh Tuan Luong, 2012). Le couvert végétal dense intervient sur le volume ruisselé et réduit la vitesse d'écoulement. Le couvert végétal dégradé constitue un facteur favorable pour les écoulements de surface et favorise la réponse hydrologique du bassin versant. Le ruissellement est fortement accentué pour des sols nus ou présentant un couvert végétal épars (Montoroi, 2012).



**Figure 46.** Carte du couvert végétal du l'impluvium de Batna.

**Source:** Image Land Sat L8, 2016.

**Conclusion :**

La connaissance précise des caractéristiques physiques de la zone d'étude constitue une étape incontournable dans l'étude de l'aléa inondations.

La méthode de l'analyse multicritère hiérarchique a présenté une fiabilité dans la délimitation de l'aléa inondation par la pondération accordé à chaque critère intervenant dans l'analyse ou plusieurs zones se situent dans un aléa important, (la ville de Batna, Tazoult, la plaine de Fésdis et celle de Gadaine) et sa revient principalement à la nature et la forme des caractéristiques physiques qui ont une influence importante sur les écoulements notamment la pente très faible (0 à 3 %) et les caractéristiques du réseau hydrographique liés à la densité de drainage ce qui favorisent fortement la durée de submersion.

**CHAPITRE VI**

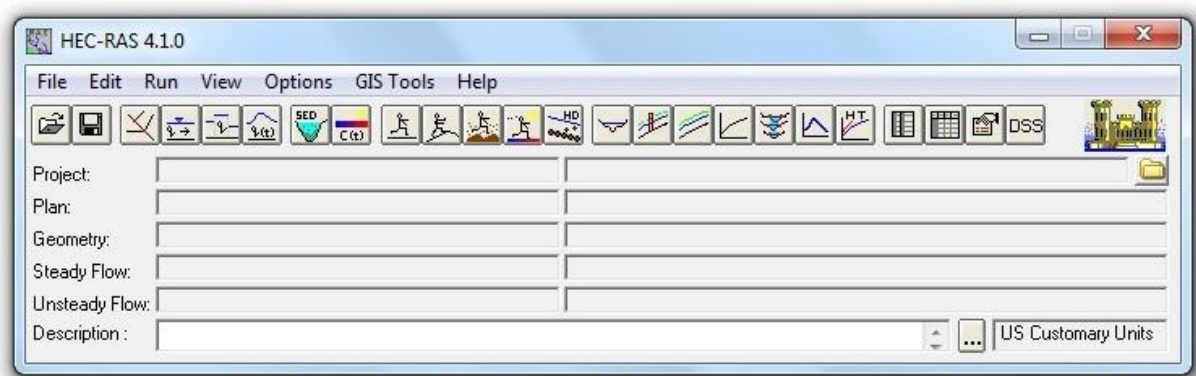
**ETUDE HYDRAULIQUE.**



## Introduction :

L'augmentation des dommages est rarement liée à l'aménagement global du bassin versant, par contre une part importante des dommages peut être attribuée directement à la modification de l'occupation du sol dans les zones inondables des plaines et des vallées (Kreis, 2004). La ville de Batna a connu des épisodes pluvieux qui ont généré des crues importantes dont les conséquences ont tristement marquées les esprits. C'est pourquoi les aménagements de recouvrement des canaux, qui ont été réalisés pour assurer la protection de la ville contre les inondations, auront inévitablement des répercussions sur les conditions d'écoulement et les risques qui pourraient en découler.

Afin d'évaluer l'impact de ces changements, nous avons procédé à l'implémentation d'une base de données SIG qui nous a permis d'effectuer une analyse spatiale de l'étendue du risque d'inondation en y intégrant un programme de modélisation hydraulique à différentes fréquences HEC-RAS.



**Figure 51.** La fenêtre principale du logiciel HEC-RAS.

Les dommages aux biens surviennent lorsque l'occupation du sol en zone inondable n'est pas adaptée aux submersions (Kreis, 2004).

L'objectif de ce chapitre est d'établir une cartographie de l'étendue des inondations dues au débordement des cours d'eau traversant la ville de Batna, en mettant en évidence par la même occasion le déficit probable en dimensionnements des ouvrages imputable aux aménagements réalisés nécessaire à l'évaluation du niveau du risque.

Cette approche nécessite une analyse fine basée sur une modélisation dans le cadre d'une base de données SIG sous ARC Gis et ses extensions et un logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS.

Notre étude est basée sur les données des débits max en m<sup>3</sup>/s pour chaque cours d'eau et pour différentes périodes de retours.

Selon la formule de Manning-Strickler nous avons pu calculer le  $Q_{\max}$  du canal de déviation pour le sous bassin de Tazoult.

$$Q = R. S. K^{2/3} i^{1/2}$$

**K** : Coefficient de rugosité (ou de Strickler) = 40

**S** = B.H (Section mouillée). **R** : rayon hydraulique = (B.H)/ (B+2H).

**B** : largeur du canal= 4 m et **H** : Hauteur du canal= 2.2 m.

**P** : Pente = 0.0072

Donc  $Q_{\max} = 32.76 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### **1. La modélisation hydraulique sous HEC RAS :**

Nous avons utilisé la version HEC RAS 4.1.0, un logiciel conçu par (Hydrologic Engineering Centre de l'U.S. Army Corps of Engineers) et développé par le centre de l'ingénierie hydrologique de l'armée américaine (US Army Corps of Engineers, 2010). C'est un outil de modélisation hydraulique des écoulements graduellement variés et à surface libre sous le modèle 1D du Saint- Venant (Hervouet, 2003) et servant également à calculer la ligne d'eau. Il résout l'équation de l'énergie unidimensionnelle, les pertes étant évaluées par la formule de frottement au fond de Manning-Strickler et par des formules de contraction/expansion de l'écoulement (Yahiaoui, 2012).

Un autre outil principal utilisé est le SIG à travers le logiciel ARC Gis 10.0 de gestion de l'information dans l'espace géographique de l'institut ESRI. (Environmental Systems Research Institute). Ceci avec l'extension HEC-GEORAS soit pour la préparation des données à exporter vers HEC-RAS soit pour l'exploitation des résultats de la simulation dans

un environnement SIG (Debiane et al, 2010). HEC-GEORAS est un ensemble d'utilitaires sous forme d'une interface d'utilisateur graphique qui facilite la création d'une série de thèmes pertinents pour l'élaboration de données géométriques et le traitement des données géo-spatiales sous ARC Gis.

La création d'un TIN (Triangular Irregular Network) ou réseau de triangles irréguliers, un format indispensable et beaucoup plus adapté à la modélisation hydraulique sous Arc GIS en utilisant la boîte à outils 3D Analyst, à partir d'un DEM (Digital Elevation Model) de résolution de 30 m constitue la première étape. L'identification de la géométrie des cours d'eau est aussi nécessaire notamment l'écoulement central, le lit mineur, le lit majeur et les profils en travers (sections transversales).

A noter que les ouvrages d'arts (ponts) situés sur les cours d'eau ont été modélisés et ne sont pas présentés pour ne pas combler la carte. En outre, une carte d'occupation du sol a été intégrée sous forme de coefficient de Manning qui représente la rugosité des lits, à savoir la nature et le type du sol.

**Tableau 38.** Les valeurs utilisées du coefficient de Manning selon la nature du sol.

Nature du lit	Coefficient de Manning
Lits bétonnés	0.014
Lits naturels lisses	0.020
Lits naturels	0.030
Lits naturels avec végétation	0.050

Les sections des cours d'eau, les sections des canaux et la carte d'occupation des sols ont été réalisés suivant une enquête sur terrain sous forme de visites pour les zones ouvertes avec un GPS, une exploitation de données issues d'une image satellitaire de Google Earth et ainsi qu'une carte topographique de la ville de Batna pour les zones inaccessibles.

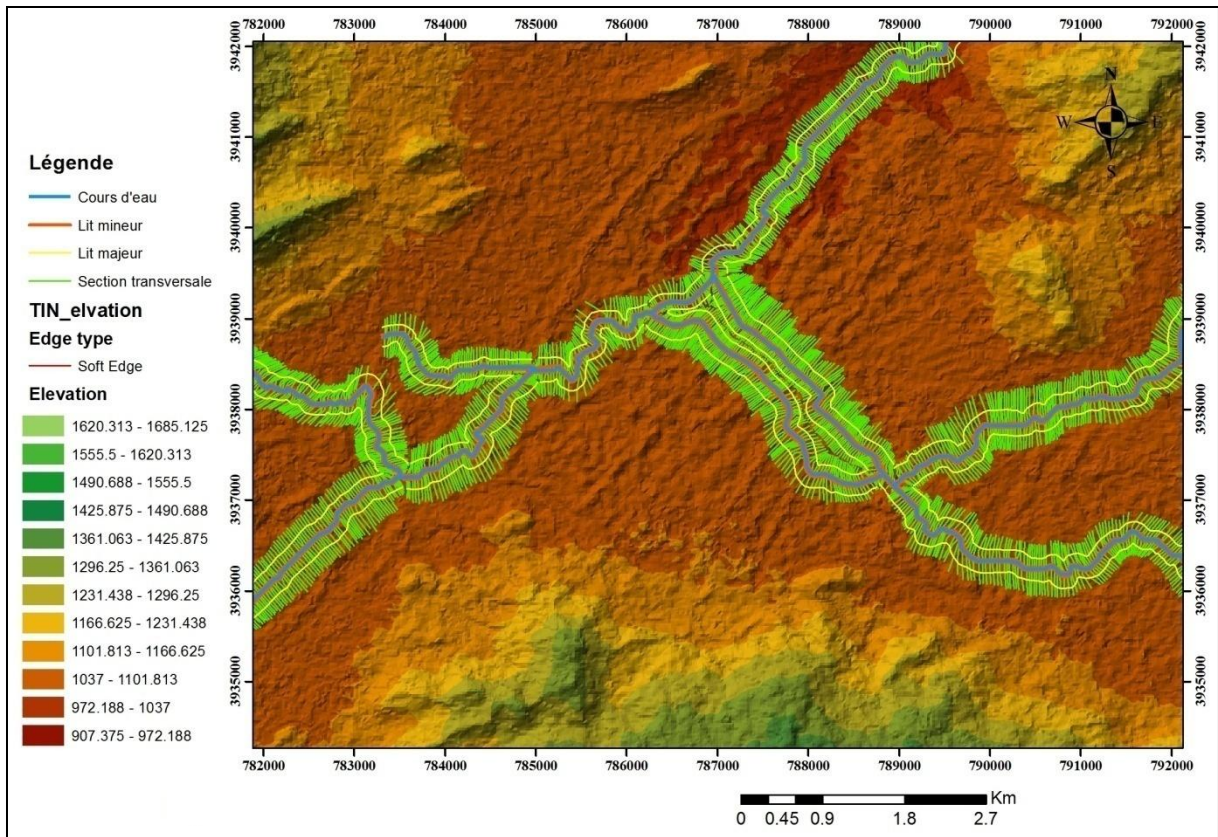


Figure 52. Les entités modélisées sous ARC GIS.

