

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة ابو بكر بلقايد- تلمسان-

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen –

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

قسم الري

Département d'Hydraulique

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de Magister en Hydraulique

Option : Ecoulement et Transport Solide

Thème :

**PROBLEMATIQUE DU RISQUE INONDATION EN
MILIEU URBAIN ;
CAS DE L'AGGLOMERATION DE SIDI BEL ABBES**

Présenté Par :

BACHI MOHAMED

En juillet 2011 devant le jury composé de :

Mr A. SEDINI	Professeur	Président
Mr M.A. ALLAL	Maître de Conférences A	Encadreur
M^{me} C. BOUKLI HACENE	Maître Assistante A	Encadreur
Mr A. BOUANANI	Maître de Conférences A	Examineur
Mr N. BENMANSOUR	Maître Assistant B	Invité

ANNEE UNIVERSITAIRE 2010 - 2011

Created with

nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional

Remerciements

Tout un travail réussi dans la vie nécessite d'abord la bénédiction d'ALLAH, et ensuite l'aide et le support de plusieurs personnes. Je tiens donc à le remercier en premier degré ensuite à adresser ma reconnaissance à toute personne qui m'a aidé de loin ou de près afin de réaliser ce travail.

Tout d'abord, j'adresse mon grand amour à mes parents ; mon père pour son sacrifice, ma mère pour sa tendresse et mes frères et sœurs, c'est grâce à leur amour et leurs sacrifices que ce mémoire a été mené à bonne fin. Mon plus grand souhait dans cette vie, c'est de les voir toujours à côté de moi, en bonne santé, heureux et que la paix soit avec eux.

Ensuite, je tiens à remercier très vivement mes encadreurs du mémoire, Monsieur ALAL M A et Madame BOUKLI HACENE C, pour ses qualités humaines et scientifiques. Je ne pourrai jamais oublier leur gentillesse, leur générosité, leur esprit de recherche et leurs commentaires efficaces. Un grand merci de m'avoir donné la chance de réaliser ce modeste travail.

Puis, je remercie les membres de jury pour le soutien et l'intérêt qu'ils ont portés à ce travail : Monsieur le Président de jury SEDINI A, Messieurs les examinateurs membre de jury BOUANANI A et BENMANSOUR N.

Après, mes remerciements vont également à l'ensemble de mes enseignants en graduation et en post graduation qui m'ont orienté vers le bon chemin de recherche et restaient disponibles à tout moment.

Et en fin, je remercie encore fois et de tout mon cœur Mr BENMANSOUR N ainsi que tous mes amis pour l'appui moral qu'ils m'ont témoigné.

Résumé

La problématique des risques naturels en général et des Inondations en particulier est un sujet d'actualité qui marque une action mémorable dans le monde et spécifiquement en Algérie, notamment au regard des dernières grandes crues catastrophiques. En effet, la gestion de ce risque devient de plus en plus une nécessité qui doit inclure tous les acteurs et tous les moyens disponibles possibles.

Dans ce travail, on a exposé *la cartographie de l'aléa inondation par l'approche de la modélisation hydraulique* à travers l'exemple de l'Oued Mekerra qui scinde la ville de Sidi Bel Abbès et en appuyant sur la contribution du *système d'information géographique (Arc Gis, Arc View et Map Info)* et de *la modélisation hydraulique (HEC RAS)*. Cette cartographie semble comme l'un des moyens très efficace dans le cadre d'une gestion efficace ; elle peut servir comme document de base aux pouvoirs publics pour définir les règles générales concourant à une meilleure gestion de l'espace urbain tout en constituant un moyen d'information de la population sur les risques d'inondations et un outil d'organisation aux décideurs qui sont pas forcément techniciens, et dont à eux appartient le choix final de la stratégie de lutte contre le risque inondation.

Mots clés : Cartographie, Aléa, Inondation, Sidi Bel Abbès, Modélisation.

Summary

The problem of the natural risks in general and the Floods in particular is a subject of topicality which marks a memorable action in the world and specifically in Algeria, in particular taking into consideration last great catastrophic risings. As a result, the management of this risk becomes more and more a need which must include all the actors and all the means available possible.

In this work, I exposed *the cartography of the risk flood by the approach of hydraulic modeling* through the example of *the Mekerra river* which divides *the town of Sidi Bel Abbès* and while supporting on the contribution of *the geographical information system (Arc Gis, Arc View and Map Info)* and of *hydraulic modeling (HEC RAS)*. This cartography seems as one of the methods very effective within the framework of an efficient management, it can be used like background document for the public authorities to define the general rules contributing to a better management of urban space while constituting information means of the population on the risks of floods and a tool of organization in the decision makers who are not inevitably technicians, and whose to them returns the final choice of the fight plan against the flood risk.

Key words: Cartography, Risk, Flood, Sidi Bel Abbès, Modeling.

الـمـلـخـص

إن مشكل الأخطار الطبيعية عموما و سجلت أثرا بليغا في ذاكرة شعوب العالم عموما و الجزائر بصفة خاصة، لاسيما من خلال وقائع الفيضانات المسجلة في الأونة الأخيرة. من اجل ذلك أصبح تسيير هذه الأخطار ضرورة حتمية تتضمن اجتماع كل الأطراف المعنية واستعمال جميع الوسائل المتوفرة.

فمن خلال هذا العمل عرضت فكرة خرنطة العامل ي المسبب لخطر الفيضان وذلك بتطبيق الهيدروليكي متخذا بذلك مكرّة المار بمدينة سيدي بلعباس كمكان للدراسة و مستندا على الجغرافي (*ArcGis, ArcView et MapInfo*) و مبدأ العرض الهيدروليكي (*HEC RAS*). فهذه الخرنطة تعتبر كإحدى الطرق الفعالة من اجل تسيير محكم، إذ يمكن استعمالها كوثيقة مساعدة للإدارات العمومية لتعريف القواعد العامة التي تساهم في إدارة ناجعة للفضاء الحضري وكذلك تشكل وسيلة سريعة في إعلام السكان بأخطار الفيضانات و أداة سحرية في يد ورة تقنيين، من اجل اختيار الخطة المناسبة لمحاربة خطر الفيضان.

ل الفيزيائي، الفيضان، سيدي بلعباس، العرض الهيدروليكي.

TABLE DES MATIERES

Liste des abréviations	
Définition des mots clefs	
Liste des tableaux	
Liste des Figures	

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre 1 : Connaissance du risque inondation

1. Introduction	04
2. Risques majeurs – inondations	04
3. Connaissance de l'aléa « inondation »	05
3.1. Paramètres fondamentaux d'un cours d'eau	05
3.1.1. Lits du cours d'eau	05
3.1.2. Rive, berge	07
3.1.3. Ripisylve	07
3.1.4. Alluvions et substratum	07
3.2. Crue	07
3.3. Inondation	08
3.4. Principaux paramètres caractérisant l'aléa inondation	08
a) Période de retour de crue	08
b) Hauteur et durée de submersion	09
c) Vitesse du courant	09
d) Volume de matière transportée	09
3.5. Types d'inondations	09
3.5.1. Inondations de plaines	10
3.5.2. Inondations par remontées des nappes phréatiques	10
3.5.3. Inondations par crues torrentielles	11
3.5.4. Inondations par ruissellement en secteur urbain	11
3.5.5. Inondations par rupture d'ouvrage ou d'embâcle	12
3.5.6. Inondations marines	12
3.6. Causes de formation des crues et des inondations	13
3.6.1. Causes directes	13
a. Abondance des précipitations	13
b. Fusion brutale des neiges	14
c. Débâcle des glaces fluviales	14
d. Accidents	14
3.6.2. Phénomènes aggravant l'aléa	14
a. Influence des facteurs naturels	15
b. Influence des facteurs anthropiques	16
3.7. L'homme et l'inondation	16
3.8. Causes et types d'inondations catastrophiques en Algérie	17
4. Connaissance des enjeux et de vulnérabilité	19
5. Conclusion	20

Chapitre 2 : Politiques d'évaluation et de gestion du risque inondation

1. Introduction	21
2. Evaluation du risque inondation	21
2.1. Evaluer l'aléa « inondation » et ses incertitudes	22
2.1.1. Hydrologie pour estimer l'aléa	22
2.1.2. Hydraulique pour quantifier l'aléa	22
2.1.3. INCERTITUDES DANS L'EVALUATION DE l'aléa	22
2.2. Evaluer la vulnérabilité	22
2.2.1. Démarches quantitatives	22