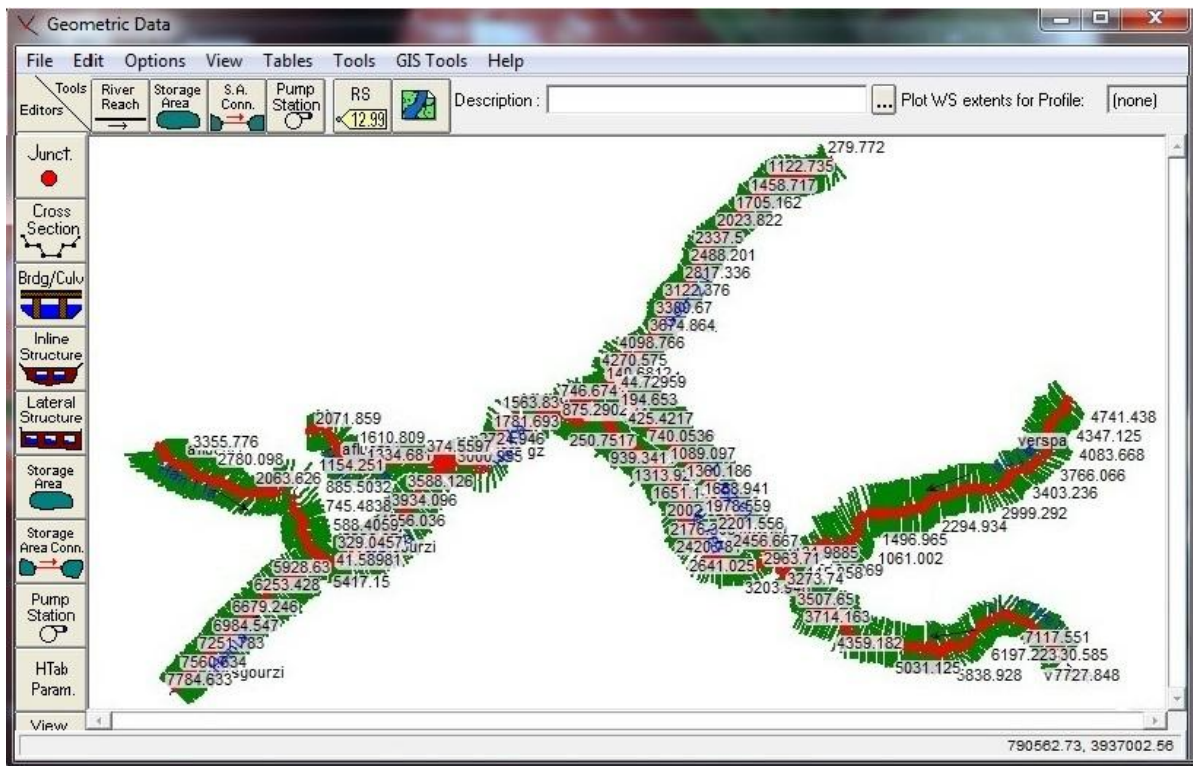


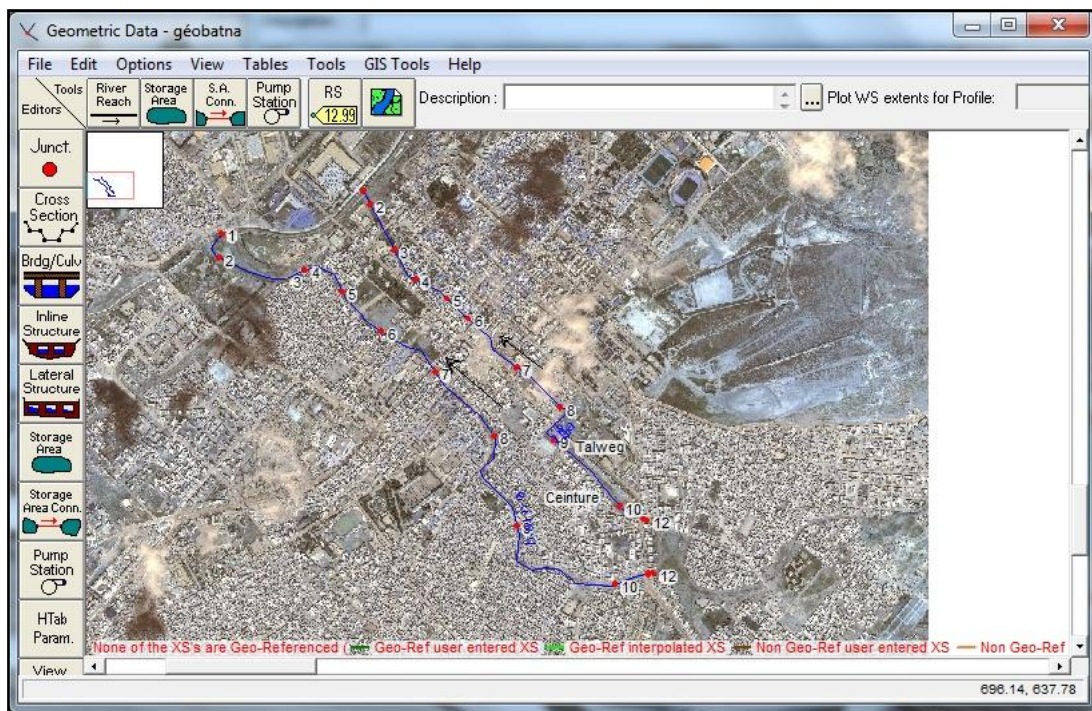
Figure 53. Les entités modélisées sous HEC Ras.

L'extension HEC-GEORAS permet aussi l'extraction de la topographie de toutes les entités réalisées et leur exportation vers le logiciel HEC-RAS qui assure la simulation hydraulique afin d'intégrer les débits de différentes fréquences pour chaque cours d'eau et les conditions aux limites pour chaque tronçon sous forme d'une pente normale. Les résultats de la simulation ont été reportés vers l'ARC GIS pour leur représentation sous forme cartographique.

L'intégration de la technologie HEC-RAS (Système d'analyse hydrologique Ingénierie rivière Centers) et SIG (Système d'Information Géographique) pour obtenir scientifiquement des informations a été spécifié comme efficace dans la simulation, dans l'identification et dans l'analyse des crues dans un environnement géo-spatial (Sam et al, 2002).

Le canal Ceinture est depuis le réservoir de Parc à fourrage ▼1047 jusqu'à Oued El Gourzi ▼ 1023, avec une longueur de 3179 m, une pente moyenne du fond est approximativement de 0,0075 (7.5‰) et une rugosité de 0.014.

Le canal Talweg est depuis le réservoir de Parc à fourrage 1044.69▼ jusqu'à Oued El Gourzi ▼ 1022.29, avec une longueur de 2693 m, une pente moyenne du fond est approximativement de 0,0082 (8.2‰) et une rugosité de 0.014.



**Figure 54.** La fenêtre des données géométriques du logiciel HEC ras.

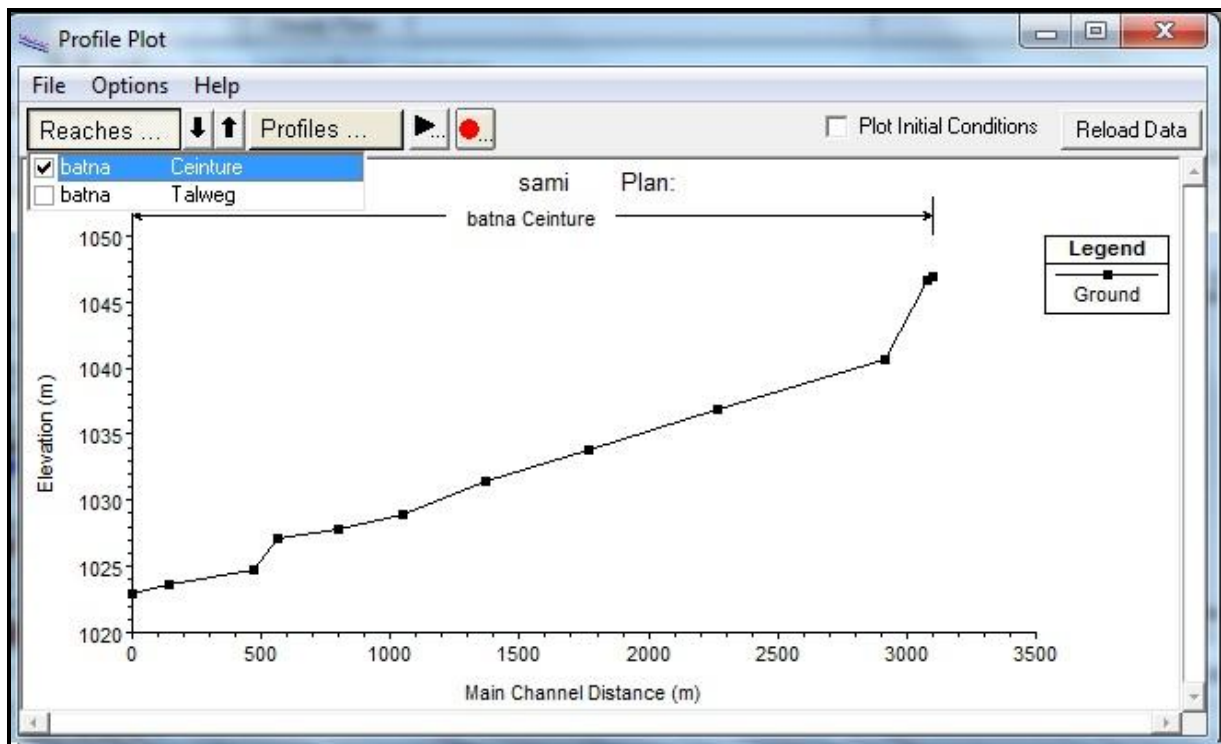


Figure 55. Le profil transversal du canal Ceinture.

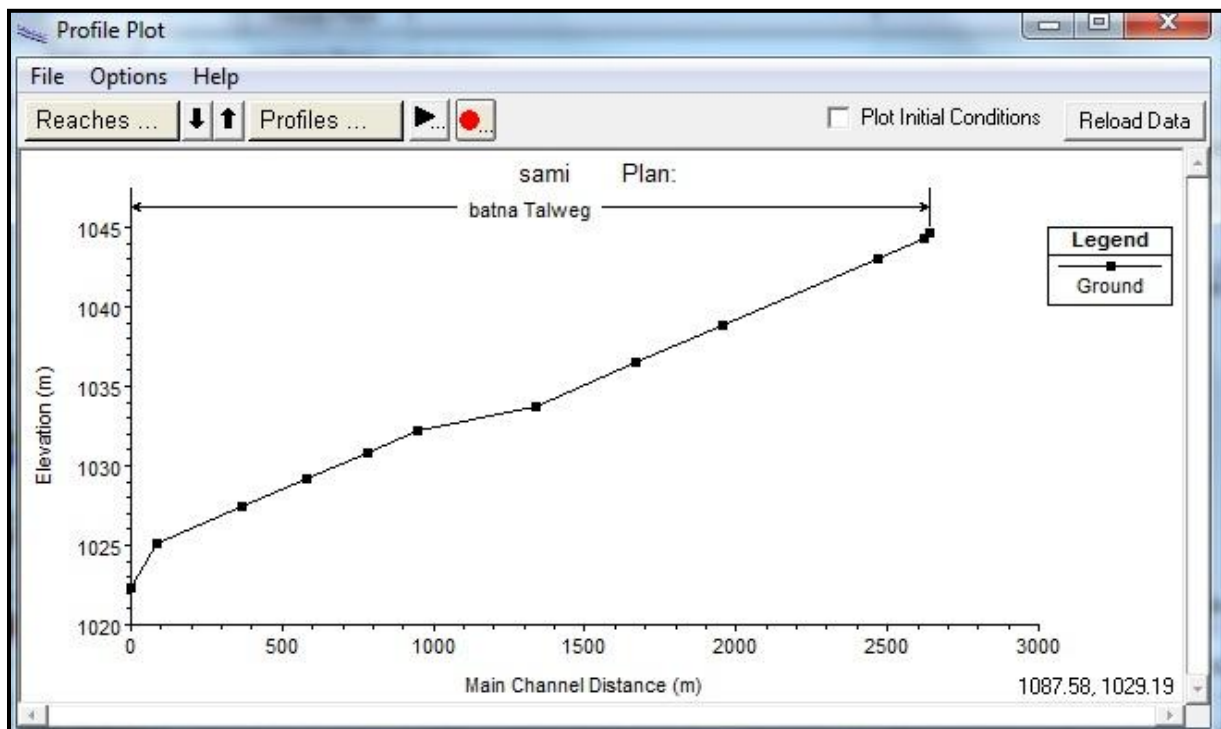
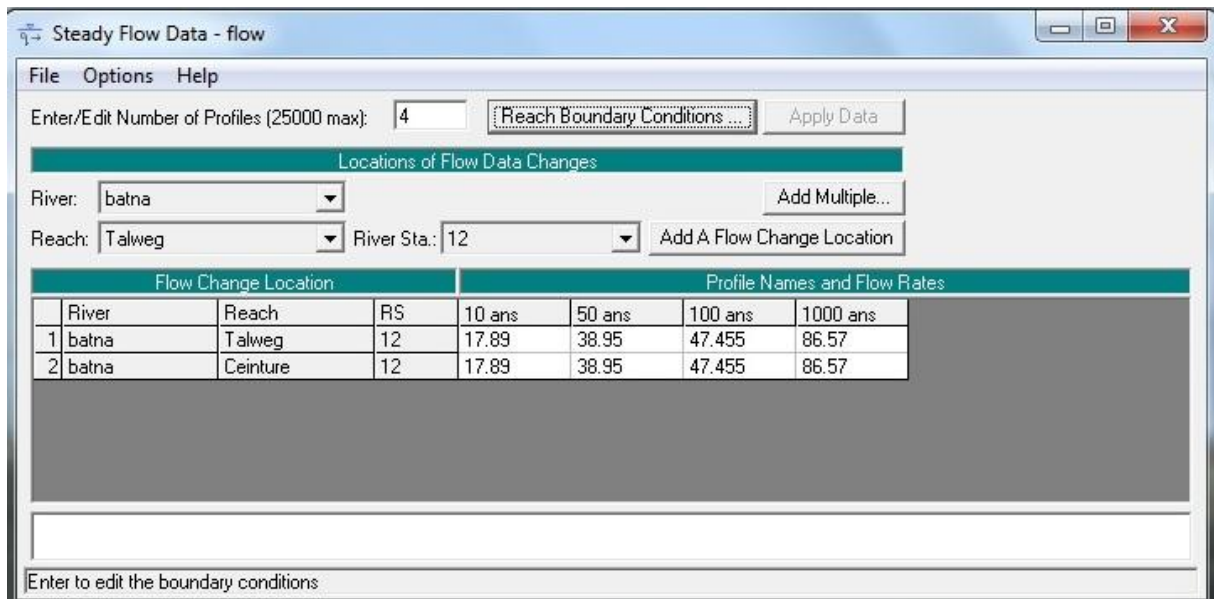


Figure 56. Le profil transversal du canal Talweg.

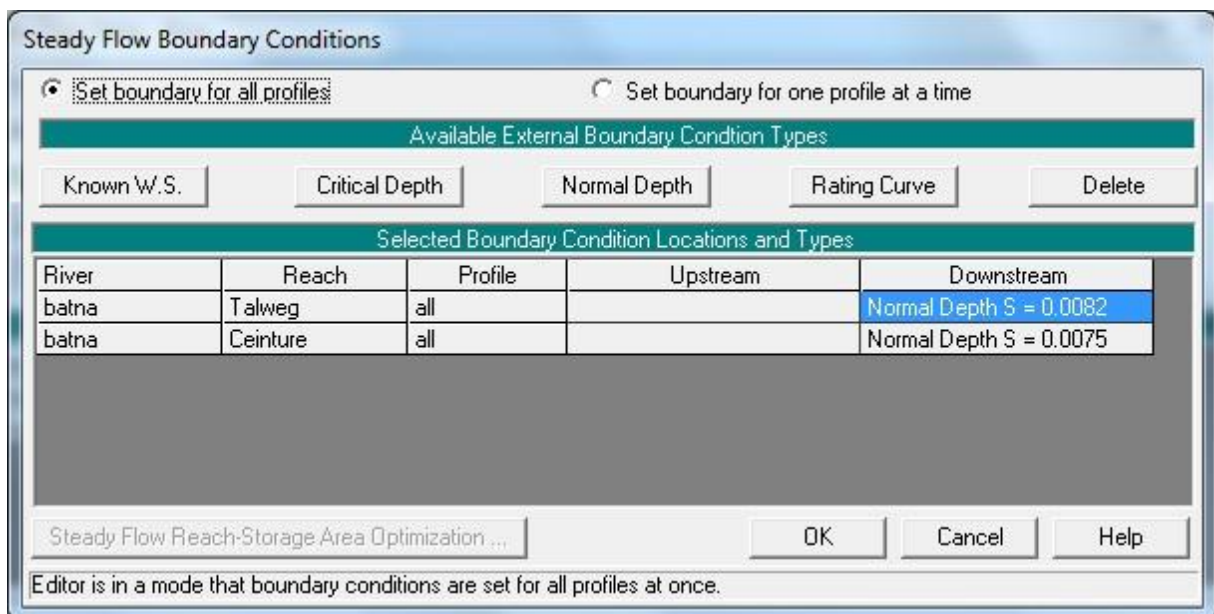
L'intégration des débits pour différentes périodes de retours aux cases correspondantes pour chaque canal, Figure 57. Les débits sont considérés constants au long du canal.