2.2.2.	Démarches qualitatives	25
a)	Méthode inondabilité du CEMAGREF	25
b)	Techniques hiérarchiques multicritères	25
3.	Gestion des inondations	25
3.1.	Prévention et retour d'expérience : hors contexte de crise	26
3.1.1.	Prévention face au risque d'inondation	26
A.	Répartition des responsabilités	26
B.	Travaux de protection pour réduire l'aléa	27
C.	Maîtrise de l'urbanisation pour réduire la vulnérabilité	27
3.1.2.	Retour d'expérience	28
3.2.	Prévision et gestion de crise : en contexte de crise	28
3.2.1.	Prévision, en préalable direct d'une crise éventuelle	28
3.2.2.	Gestion de crise	29
4.	Politique Algérienne de gestion du risque inondation	29
5.	Politiques de gestion des inondations dans le monde	30
6.	Conclusion	32

Chapitre 3 : Outils et techniques de cartographie du risque inondation

1.	Introduction	34
2.	Démarche de cartographeur du risque inondation	34
2.1.	Carte d'aléa	34
2.1.1.	Approche historique	35
2.1.2.	Approche hydrogeomorphologique	35
2.1.3.	Modélisation hydraulique	36
2.1.3.1.	Données topographiques	37
2.1.3.2.	Types de modèles hydrauliques	37
2.2.	Carte de vulnérabilité	38
3.	Méthodes de cartographie du risque inondation	39
3.1.	Méthode de cartographie de Canada-Quebec (PDCC)	39
3.2.	Méthode des zones d'saturabilité des USA	39
3.3.	Méthode inondabilité (France)	40
4.	Outils utilisés pour l'aide à la cartographie du risque inondation	41
4.1.	Utilisation des modèles hydrologiques/hydrauliques	41
4.2.	Utilisation de la télédétection spatiale et aérienne (photographie aérienne et images satellitaires)	42
4.3.	Utilisation du système d'information géographique	43
5.	Système d'information géographique : outil puissant pour cartographier le risque inondation	43
5.1.	Definitions du SIG	43
5.2.	Composants du SIG	44
5.3.	Structure du SIG	45
5.4.	Fonctionnalités du SIG	45
5.5.	Données dans un SIG	46
5.5.1.	Types de données dans un SIG	46
a)	Données spatiales	46
b)	Données associées	46
5.5.2.	Modes de données dans un SIG	46
a)	Mode vecteur	47
b)	Mode raster ou trame	47
5.5.3.	Méthodes d'acquisition des données	47
a)	Numérisation (digitalisation)	48
b)	Balayage électronique (scannerisation)	48
c)	Photogrammétrie aérienne	
d)	Images satellitaires (télédétection)	
e)	Import de fichiers	
5.6.	Avantages et contraintes du SIG	

1) Avantages	48
2) Contraintes	49
5.7. Domaines d'application du SIG	49
6. Conclusion	49
Chapitre 4 : Cartographie de l'aléa inondation par approche de modélisation hydraulique : cas de la ville de Sidi Bel Abbès	
1. Introduction	51
2. Présentation général de la zone d'étude	52
2.1. Présentation de la ville de Sidi Bel Abbès	53
2.2. Contexte topographique	53
2.3. Occupation du sol	53
2.4. Contexte climatique	53
2.5. Contexte hydrologique	54
2.6. Aménagements de protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations	56
3. Etude hydrologique	58
3.1. Acquisition des données hydrométriques	59
3.2. Ajustement de la série des débits de pointe enregistrée à la station de Sidi Bel Abbès suivant les lois de distribution	60
3.2.1. Ajustement suivant la loi de Gauss (ou Normale)	60
3.2.2. Ajustement suivant la loi de Galton (ou Log-normale)	62
3.2.3. Ajustement suivant la loi de Gumbel	64
3.3. Ajustement de la série des débits de pointe enregistrée à la station de Sidi Ali Benyoub suivant les lois de distribution	67
3.3.1. Ajustement suivant la loi Normale	67
3.3.2. Ajustement suivant la loi Log-normale	69
3.3.3. Ajustement suivant la loi de Gumbel	70
3.4. Choix du modèle statistique adéquat pour les deux stations et sélection de la station représentative	72
4. Etude hydraulique	73
4.1. Typologie des modèles	73
4.2. Choix du type de modèle hydraulique	74
4.3. Présentation du modèle HEC-RAS	74
4.3.1. Bases théoriques du logiciel HEC-RAS	75
4.3.2. Validation du modèle HEC-RAS	76
4.3.3. Environnement HEC-RAS	77
4.3.4. Programme auxiliaires de la famille HEC	78
4.3.5. Contraintes d'utilisation du modèle HEC-RAS	79
4.4. Etapes de simulation par HEC-RAS	79
4.4.1. Création d'un nouveau projet	79
4.4.2. Préparation des données topographiques pour l'HEC-RAS	80
4.4.2.1. Formation du modèle numérique de terrain « MNT TIN »	80
4.4.2.2. Extraction des données topographiques pour l'HEC-RAS	83
4.4.3. Données hydrométriques et conditions aux limites	86
4.4.4. Simulation hydraulique	88
5. Cartographie de l'aléa inondation	90
6. Interprétation des résultats	93
7. Conclusions	94
Conclusions et perspectives	95
Glossaire	
Bibliographie	
Annexe	

LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH :	Agence Nationale des Ressources Hydriques.
ABHO	Agence du Bassin Hydrographique d'Oranie Chott Chergui.
DGPCA	Direction Générale De La Protection Civile d'Alger.
DHW :	Direction hydraulique de Wilaya.
ESRI :	L'institut américain de recherche de systèmes environnementaux
FEMA :	Federation Emergency Management Agency (agence fédérale de gestion d'urgence).
FHBM :	Flood Hazard Boundary Map (carte de frontière de risque d'inondation).
FIRM :	Flood Insurance Rate Map (carte de taux d'assurance contre l'inondation).
GPS :	Global Positioning System (système de positionnement global).
HEC RAS :	Hydrologic Engineering Center's River Analysis System.
MNT TIN :	Modèle Numérique de Terrain de type Terrain Irregular Network.
NFIP :	National Flood Insurance Program (programme national d'assurance contre l'inondation).
PDCC :	Programme de détermination des Côtes de Crue.
PGP :	Plan Général de Prévention.
PLU :	Plans Locaux d'Urbanisme.
PPR :	Plans de Préventions des Risques.
QDF :	Débit-Durée-Fréquence.
ROP :	Radar à Optique Passif.
RSO :	Radar à Synthèse d'Ouverture.
SFHA :	Special Flood Hazard Area (zone de risque spéciale d'inondation).
SIG :	Système d'Information Géographique.
USACE :	US Army Corps of Engineers.
UTM :	Universal transverse Mercator.
WGS :	World Geodetic System.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 01 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant de la Mekerra (Page 56).
- Tableau 02 : Estimation des paramètres de la loi normale (Page 61).
- Tableau 03 : Résultats d'adéquation de la loi normale par le teste de χ^2 (Page 62).
- Tableau 04 : Estimation des paramètres de la loi Log-normale (Page 63).
- Tableau 05 : Résultats d'adéquation de la loi Log-normale par le teste de χ^2 (Page 64).
- Tableau 06 : Estimation des paramètres de la loi de Gumbel (Page 66).
- Tableau 07 : Résultats d'adéquation de la loi de Gumbel par le teste de χ^2 (Page 67).
- Tableau 08 : Estimation des paramètres de la loi normale (Page 67).
- Tableau 09 : Résultats d'adéquation de la loi normale par le teste de χ^2 (Page 69).
- Tableau 10 : Estimation des paramètres de la loi Log-normale (Page 69).
- Tableau 11 : Résultats d'adéquation de la loi Log-normale par le teste de χ^2 (Page 70).
- Tableau 12 : Estimation des paramètres de la loi de Gumbel (Page 70).
- Tableau 13 : Résultats d'adéquation de la loi de Gumbel par le teste de χ^2 (Page 72).
- Tableau 14 : Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après les deux stations de SBA et SAB et suivant la loi de Gumbel et de Galton (Page 72).

LISTE DES FIGURES

- Figure 01 : Diagramme de travail pour cartographier l'aléa inondation (Page 03).
- Figure 02 : Lit mineur d'un cours d'eau (Page 06).
- Figure 03 : Lit moyen d'un cours d'eau (Page 06).
- Figure 04 : Lit majeur d'un cours d'eau (Page 06).
- Figure 05 : Inondation de Plaine (Page 10).
- Figure 06 : Inondation par remontées des nappes phréatiques (Page 10).
- Figure 07 : Inondation par crues torrentielles (Page 11).
- Figure 08 : Inondation par ruissellement en secteur urbain (Page 12).
- Figure 09 : Cas significatifs des inondations survenues en Algérie

- Figure 10 : Risque = F (aléa, vulnérabilité) (Page 20).
- Figure 11 : Courbe d'isorisque (Page 20).
- Figure 12 : Hydrogramme de crue obtenu par limnimétrie (Page 23).
- Figure 13 : Champs d'intervention dans la gestion des inondations (Page 29).
- Figure 14 : Composantes d'un SIG (Page 44).
- Figure 15 : Organisation des couches d'information dans le SIG (Page 44).
- Figure 16 : Structure d'un SIG (Page 45).
- Figure 17 : Fonctionnalités d'un SIG (Page 46).
- Figure 18 : Modèle vecteur et raster (Page 47).
- Figure 19 : Procédure de cartographie du risque inondation (Page 50).
- Figure 20 : Décomposition administrative de la wilaya de Sidi Bel Abbès (Page 52).
- Figure 21 : Vue générale de la ville de Sidi Bel Abbes à partir de Google Earth (Page 52).
- Figure 22 : Géographie du bassin versant de l'Oued Mekerra (Page 54).
- Figure 23 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mekerra et profil en long d'Oued Principal (Page 55).
- Figure 24 : Organisation hydrogéomorphologique du bassin versant de l'Oued Mekerra (Page 55).
- Figure 25 : Profil en travers d'Oued Mekerra dans sa traversée de Sidi Bel Abbès (Page 57).
- Figure 26 : Aménagements réalisés pour protéger la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations (Page 58).
- Figure 27 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi normale (Page 61).
- Figure 28 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi Log-normale (Page 63).
- Figure 29 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi de Gumbel (Page 66).
- Figure 30 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi normale (Page 68).
- Figure 31 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi Log-normale (Page 69).
- Figure 32 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi de Gumbel (Page 71).
- Figure 33 : Représentation des termes de l'équation d'énergie (Page 75).
- Figure 34 : Résultats de validation du logiciel HEC RAS (Page 77).
- Figure 35 : Fenêtre principale du logiciel HEC-RAS (Page 78).

- Figure 36 : Création de nouveau projet HEC-RAS (Page 79).
- Figure 37 : Diagramme de travail pour créer le MNT TIN (Page 81).
- Figure 38 : Combinaison de données topographiques de résolutions différentes (Page 82).
- Figure 39 : Création du MNT TIN (Page 82).
- Figure 40 : Représentation 3D d'Oued Mekerra d'après le MNT TIN (Page 83).
- Figure 41 : Diagramme récapitulant la méthode de préparation du dossier de données topographiques pour le HEC RAS par le HEC GeoRAS (Page 84).
- Figure 42 : Principaux thèmes de Ras créés par HEC GeoRAS (preRAS) (Page 85).
- Figure 43 : Géométrie de l'Oued Mekerra dans le logiciel HEC RAS (Page 86).
- Figure 44 : Fenêtres des données hydrométriques (Page 87).
- Figure 45 : Fenêtres des conditions aux limites (Page 87).
- Figure 46 : Fenêtres de simulation pour le régime permanent (Page 88).
- Figure 47 : Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé (Page 88).
- Figure 48 : Affichage des résultats de simulation sous forme graphique (Page 89).
- Figure 49 : Vue en 3D des résultats de simulation (Page 89).
- Figure 50 : Tache inondable d'après un débit de fréquence millénnalle (Page 90).
- Figure 51 : Vue 3D de la tache inondable d'après un débit de fréquence millénnalle (Page 91).
- Figure 52 : Carte de l'aléa inondation réalisée sur la ville de Sidi Bel Abbès par approche de Modélisation Hydraulique (Page 92).