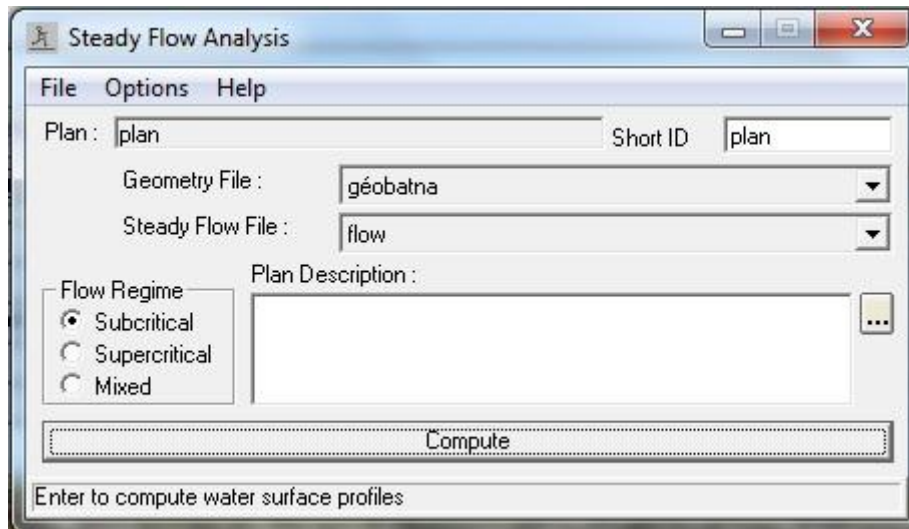
**Figure 57.** Intégration des débits pour chaque canal et pour différentes période de retours.

La définition des conditions aux limites est aussi nécessaire selon le régime d'écoulement.

Dans notre cas nous avons introduit les conditions aux limites sous forme d'une pente normale en aval, Figure 56.



**Figure 58.** Conditions aux limites pour chaque canal.

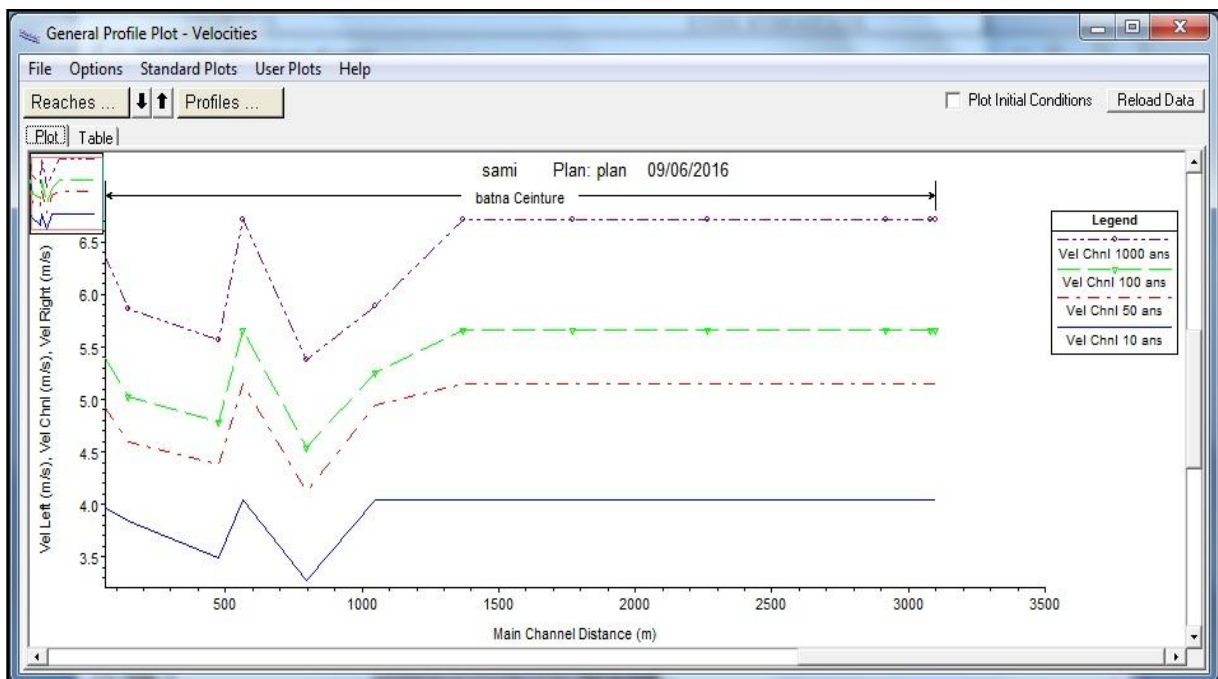


**Figure 59.** Le choix du régime d'écoulement.

Pour un régime d'écoulement fluvial (SUBCRITICAL) une condition en aval est suffisante.

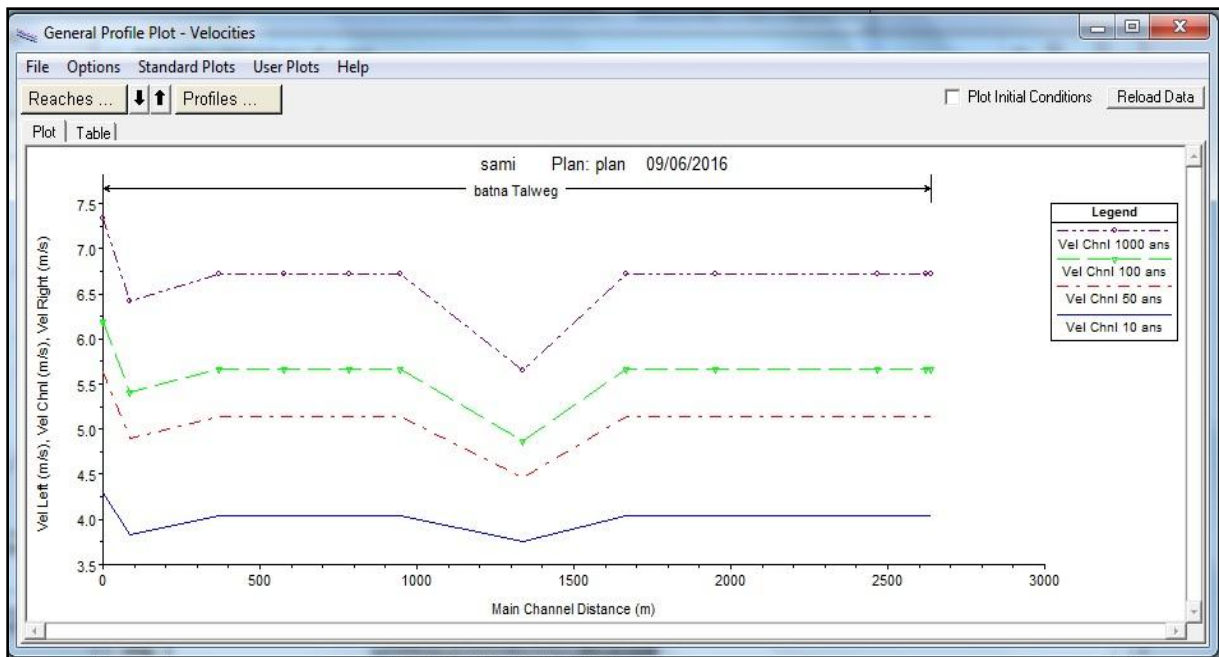
Pour un régime d'écoulement torrentiel (SUPRCRITICAL) une condition en amont est suffisante et pour un régime d'écoulement mixte les deux conditions sont nécessaires.

Après la définition de la géométrie, les données des débits max et les conditions aux limites, nous choisis la nature d'écoulement et nous avons passé à la simulation hydraulique.



**Figure 60.** La vitesse d'écoulement en m/s (canal ceinture).





**Figure 61.** La vitesse d'écoulement en m/s (canal Talweg).

La fenêtre GENERAL PROFIL PLOTE VELOCITIES présente le changement de la vitesse d'écoulement au long des canaux.

La simulation montre que le canal Talweg et le canal Ceinture avec leurs dimensions peuvent recevoir les débits correspondant à une période de retour décennale, mais ils ne peuvent répondre aux débits de récurrences supérieures.

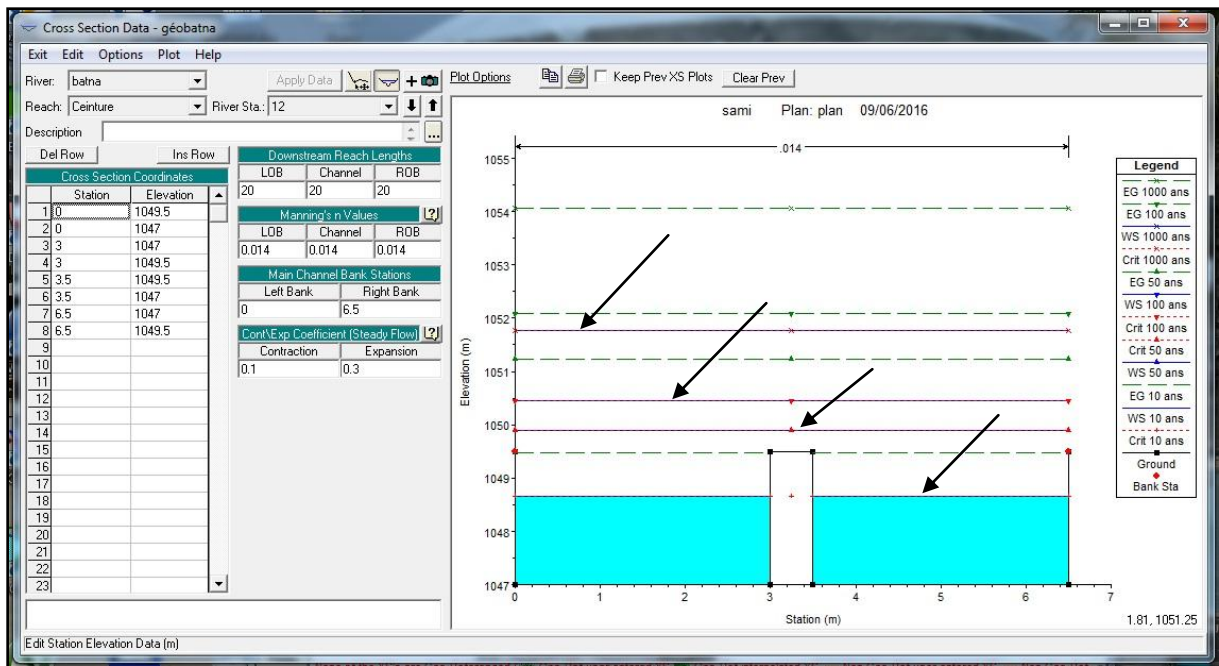


Figure 62. Résultats de simulation à l'entrée du canal Ceinture.

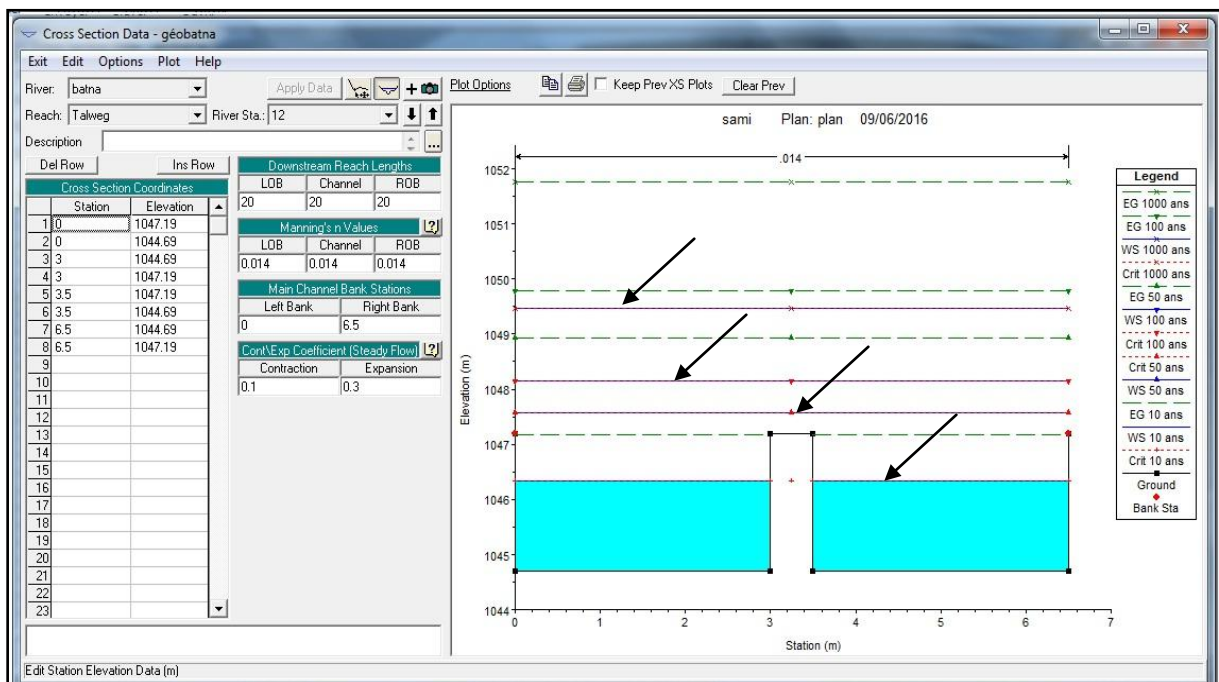


Figure 63. Résultats de simulation à l'entrée du canal Talweg.

Ce qui montre clairement que l'ouvrage n'est pas apte à contenir des débits de fréquences rares et cela revient essentiellement à la forme des canaux (galeries à double orifice) qui ont pour objet de pouvoir supporter les charges mobiles des véhicules sans prendre en compte la

section optimale d'écoulement ni la surface d'écoulement qui exerce une contrainte de frottement.

Par ailleurs les dispositifs morphologiques en amont ne peuvent pas envisager des ouvrages d'écrêtement pouvant assurer le laminage des débits extrêmes, ce qui met la ville de Batna sous l'effet d'un risque résiduel permanent.

L'effet pervers de ces ouvrages de protections est de procurer un faux sentiment de sécurité aux riverains. En effet, ils ne sont plus inondés par les crues les plus fréquentes et ainsi ils perdent la culture du risque. Par ailleurs, ils n'ont pas non plus conscience du risque résiduel qui subsiste malgré la protection (Kreis, 2004).

Le tableau représente la comparaison entre les quatre simulations de crue

**Tableau 39.** Résultat de simulation par plusieurs scénarios.

Simulation de crue	Hauteur d'eau en m	Surface touchée en km <sup>2</sup>
Décennale	6.7	1.8904
Cinquantennale	8.2	3.1535
Centennale	10.2	4.4803
Millénaire	13.2	6.5038

La simulation montre que la surface inondable s'agrandit en fonction de la récurrence, celle-ci passe de décennale jusqu'à la crue millénaire en arrivant à un étendue de 6.5038 km<sup>2</sup> et avec une hauteur d'eau de 13,2 m, tableau 38. La cartographie permet d'effectuer une comparaison des résultats du modèle hydraulique avec la topographie du site, facilitant ainsi une visualisation optimale des contours des zones inondables et les enjeux socio-économiques impliqués. (Bachir et al ,2012). De ce fait, ce modèle peut intervenir pour mettre en œuvre des actions de protection répondant aux processus de la dynamique fluviale.

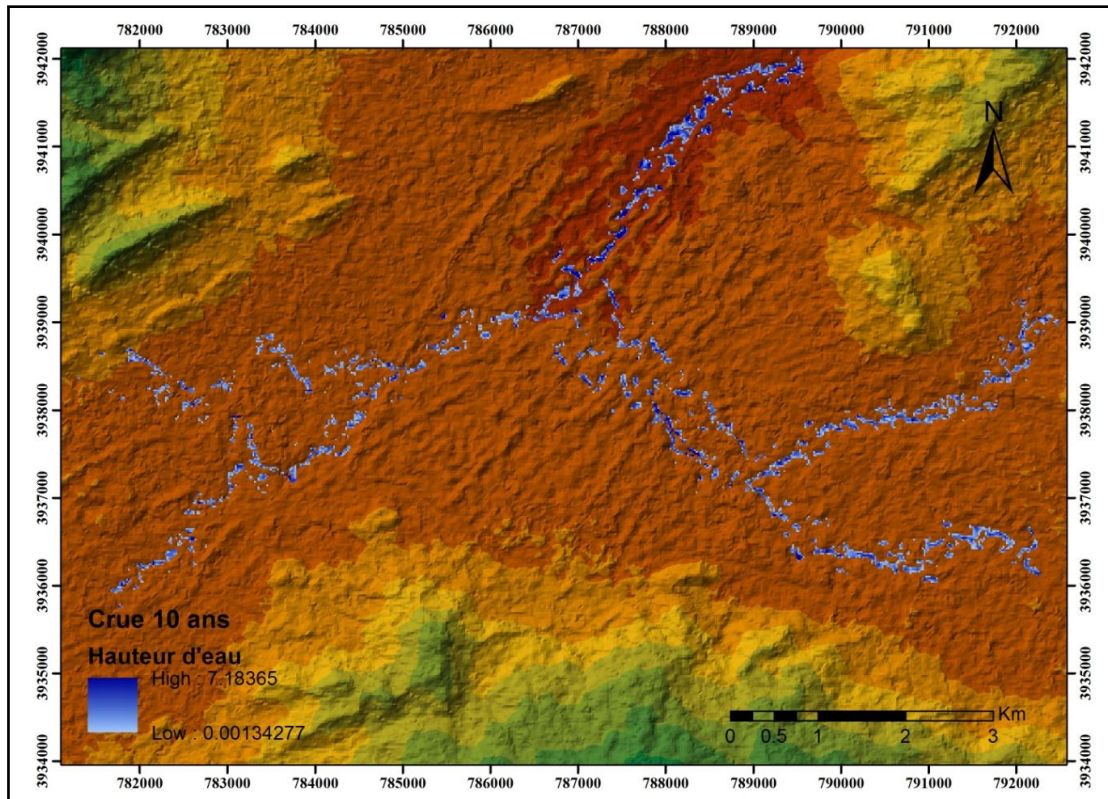


Figure 64. La simulation de la crue décennale

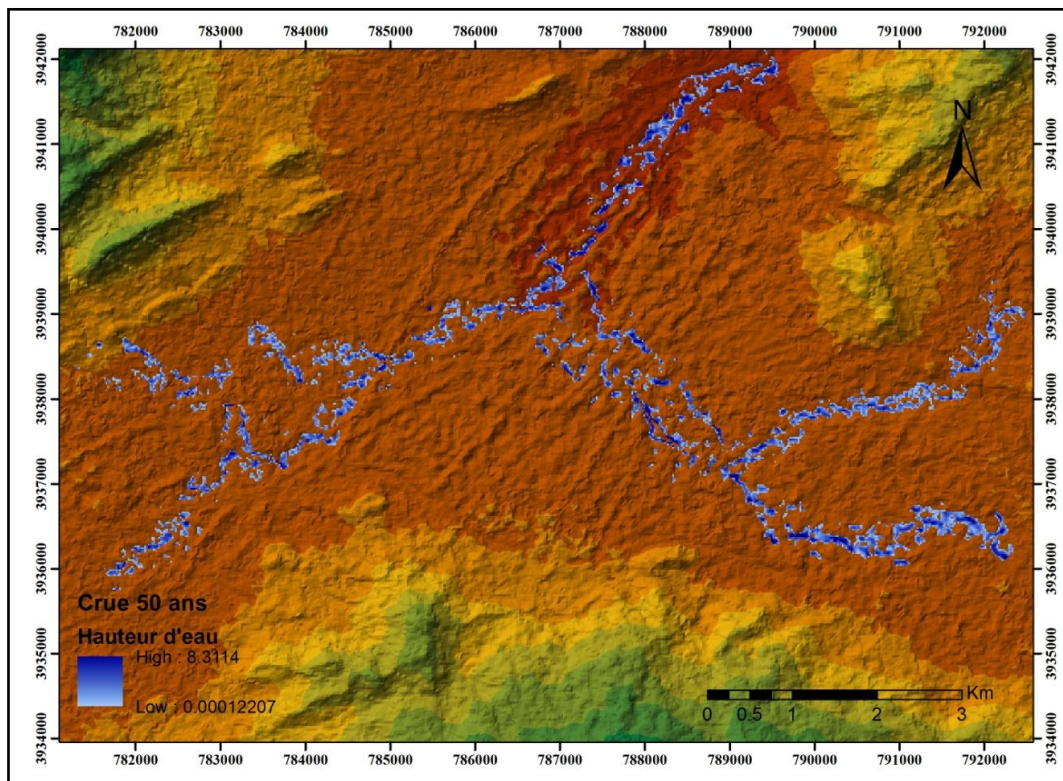


Figure 65. La simulation de la crue cinquantennale.

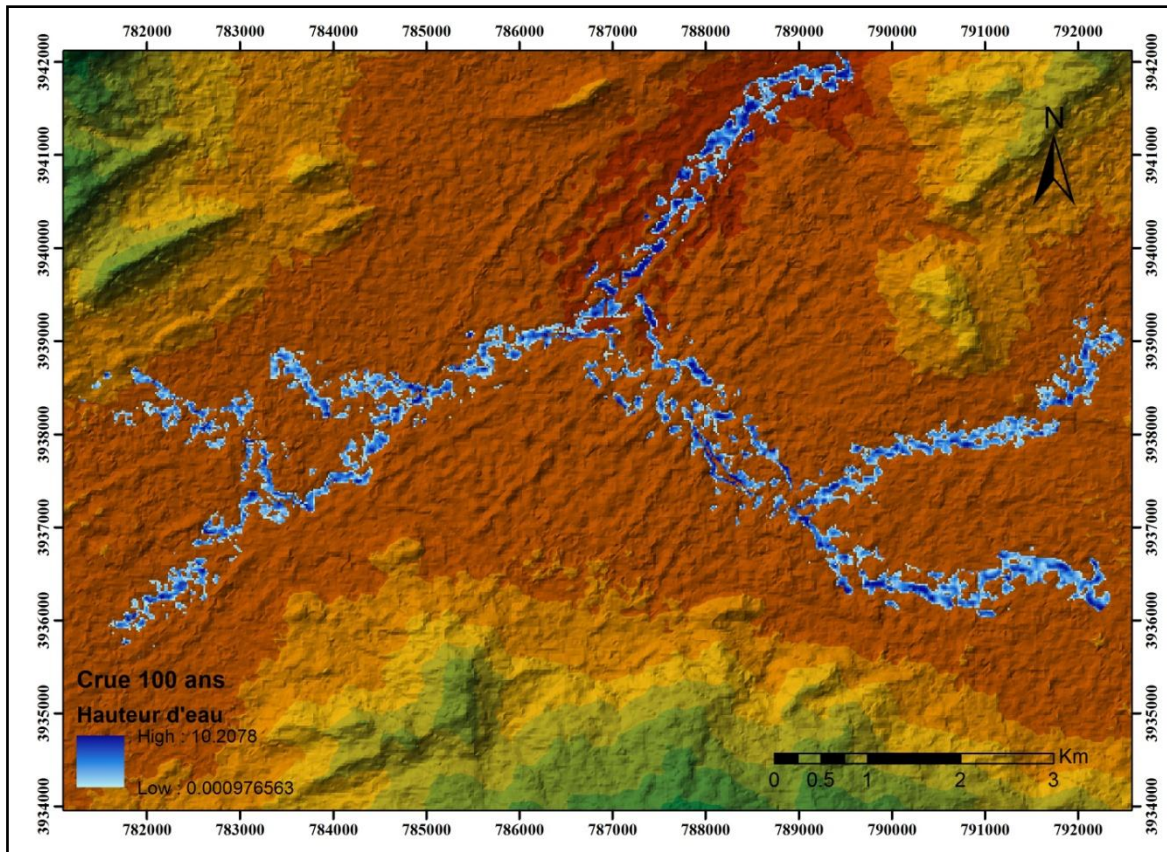


Figure 66. La simulation de la crue centennale.

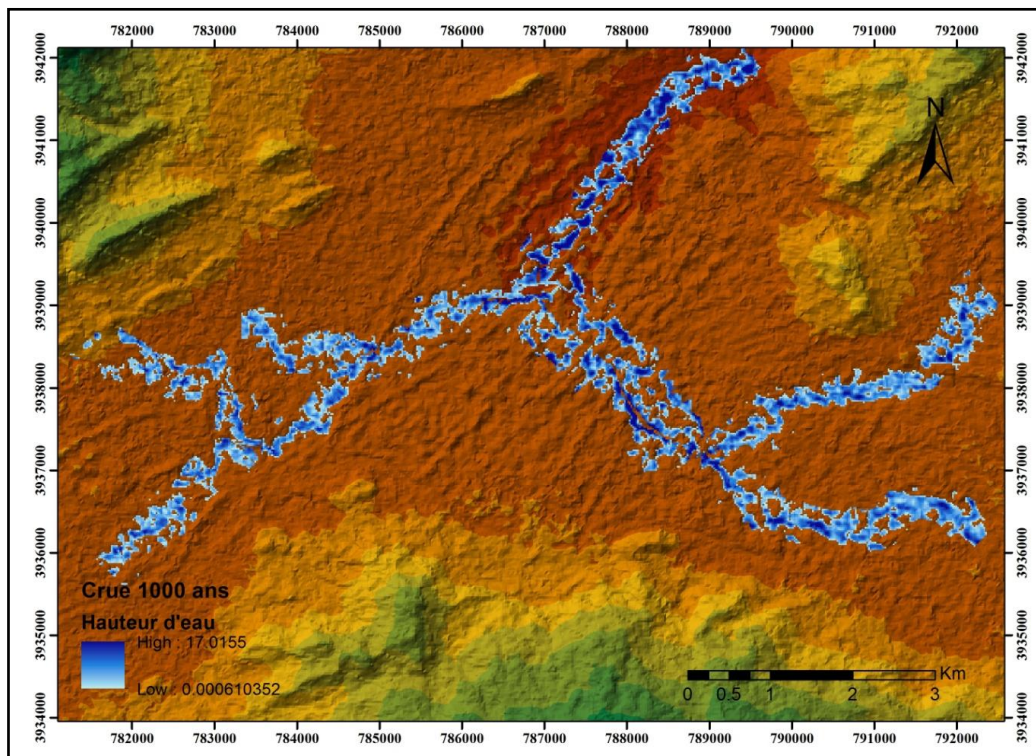


Figure 67. La simulation de la crue millénaire.

La simulation hydraulique montre que les surfaces inondables s'agrandissent selon la récurrence du phénomène en arrivant à un étendue de 6.5038 km<sup>2</sup> et avec une hauteur d'eau de 13,2 m pour une crue millénaire.

Et comme les catastrophes naturelles se font plus sentir dans les pays du tiers monde, une étude préventive plus fine est indispensable pour augmenter le niveau de la résilience et atténuer les effets d'un risque majeur au niveau de cette ville. La disponibilité des données joue un rôle très important dans le choix et l'efficacité de l'approche méthodologique utilisée.

En s'appuyant sur les résultats de cette analyse, les responsables de cette ville peuvent disposer de données pertinentes, telles que l'étendue de la crue et le niveau de submersion, nécessaires à l'évaluation du niveau du risque.

### **Conclusion :**

Le recours au SIG et au logiciel de simulation, qui sont des outils pertinents dans la spatialisation de l'inondation et la connaissance de la hauteur de submersion, permet d'établir une stratégie de faire face à la dynamique fluviale et les dommages qui peuvent en découler.

Les résultats de la simulation hydraulique montrent que les surfaces susceptibles d'être inondées s'agrandissent en fonction de la récurrence en arrivant à un étendue de 6.5038 km<sup>2</sup> et avec une hauteur d'eau de 13,2 m pour une crue millénaire.

Les aménagements non adaptés de l'espace urbain jouent inévitablement un rôle aggravant ce qui augmente la brutalité et le coût des dommages dans l'éventualité de survenance d'une crue à fréquence rare.

La modélisation hydraulique avec cette technique a montré une efficacité et une efficience dans le diagnostic du risque liée au débordement des cours d'eau selon plusieurs auteurs et chercheurs. Par ailleurs une connaissance plus précise des données socioéconomiques territoriales contribuera à appréhender ce risque de façon plus efficace.

## **CHAPITRE V**

### **ANALYSE DE LA VULNERABILITE ET DE SYNTHESE**

## **1. Analyse de la vulnérabilité :**

La vulnérabilité exprime l'importance des dommages potentiellement subits par des enjeux soumis à un aléa d'intensité donnée. La notion d'enjeu intègre les personnes, les biens et les activités susceptibles d'être affectés par l'aléa. (Hostache, 2006). Elle est la sensibilité des populations et des activités localisées dans une zone exposée à un aléa (Lacina, 2012). Selon Leone et Vinet, (2006) La vulnérabilité est une propension à l'endommagement ou au dysfonctionnement de différents éléments exposés (biens, personnes, activités, fonctions, systèmes) constitutifs d'un territoire et d'une société donnés.

Les principaux dommages directs causés par l'aléa inondation sont les dommages aux personnes, aux bâtis, aux activités socioéconomiques et à l'environnement.

Dans ce cas notre méthode fait appel à une analyse multicritère, cette analyse évalue l'impact d'un phénomène selon plusieurs critères, ces derniers doivent être inscrits et pondérés sur une même échelle. L'analyse multicritère permet aux utilisateurs de résoudre des problèmes de décision complexes où plusieurs critères sont pris en considération dans le choix d'une ou de multiples solutions (Salomon et al, 2001). L'objectif de cette étude est de déterminer le niveau de vulnérabilité aux inondations, les facteurs intervenants dans l'estimation de la vulnérabilité selon la disponibilité des données sont classés suivant leur importance : la densité de la population, le tissu urbain et le réseau routier.

Notre modèle est basé sur une analyse multicritère. C'est un outil d'aide à la décision développé pour résoudre des problèmes multicritères complexes qui incluent des aspects qualitatifs et/ou quantitatifs dans un processus décisionnel (Guillermo et al, 2000). La méthode permet d'apporter des éléments de réponse à plusieurs difficultés posées par l'évaluation de la vulnérabilité (Camille et al, 2007).

Les facteurs intervenant dans l'estimation de la vulnérabilité selon la disponibilité des données sont classés suivant leur importance comme suit :

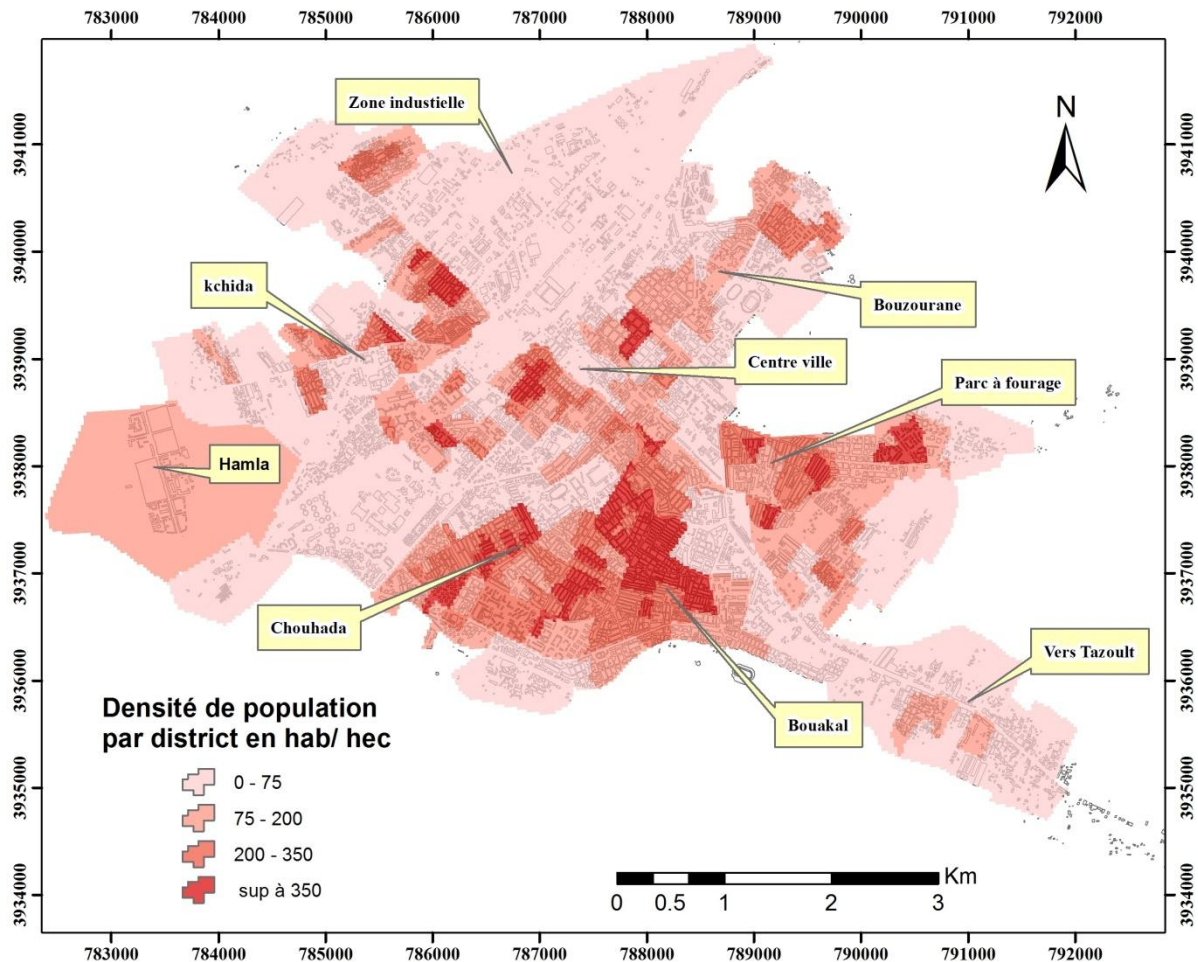
### **1.1. Densité de la population par district :**

D'après le recensement de la DPAT (Direction de la planification et l'aménagement de territoire) la population de la ville de Batna est de 302585 habitants en 2012.



La figure 2 montre une répartition inégale et non homogène de la population sur cette ville qui arrive à une densité qui dépasse 350 habitants par hectare dans certains districts (DPAT).

La densité de la population est l'un des facteurs de détermination de vulnérabilité avec un poids élevé.



**Figure 68.** La densité de la population par district.

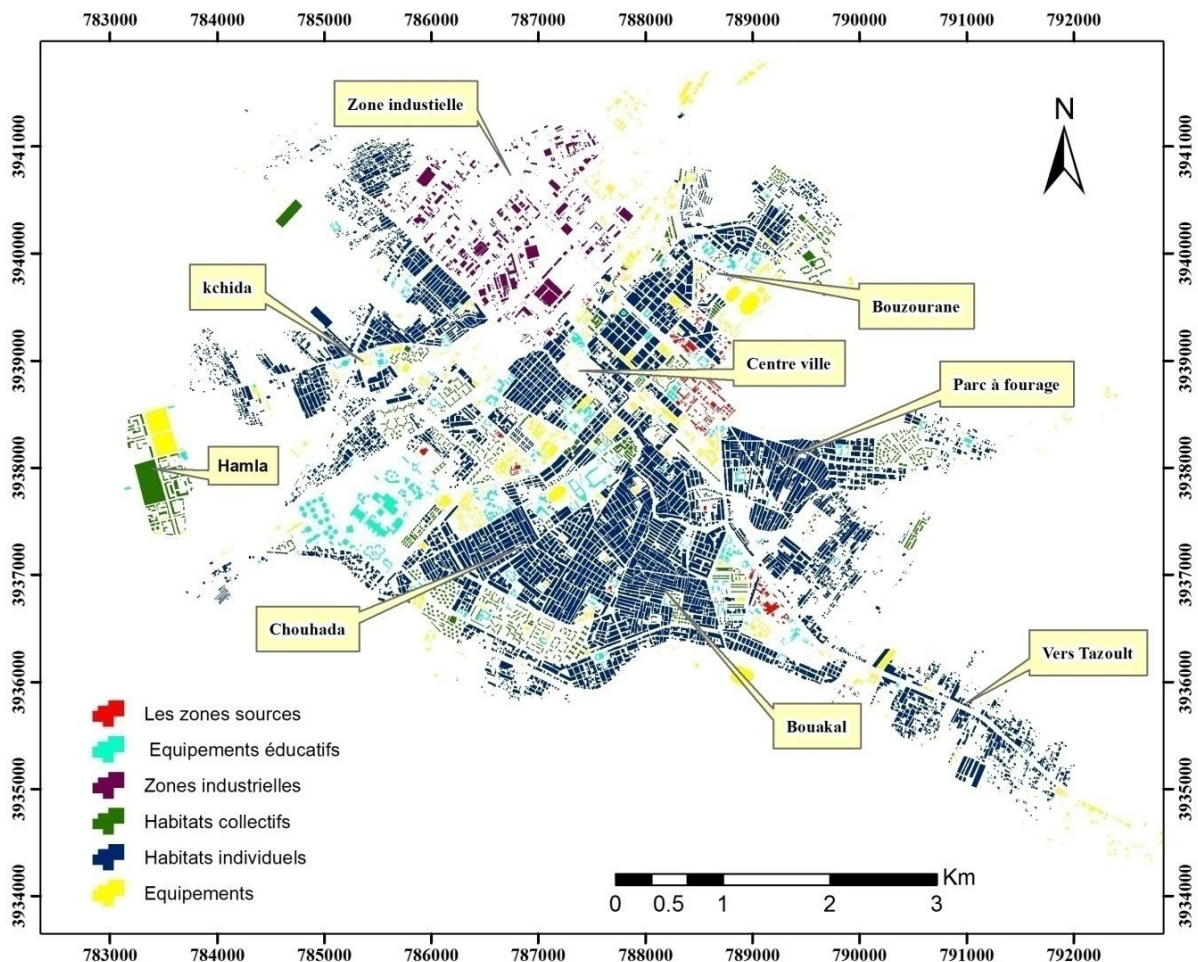
## 1.2. Tissu urbain :

La ville de Batna représente une variété de forme urbaine et occupation de l'espace où l'articulation spatiale des différents facteurs influe sur le degré de la vulnérabilité.

Les habitats collectifs sont caractérisés par de grands ensembles en fonction résidentielle importante avec des bâtiments en hauteur qui impliquent souvent des étages élevés mais ces constructions en hauteur protègent les populations et leurs biens malgré la forte densité, par

conséquent, la vulnérabilité au risque d'inondation dans ce cas est réduite, contrairement pour les habitats individuels dont les personnes et les biens sont à une hauteur près du niveau du sol. Les équipements ont une vulnérabilité supérieure à celle de l'habitat à cause de la forte fréquentation aux administrations, l'importance de leurs biens et aux services qu'ils assurent.

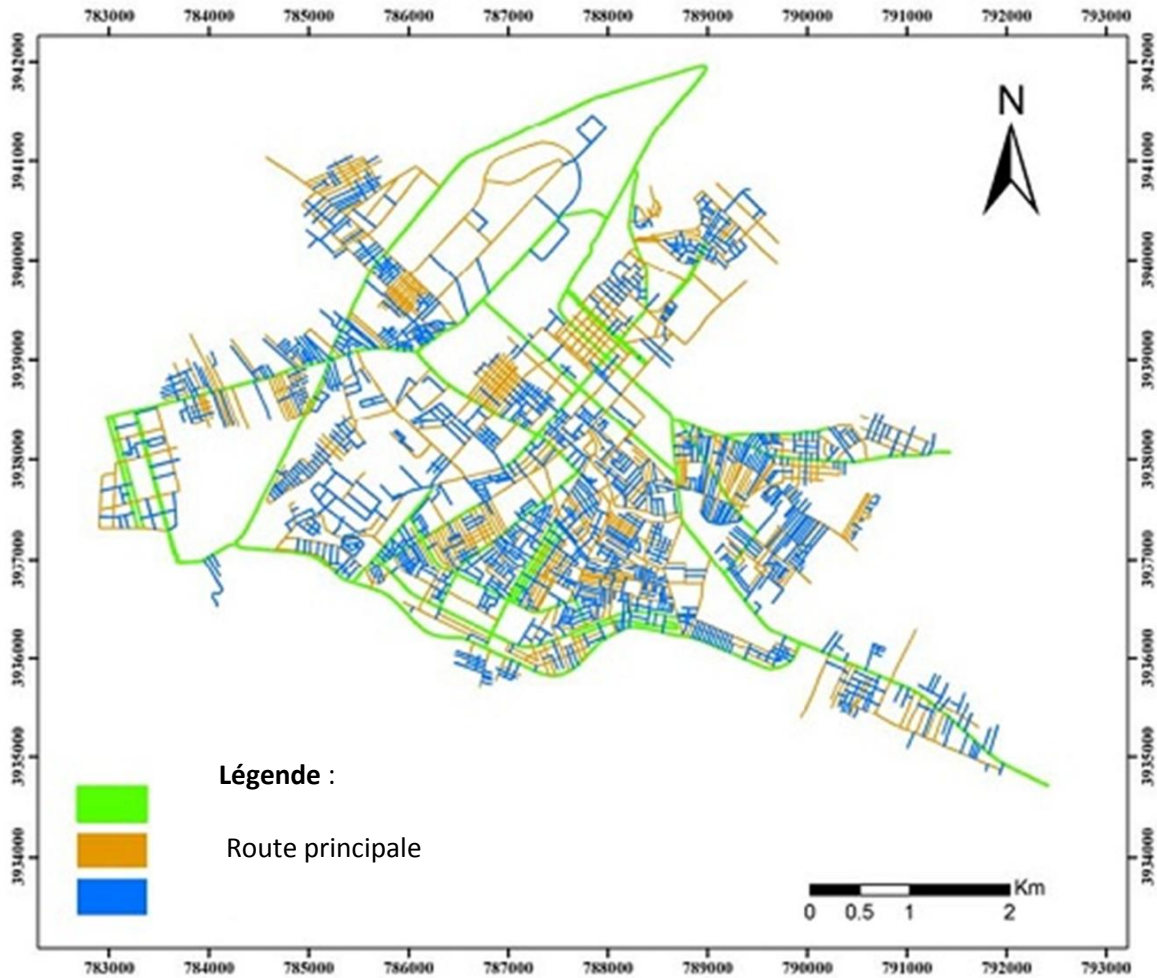
La zone industrielle représente une vulnérabilité considérable compte tenu de son importance économique et la présence des industries chimiques qui ont aussi des effets indirects et néfastes sur l'environnement. Les zones sources qui sont les équipements participant fortement à la gestion de la crise; les établissements de santé et de télécommunication, les entités militaires et la protection civile constituent les zones de vulnérabilité extrême.



**Figure 69.** Le tissu urbain.

### 1.3. Réseau routier :

Le réseau routier est l'un des facteurs de la vulnérabilité compte tenu de son importance en termes d'accessibilité et de transport. Différents services et équipements sont associés au réseau routier notamment ceux qui interviennent dans la gestion pendant et après la crise. (Zones sources).



**Figure 70.** Le réseau routier.

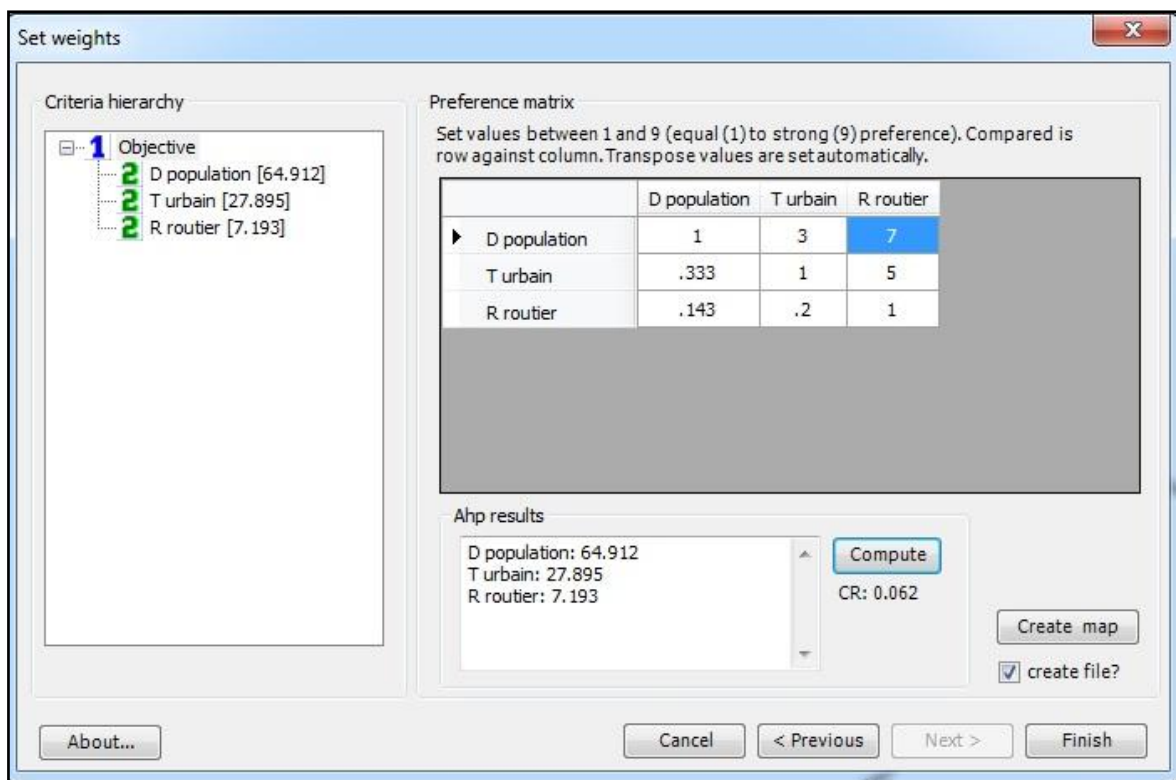
L'évaluation de la vulnérabilité repose sur le recensement des enjeux socio-économiques et leur transcription sur la carte.

En matière de risque d'inondation, les méthodes hiérarchiques multicritères (MHM) ont été utilisées pour comparer la vulnérabilité de différents sites en fonction de critères Socio-économiques et de l'organisation des secours (Grillot et al. 2001).

Nous avons crée des indices de vulnérabilité qui représente le niveau d'influence des éléments de chaque facteur.

**Tableau 40.** Les indices de la vulnérabilité.

1. Densité de la population hab. /h	Indice	2. Tissu urbain	Indice	3. Réseau routier	Indice
75>	1	Habitats collectifs	1	Route tertiaire	
75 - 200	2	Habitats individuels	2	Route secondaire	
200 – 350	3	Equipements administratifs et zones industrielles	3	Route principale	1
350<	4	Equipements scolaires	4		2
		Les zones sources	5		3



**Figure 71.** L'extension AHP.

Le calcul de la vulnérabilité est fait selon la formule suivante :

La vulnérabilité = 0.649 Densité de population + 0.278 Le tissu urbain + 0.072 réseau routier

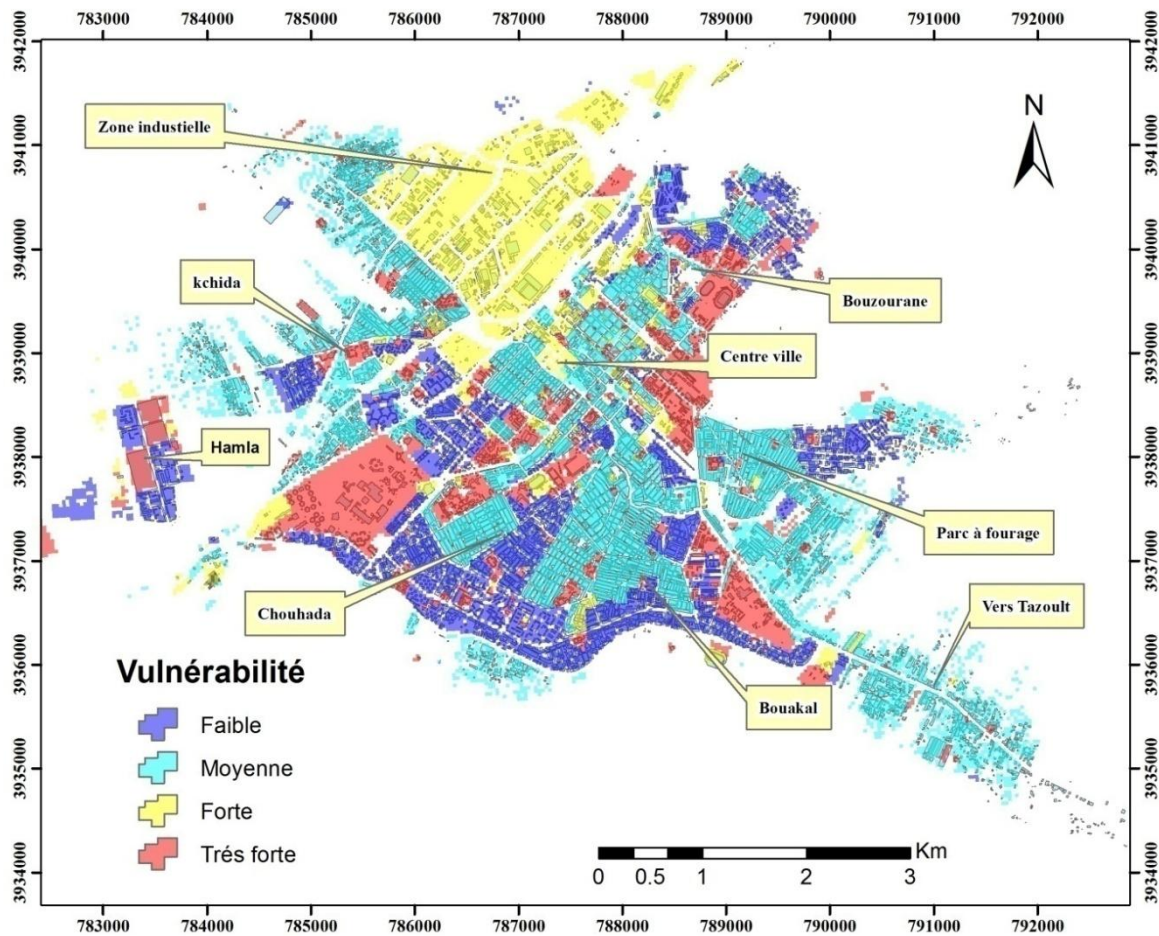
**Tableau 41.** La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité. (Parie 1)

Densité de la population (0.649)	(0.162)	(0.324)	(0.486)	(0.649)
Tissu urbain (0.278)				
(0.055)	0.265	0.415	0.541	0.74
(0.111)	0.273	0.435	0.597	0.756
(0.166)	0.328	0.49	0.652	0.815
(0.222)	0.384	0.542	0.708	0.871
(0.278)	0.44	0.602	0.764	0.927

**Tableau 42.** La matrice de la détermination des niveaux de la vulnérabilité. (Partie 2)

DP + TU (0.927)	0.265	0.273	0.328	0.384	0.415	0.435	0.44	0.49	0.541	0.542	0.602	0.597	0.602	0.74	0.708	0.76	0.764	0.815	0.871	0.927
Réseau routier (0.071)																				
(0.024)	0.289	0.297	0.352	0.408	0.439	0.459	0.464	0.514	0.565	0.566	0.625	0.63	0.626	0.728	0.732	0.784	0.788	0.839	0.895	0.947
(0.048)	0.313	0.33	0.376	0.432	0.463	0.483	0.488	0.538	0.589	0.59	0.65	0.645	0.65	0.752	0.756	0.808	0.812	0.863	0.919	0.972
(0.072)	0.337	0.345	0.4	0.456	0.487	0.507	0.512	0.562	0.613	0.614	0.674	0.669	0.674	0.776	0.78	0.832	0.836	0.887	0.943	1

Faible	Moyenne	Forte	Très forte
--------	---------	-------	------------



**Figure 72.** Carte de vulnérabilité.

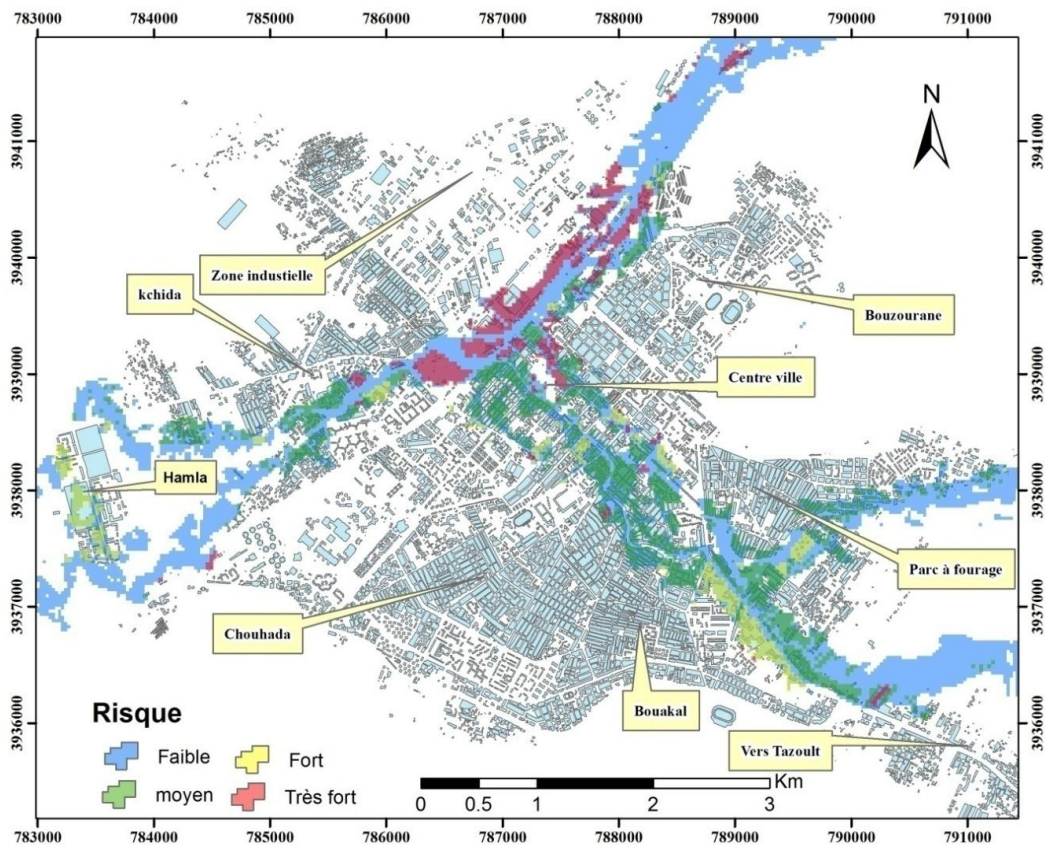
Les zones qui s'inscrivent dans la vulnérabilité extrême doivent faire l'objet d'une attention particulière pour atténuer les dégâts en cas de survenance d'un aléa important.

## 2. Etude de synthèse :

Le risque d'inondation s'estime par le croisement des cartes thématiques relatives aux enjeux exposés à l'inondation et à l'aléa d'inondation (Anh Tu Ngo, 2014). Le Systèmes d'Information Géographique (SIG) joue un rôle incontournable dans la cartographie du risque inondation. Le SIG sert à établir et regrouper la carte d'aléa et carte de la vulnérabilité pour faire extraire la carte du risque inondation.

$$\text{Risque d'inondation} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité.}$$

La carte d'aléa décrit l'inondation d'une crue forte. En principe, le chargé d'étude doit reporter l'extension de la crue la plus forte observée (plus hautes eaux connues) si elle est de période de retour supérieure ou égale à cent ans. Sinon il doit estimer l'enveloppe de la crue centennale (Mate, 2002). En absence de données historiques des débits historiques extrêmes fiables, nous avons adopté l'étendue de la crue centennale pour élaborer la carte d'aléa.



**Figure 73.** Carte du risque d'inondation.

La carte du risque, figure 73, montre que plusieurs zones sont susceptibles d'être touchées, notamment les zones qui doivent faire l'objet d'une attention particulière compte tenu de leur caractère stratégique et leur vulnérabilité.

Le centre hospitalo-universitaire (CHU) qui participe fortement à la gestion de la crise et qui constitue la zone d'extrême vulnérabilité (zone source).

Les équipements administratifs qui sont d'une grande vulnérabilité à cause de la forte fréquentation par la population et des services qu'ils assurent.



La zone industrielle par son activité et sa nature qui représente une vulnérabilité considérable qui peut induire des risques technologiques à effet domino important.

Le niveau du risque est centré sur celui de la vulnérabilité où le résultat montre que plusieurs zones de la ville sont susceptibles d'être affectés par un risque fort (Figure 73). Cette forte exposition de certaines zones est due soit à la forte densité de population soit par l'importance et/ou à la sensibilité de certains équipements considérés comme zones sources.

De nombreuses améliorations restent encore à apporter à cette approche afin qu'elle soit fiable, où il va falloir mieux comprendre les caractéristiques sociales et territoriales historiques et actuelles. Cependant, cette étude peut servir comme un premier document d'aide à la décision pour les collectivités de cette ville.

### **Conclusion :**

L'élaboration d'une carte de vulnérabilité aux inondations de la ville de Batna, à l'égard des collectivités locales qui contribuent à cibler leurs stratégies préventives et le recours à l'analyse multicritère sous un SIG, peut être un outil pertinent pour la spatialisation de cette vulnérabilité. Plusieurs zones de la ville sont inscrites dans un niveau de vulnérabilité élevé due soit à la forte densité de population soit par l'importance et/ou à la sensibilité de certains équipements.

L'adoption de l'étendue de la crue centennale pour élaborer la carte d'aléa et après la superpositions, des enjeux importants sont soumis à étendue de la crue notamment les équipements intervenant dans la gestion de la crise (les établissements de santé et de télécommunication, et la protection civile) qui doivent faire l'objet d'une l'attention particulière.

La connaissance précise des processus d'inondation, leur articulation spatio-temporelle et les enjeux socioéconomiques exposés permettent de concevoir des schémas de prévention et la carte risque constitue un moyen de prévention pour les populations et leurs biens.

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE :

L'étude du risque d'inondation du au débordement des cours d'eau au niveau de la ville de Batna est basée sur trois principaux concepts interactifs : hydrologique, hydraulique et la cartographie de la vulnérabilité.

Cette étude passe en premier lieu par une analyse hydrologique qui peut offrir des informations pertinentes et indispensables pour le fonctionnement du modèle hydraulique. Le recours aux méthodes statistiques notamment l'analyse fréquentielle des séries chronologiques des pluies maximales journalières annuelles et avec l'application des lois empiriques nous permis de calculer les débits max à différentes récurrences en tenant compte des données relatives à l'impluvium de Batna.

L'analyse hydraulique nous a permis de faire une simulation des écoulements et une délimitation de l'étendue de l'inondation d'une façon fine et précise. Nous avons utilisé ce logiciel HEC RAS qui a pour but d'extraire des informations hydrauliques importantes et qui sert à l'identification des zones inondables dans un environnement géo-spatial. Cette analyse a montré que les aménagements réalisés sous forme de canaux à deux orifices ne peuvent répondre aux sollicitations des débits à fréquence rare. Sur le plan spatial nous avons adopté l'étendue de la crue centennale pour élaborer la carte d'aléa.

Les résultats obtenus montrent que les aménagements réalisés sous forme de canaux à deux orifices ne peuvent répondre aux débits supérieurs à une récurrence décennale, et par conséquent un risque résiduel important demeure non explicité que nous avons essayé de préciser et d'évaluer.

Ces deux étapes amènent à une meilleure connaissance de l'aléa inondation.

La cartographie de la vulnérabilité constitue la douzième étape, qui traduit l'importance des enjeux socio-économiques exposés aux inondations. L'évaluation de la vulnérabilité est basée sur le recensement des enjeux socio-économiques selon la disponibilité des données et transcrit leur importance sous forme d'une carte en utilisant une méthode hiérarchique multicritères (MHM).

La carte du risque à été élaborée par la superposition des deux cartes thématiques aléa et vulnérabilité, plusieurs zones sont inscrites à un risque élevé, et ça revient soit à la forte

densité de population soit par l'importance et/ou à la sensibilité de certains équipements considérés comme zones sources qui sont les équipements participant fortement à la gestion de la crise. (Les établissements de santé, établissements de télécommunication et protection civile). Loin d'être finement opérationnelle encore, cette étude peut servir comme un premier document d'aide à la discision pour les collectivités locales de cette ville.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

**Achite A. et Meddi M., (2004)** Estimation des crues en zone semi-aride : cas du bassin versant de l'oued Sly (Chleff). Colloque International « Terre et Eau » - Université d'Annaba.

**Adger W.N., (1999)** Social Vulnerability to Climate Change and Extrêmes in Coastal Viêt-Nam. World Development, DOL: 10.1016/S0305-750X(98)00136-3, VOL 27, pp 249-269.

**Adger W.N., (2006)** Vulnerability. Global Environmental Change, vol.16, pp 268 – 281.

**Alain I. A et Abel Afouda., (2015)** Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. Int. J. Biol. Chem. VOL 9 i1.12, Sci. 9(1), pp 121-133.

**Alban T., (2005)** Application de l'approche orientée-objet à l'extraction de fragments forestiers à partir de scènes Spot, DESS SIGMA, pp 30.

**Albert G. B. T., Brou K, YAO T. B., Savane S., Vamoryba F et Bernard S (2007)** Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale. Cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Log-Normale et de Gumbel. Hydrological Sciences Journal. ISSN: 0262-6667 2150-3435 (Online) 52:1, pp 49-67.

**Anabela R., Lúcio C., et Pedro P. C., (2014)** Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré, Geo-Eco-Trop., 2014, 38, 1, n. s, pp 33-44.

**Ancey C., (2005)** Une introduction à la Dynamique des Avalanches et des Écoulements Torrentiels, Cours, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

<http://www.toraval.fr/articlePDF/intro-risk.pdf>.

**Anh Tuan Luong., (2012)** Evaluation des risques d'inondations dans le bassin du fleuve Huong, province de Thua Thien Hué, centre du Viet Nam [Ressource électronique] sous la direction de Roche Yann. Thèse doctorat. Université du Québec à Montréal, pp 325.  
<http://www.archipel.uqam.ca/4950/>

**Anh Tu NGO., (2014)** Evaluation environnementale du risque d'inondation dans le delta du fleuve Ha Thanh (Centre Viêt-Nam). Thèse doctorat. Centre de Val de Loire université d'Orléans.

**ANRH., (2012)** Agence nationale des ressources hydriques.

**AquaPortail,** <http://www.aquaportail.com/definition-2414-temperature.html>.

**Atilio F., (2015)** Blog SIG & Territoire\_ Le blog SIG pour al gestion territoriale.

<http://www.sigterritoires.fr/index.php/tag/archydro/>

**Bachi M., (2011)** Problématique du risque inondation en milieu urbain; cas de l'agglomération de sidi bel Abbes. Thèse du magister université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen.

**Bachir A., Rhinane H., Mouchrif A., (2012)** Apport des systèmes d'information géographique (SIG) à la simulation de crues, cas de l'Oued Bouskoura à Casablanca. Travaux de l'institut scientifique, Rabat, série géologie et géographie physique, 2012, n°23, pp 25-31.

**Beloulou L., (2008)** Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville d'Annaba (Nord-est Algérien).Thèse de doctorat. Faculté des Sciences de la Terre Département de Géologie. Université d'Annaba.

**Benkhaled A., (2007)** Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff, comparaison des techniques et des résultats. Courrier du Savoir, 08, p 83-91.

**BENTEKHICI N., (2006)** Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie) ESRI France, 2006.

**Berolo W et Laborde J.P., (2003)** Statistiques des précipitations journalières extrêmes sur les Alpes-Maritimes. Equipe de Gestion et Valorisation de l'Environnement de l'UMR 6012 ESPACE. Université de Nice, France, pp1.

**Berz G., (2000)** Flood disasters: lessons from the past - worries for the future. Actes de colloque, Water and Maritime Engineering, Proceedings of the institution of Civil Engineers, Vol. 142, Issue 1, pp 3-8.

**Beucher S et Rode S., (2009)** L'aménagement des territoires face au risque d'inondation : regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne. Mappemonde, N° 94 (2-2009), pp 1-19.

**Borrows P., (2006)** Living with flooding - Noah's legacy. Irrigation and Drainage, vol 55, n° SUPPL pp 1.

**Bravard J.P. et Petit F., (1997)** Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial, Armand Colin, Paris, pp 213.

**Bravard J-P., (2000)** Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques. Gestion des excès et de la pénurie. SEDES.

**Camille G et Aleksandra B., (2007)** Evaluation multicritère de la vulnérabilité des territoires aux risques de transport routier de matières dangereuses. Rencontre Internationales Géomantique et territoire. SAGEO'2007

**Casenave A., Valentin C., (1989)** Les états de surface de la zone sahélienne influence sur l'infiltration Didactiques, Orstom, Paris, pp 229.

**CEMAGREF., (1993)** Rapport technique. Étude Hydraulique des Wateringues. Lyon, Centre du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, pp 168

**Chloé G., (2014)** Vulnérabilité et transport de matières dangereuses : une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la Sécurité Civile. *Cyber géo : Européen Journal de Géographie* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 361, mis en ligne le 12 janvier 2007, consulté le 12 juillet 2014. URL: <http://cybergegeo.revues.org/5995>; DOI: 10.4000/cybergegeo.5995.

**Coles S., (2001)** An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Verlag, 211, pp 23-31.

**Comby J., (1998)** Les paroxysmes pluviométriques dans le couloir Rhodanien. Thèse de géographie et aménagement, Université Jean Moulin Lyon III, pp 668.



**CREED., (2007)** Bilan des catastrophes naturelles dans le monde de 1975 à 2004", The OFDA/CREED International Disaster Database", Université Catholique de Louvain, Bruxelles, Belgique.

**Cudennec C., (2007)** Transfert versus mutualisation des coûts et des risques d'amont en aval. Apports des notions hydrologiques d'échelle, structure, émergence et impact. Instruments économiques et modernisation de l'agriculture irriguée en Méditerranée. Actes du séminaire Euro Méditerranéen "Les instruments économiques et la modernisation des périmètres irrigués", Kairouan, Tunisie, pp 11.

**Cunnane C., (1987)** Review of Statistical Models for Flood Frequency Estimation Paper pres. In: Inst, Symp on Flood Frequency and Risk Analysis. Baton Rouge. La., Publ. In Singh, V.P. (Ed.), Hydrology Frequency Modelling, Reidel Publ. CO., Dordrecht: pp 49-95.

**Cutter S.L., Boruff B.J., Shirley W.L., (2003)** Social vulnerability to environmental hazards Social Science Quarterly, 84(2): pp 242-261.

**Daniel J., Brossard T., Herve C., Cavailhaes J., Hilal M et Wavresky P (2009)** Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France. L'Espace géographique 2009/2 (Vol. 38) ISBN : 9782701152370, pp 98

**Debiane K., (2010)** Hydraulique fluviale et torrentielle avec présentation et prise en mains des logiciels HEC-RAS, ARC-GIS et HECGEO-RAS : RHEOHYDRO. 3BIS SCOP, pp 162.

**Degla K. H., Tchibozo A. E., Vissin E et Houssou C., (2014)** Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. Afrique Science, 10 (2) (2014) 137 – 148. ISSN 1813-548X pp 140.

**Delhomme J P., (1976)** Application de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau (Variabilités partiale des grandeurs hydro-climatiques et hydrogéologiques & précision de leurs connaissances). Thèse de docteur Ingénieur, université Pierre et Marie Curie, Paris-6.

**DH (2012)** Direction de l'hydraulique de la wilaya de Batna.

**DPAT., (2012)** Direction de la planification et l'aménagement de territoire.

**Dubreuil. P., (1974)** Introduction à l'analyse hydrologique, Ed. Masson-ORSTOM, Paris pp 216.

**El Watan., (2008)** "Des crues de l'oued M'Zab font 33 morts et 48 blessés: Aïd de deuil à Ghardaïa", édition du 4 Octobre,

[http://www.elwatan.com/IMG/\\_article\\_PDF/article\\_105436.pdf](http://www.elwatan.com/IMG/_article_PDF/article_105436.pdf).

**Eric B. T., Florian G. M., Laffly D., Christelle M., (2009)** Quantification des hauteurs de neige et des températures de l'air à la surface d'un glacier : du terrain à l'interpolation, confrontation de méthodes. Neuvièmes Rencontres de Théo Quant Besançon, 4-6 mars 2009. ISSN 1769-6895. Article mis en ligne le 19 octobre 2010.

**ESRI., (2010)** Arc GIS 10 Help. Fonctionnement de l'outil Spline.

<http://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-spline-works.htm>.

**ESRI,** <http://resources.arcgis.com/fr/communities/hydro/01vn0000000s000000.htm>

**Estupina B. V., Chorda J et Dartus D., (2005)** Prévion des crues éclair. C.R. Géosciences de surface, vol 337, pp 1109-1119.

**Fallot J. M., (2013)** Evaluations des différentes formules de la loi de Gumbel pour l'estimation des précipitations journalières extrêmes en Suisse. XXVIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Institut de Géographie, Université de Lausanne, CH-1015 Lausanne, pp 224-229.

**Fallot J. M., Hertig J. A., (2013)** Détermination des précipitations extrêmes en Suisse à l'aide d'analyses statistiques et augmentation des valeurs extrêmes durant le 20ème siècle. Mém. Soc. Vaud. Sc. Nat., 25, pp 13-24.

**FERRER J-P., (1992)** Analyse statistique de pluies maximales journalières, Comparaison de différentes méthodes et application au bassin Guadalhorce (Espagne). Hydrologie continental. Vol. 7, no 1, 1992, pp 23-31.

**Gendreau N., Grelot F., Garçon R. et Duband D., (2003)** Risque d'inondation : une notion probabiliste complexe pour le citoyen. Ingénierie EAT, Vol 34, pp 17-24.

**Givone P., (1998)** "Risques naturels et transcriptions cartographiques." Ingénieries pp 87-96.

**Giovanola M et F Heritier., (2002)** Les inondations de Bâb El Oued. Cours de

Fiabilité et sécurité II, février 2002, Département de génie civil, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse, pp 5.

### **Glossaire Internationale d'Hydrologie**

<http://www.environnement.ccip.fr/eau/inondations/inondation-typologie.htm>

**Graf W. H. et Altinakar M. S., (2000)** Hydraulique fluviale. Ecoulement et

phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple, Presse Polytechniques et Universitaires Romandes.

**Graillet D., Londiche H., Dechomets R et Batton H. M (2001)** Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations, In : Actes des colloques SIRNAT 2001, 6-7 décembre 2001, Sophia Antipolis.

**Grivel S., (2008)** La Loire des îles, du Bec d'Allier à Gien : rythmes d'évolution et enjeux de gestion [Ressource électronique] sous la direction de E. Costard-Gautier. Université Paris VIII Vincennes-Saint Denis, pp 517. [réf. du 12 décembre 2011].

**Guillermo A., Mendoza et Phil M., (2000)** Application de l'analyse multicritère à l'évaluation des critères et indicateurs. Manuels de critères et indicateurs pour la gestion durable des forêts. Publié par : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement (Cirad) Département des forêts TA 10 – C. Version française© Cirad, Cifor, 2000 ISBN 2-87614-387-9.

**Hache M., Perreault L., Rémalard L et Bobee B., (1999)** Une approche pour la sélection des distributions statistiques : application au bassin hydrographique du Saguenay Lac St Jean. Revue Canadienne de Génie Civil. 26 (2), pp 216-225.

**Hervouet J., (2003)** hydrodynamique des écoulements a surface libre, modélisation numérique avec la méthode des éléments finis, éditions presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, pp 312.

**Hubert O., TAHA B. M. J. O., Marc B., André S. T. H., Bernard B et Pierre B., (2004)** Analyse fréquentielle régionale des précipitations journalières maximales annuelles au Québec, Canada. Journal des Sciences Hydrologiques, 49(4) août (2004) pp 718.

**IFEN., (2002)** Catastrophes naturelles et plans de prévention des risques. Les données de l'environnement, n°73, pp 4.

**Julien I., (2009)** Contribution de la méthodologie et de la technologie géo décisionnelle pour l'aide a l'évaluation des risques naturels dans le secteur de l'assurance en France, thèse de doctorat : l'école des mines de Paris, pp 136.

**Khoualdia W., (2015)** Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda Nord-est Algérie ». Thèse de doctorat. Université d'Annaba, pp 138.

**Klemes V., (1975)** Applications de l'hydrologie à la gestion des ressources en eau (au niveau de la planification et de la conception), OMM N° 356, Genève, pp 121.

**Koutsoyiannis D., (2004)** Exploration of long records of extremes rainfall and design rainfall inferences, Proceedings of the International conference of British Hydrological Society, Imperial College London, pp 148-157.

**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 à l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.

**Laborde J.P., (2000)** Méthodes d'interpolation et géostatistiques pour la cartographie automatique. Université de Nice, Sophia Antipolis, CNRS – UMR 5651 « Espace », pp 27

**Lacina, T., (2012)** Analyse des refoulements dans les réseaux de drainage urbain [enligne]. Mémoire présenté à l'Ecole de Technologie Supérieure, l'Université du Québec, pp 217. [Réf. du 3 juin 2013]. Disponible sur : [http://espace.etsmtl.ca/1088/1/LACINA\\_Traor%C3%A9.pdf](http://espace.etsmtl.ca/1088/1/LACINA_Traor%C3%A9.pdf)

**Larousse français,** <http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/temp%C3%A9rature/77211>

**Leone F., Vinet F., (2006)** La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels, in LEONE F., VINET F. (dir.), La vulnérabilité des sociétés

et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques, Publications de l'Université Paul-Valéry Montpellier III, « EA GESTER », Géorisques, vol. 1, 2006, pp 9-25.

**Lu, G.Y ET Wong, D.W., (2008)** An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Comput Geosciences* 34 (9), pp 1044–1055.

**Luhmann N., (1993)** Risiko un Gefahr, in *Soziologische Aufklärung, Bd 5, Konstruktivistische Perspektiven*, Wiesbaden, DE, 2, Auflage, pp 126-162.

**Luong A.T., (2012)** Evaluation des risques d'inondations dans le bassin du fleuve Huong, province de Thua Thien Hué, centre du Viet Nam [Ressource électronique] sous la direction de Roche Yann. Université du Québec à Montréal, pp 325. [Réf. du 19 avril 2013]. Thèse doctorat : Sciences de l'Environnement. Disponible sur <http://www.archipel.uqam.ca/4950/>

**Mahaman B. S., Fernand K. K., Marie J. P., Jean B et Hélène B. K (2005)** Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'ouest de la côte d'Ivoire, apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Téledétection*, 2005, Vol. 5, n°(1-2-3), pp 53-67.

**Manohar A., Goel, N. K et Singh, P., (2005)** Evaluation of temperature trends over India. *Hydrological Sciences. J.* 50 (1), pp 81–94.

**Marion T., (2012)** Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise analyse préliminaire. Thèse de doctorat. Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement 490, rue de la Couronne Québec (Québec) G1K 9A9.

**Marc F., (2001)** Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations. Thèse de doctorat à l'institut national polytechnique de Toulouse spécialité : systèmes industriels, pp 119.

**Mate., (2002)** Plans de prévention des risques, votre atout pour la prévention des risques naturels, ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement.

**Matin d'Algérie., (2015)** Batna : d'énormes dégâts causés par les fortes pluies dans la wilaya, édition 23 Aout. <http://www.lematindz.net/news/18335-batna-denormes-degats-causes-par-les-fortes-pluies-dans-la-wilaya.html>.

**MEDD** (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable)-FRANCE., 2004a. Les inondations : Dossier d'information. Conception et réalisation : Alp'Géorisques [38420 Domène] et, Graphies [38240 Meylan] - Impression : Imprimerie du Pont-de-Claix [38640 Claix] / Alp Géo risques, pp 24.

**MEDD-PRIM@** Portail de la prévention des risques majeurs, Ministère de l'écologie et du développement durable, site Internet, <http://www.prim.net/>.

**Meyer C., Geldreich P., Yesou H., (2001)** Apport des données simulées SPOT 5 pour l'évaluation des dégâts de tempête dans la forêt d'Haguenau (Alsace, France). Conférence SPOT 5 « vers de nouvelles applications », Toulouse 27-28 novembre.

**Montoroi j. p., (2012)** Rôle des sols sur la genèse des inondations. Symposium européen–symposium europejskie – européen symposium problèmes actuels de la protection contre les inondations współczesne problemy ochrony przeciwpowodziowej anti-flood defences-today's problems Paris – Orléans 28-29-30.03.2012.

**Morin M., (2008)** Concepts de base en sécurité civile, pp 60.

**Nations Unies., (2005)** Cadre d'action de Hyogo pour 2005-2015: Pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes. UNISDR, 22 Janvier 2005, A/CONF.206/6. Disponible sur : [www.unisdr.org/2005/wcdr/.../Hyogo-framework-for-action-french.pdf](http://www.unisdr.org/2005/wcdr/.../Hyogo-framework-for-action-french.pdf).

**Ngahane E. L., (2015)** Gestion technique de l'environnement D'une ville (Bembereke au Benin) : caractérisation et quantification des déchets solides émis ; connaissance des ressources en eau et approche technique. Mémoire de Master. Université de Liège, pp 163.

**OMM (1989)** Analyse statistique de pluies maximales journalières Comparaison de différentes méthodes et application au bassin Guadalhorce (Espagne) Hydrol. Convent ml. 7, no 1, 1992.

**O.N.U. /DAH., (1992)** "Glossaire international multilingue agréé de termes relatifs à la gestion des catastrophes", <http://www.unisdr.org/unisdr/glossaire.html>, pp 98.

**Pierrick Blin., (2001)** Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du Risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences. Mémoire de Maître ès sciences (M. Sc.) Université du Québec. INRS-EAU, pp 8-9.

**Pigeon P (dir.), Robin M., Thouret J.C., D'ercole R., Leone F., Gaillard J.C., Vinet F., Tamru B., (2002)** Approches géographiques des risques "naturels". Annales de Géographie, no 627-628, pp 452-651.

**Pratt C.J., Harrison J.J., Adams J.R.W., (1984)** Storm runoff simulation in runoff quality investigations Proceedings of the 3rd International Conference on Urban Storm drainage, Göteborg, Sweden, 1, pp 285-294.

**Renard F et Comby J., (2007)** Caractérisation de l'alea pluviométrique en milieu urbain a partir d'interpolations spatiales, le cas du grand LYON, Revue Climatologie, vol. 4, 2007, pp133-141.

**Roche M., (1963)** Hydrologie de surface. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer -(PARIS). Gauthier - Villars editor – PARIS.1963, pp 30

**Rossi F., Fiorentino M., Versace P., (1984)** Component Extreme Value Distribution for Flood Frequency Analysis Water Resources. *Res.*, 20 (7), pp 847-856.

**Saaty T. L., (1991)** Método de Análise Hierárquica São Paulo, McGraw-Hill, Makron. pp 367

**Salomon J. N. (1997)** L'homme face aux crues et aux inondations. Collection «SCIETREN». Presses universitaires de Bordeaux, pp 136.

**Salomon V. A. P et Montevechi J. A. B., (2001)** A compilation of comparisons on the analytic hierarchy process and others multiple criteria decision making methods: some cases developed in Brazil». Proceedings of the 6th ISAHP, Berne, Switzerland, pp 413-420.

**Sam U., Shamsi., (2002)** GIS applications in floodplain management, IN: 22ND annual ESRI international user conference, JULY 8–12, SAN DIEGO, CA: ESRI.

**Scarwell H.J., et Laganier R., (2004)** Risque d'inondation et aménagement durable des territoires. Presses Universitaires du Septentrion, pp 81.

**Siegel S., (1956)** Non-Parametric Statistics for the Behavioral Sciences. McGraw-Hill: New York.

**Shepard D., (1986)** A two-dimensional interpolation functions for irregularly-spaced data. Proceedings of the 1968 ACM National Conference, pp 517–524.

**Soenario, I et Sluiter, R., (2010)** Optimization of Rainfall Interpolation, Interne rapport, De Bilt, pp 4-31.

**Sogreah P, (1996)** Plan de prévention des risques d'inondation. Bassin de risques de la Cesse. Agence de Toulouse, pp 55.

**Torterotot J. P., (1993)** Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes, Thèse de doctorat, spécialité Sciences et Techniques de l'Environnement, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, pp 284 + annexes.

**UNDRO - United Nations Disaster Relief Office (1980)** Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting (9-12 July 1979) United Nations, Department of Humanitarian Affairs UNDRO, New-York, pp 53.

**US Army Corps OF Engineers., (2010)** Hydrologic Engineering Center, HEC-RAS River Analysis System, User's Manual, pp 351- 790.

**Vidal J. P., (2005)** Validation opérationnelle en hydraulique fluviale - Approche par un système à base de connaissance, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, HHLY-CEMAGREF, pp 303 + annexes.

**Watts S.B et Tolland L., (2005)** Forestry handbook for British Columbia", 5th Ed., USU, University of British Columbia, Vancouver, BC, pp 773.

**Vidéo-aol., (2008)** L'inondation de Ghardaïa du 01 octobre 2008. <http://video-aol.com/video-detail>.

**Wade S., Rudant J.P, Ba K., Ndoye B., (2008)** Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : applications à l'étude des inondations urbaines de saint Louis et du ravinement lié à l'érosion hydrique à Nioro-du-Rip (Sénégal), Revue Télédétection, vol. 8, n° 3, pp 203-210.

**Wilcoxon F., (1945)** Individual comparisons by ranking methods, Biometrics, 1, pp 80-83



**Yahiauoui A., (2012)** Inondations Torrentielles. Cartographie des Zones Vulnérables en Algérie du Nord (Cas de l'oued Mekerra, Wilaya de Sidi Bel Abbès). Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

**YUE S., et PILON P. A., (2004)** Comparison of the power of the t test, Mann–Kendall and bootstrap tests for trend detection, Hydrological Sciences Journal. 49(1), pp 21–38.

**Zaninetti J.M., (2005)** Statistique spatiale, méthodes et applications géomatiques. Paris – Londres : Hermes Science Publishing Lavoisier. Collection application des SIG, ISBN 2-7462-1203-X, pp 320

<http://www.actuenvironnement.com/ae/dictionnaireenvironnement/Definition>