INTRODUCTION GENERALE

L'eau peut être une aubaine comme elle peut être une source de problèmes ; elle engendre des situations contradictoires d'une fois de pénuries et d'autre fois d'inondations. Pour ce dernier cas, sa gestion a une importance capitale dans le développement de l'occupation du territoire. Ainsi les inondations sont à l'origine de plus de 80% des catastrophes naturelles enregistrés dans le monde entre 1996 et 2006 provoquant ainsi des dégâts estimés à 500 000 de personnes décédées et de 600 milliards de dollars de pertes économiques. De ce fait, elles sont les catastrophes naturelles les plus spectaculaires qui produisent le plus de dégâts. **[KLIJN 2008]**

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

- Inondations d'Octobre 2008 (Ghardaïa) : plus de 40 morts et des dégâts matériels très lourds ;
- Inondations du 10-11 novembre 2001 (Bab El-Oued en Alger) : 733 décès et 3000 sans abri ;
- Inondations d'Octobre 2000 (ouest algérien) : plus de 24 décès ;
- Inondations du 24 Octobre 2000 (Sidi Bel Abbès) : 02 décès et d'importants dégâts matériels ;
- Inondations d'Octobre 1994 (plusieurs régions de pays) : 60 décès et des dizaines de blessés pendant 10 jours ;
- Inondations d'Octobre 1993 (Oued R'hiou, wilaya de Ghilizane) : 22 décès et 14 Blessés. **[MERABET 2006]**

La ville de Sidi Bel Abbés, avec une population d'environ 300 000 habitants et un lieu qui s'élève sur les rives d'Oued Mekerra (à peu près au centre de la plaine parcourue par cet Oued), est confrontée continuellement aux inondations générées par les crues de ce dernier qui draine une superficie de 1812 km² sur une longueur de 216.7 km. De ce fait, l'établissement d'une politique efficace de gestion de ce risque naturel a constitué l'une des principales préoccupations des décideurs et responsables de la wilaya de Sidi Bel Abbés.

Toutefois, le risque inondation est le résultat du croisement de deux facteurs : l'aléa représenté par la probabilité d'occurrence du phénomène crue et son intensité, et la vulnérabilité aux inondations définie par les conséquences prévisibles de la crue sur

les personnes et leurs biens. La présente étude intéresse du premier volet de ce risque ; il s'agit de la cartographie de l'aléa inondation en milieu urbain.

L'objectif premier est de faire une synthèse bibliographique sur la cartographie de l'aléa inondation par approche de modélisation hydraulique, ainsi d'exposer les capacités des outils informatiques dans la cartographie des résultats présentant ainsi un outil très ambitieux à la portée des décideurs pour définir les niveaux de protection à apprendre et les améliorations à apporter aux aménagements existants.

Pour ce fait, on a choisi la ville de Sidi Bel Abbés comme zone d'étude, le logiciel HEC RAS comme instrument de modélisation hydraulique et les systèmes d'information géographique (Map Info, Arc View et Arc Gis) comme outils de cartographie des zones exposées.

Ce choix est bien argumenté puisque la ville de Sidi Bel Abbés est confrontée continuellement aux inondations générées par les crues de l'oued Mekerra qui scinde la ville, le modèle (1D) HEC-RAS montrera bien sa capacité en matière de représentation de l'étendue de l'inondation et le système d'information géographique permettra de bien spatialiser les éléments exposés à ce risque et par conséquent aboutir à un outil de prise de décision bien intégré.

Comme méthodologie de travail, on a effectué en première étape une étude hydrologique qui sert à prévoir les débits des crues d'Oued Mekerra correspondants aux différentes périodes de retours. Cette étude est basée sur une analyse statistique fréquentielle des données hydrométriques disponibles.

Ensuite, en deuxième étape, on a fait une étude hydraulique qui consiste à avoir les hauteurs d'eaux correspondantes aux débits prévus précédemment. Pour cela, les résultats issus de l'étude hydrologique ont réunis avec la géométrie, la pente et la rugosité de l'Oued Mekerra pour être utiliser comme données d'entrée dans le modèle hydraulique HEC-RAS afin d'avoir en sortie les lames d'eaux correspondantes.

Enfin et à l'aide d'un outil de cartographie (Arc Gis), les résultats de la modélisation hydraulique (hauteur d'eau pour chaque débit) sont présentés sous forme de cartes d'aléa (voir Figure 1).

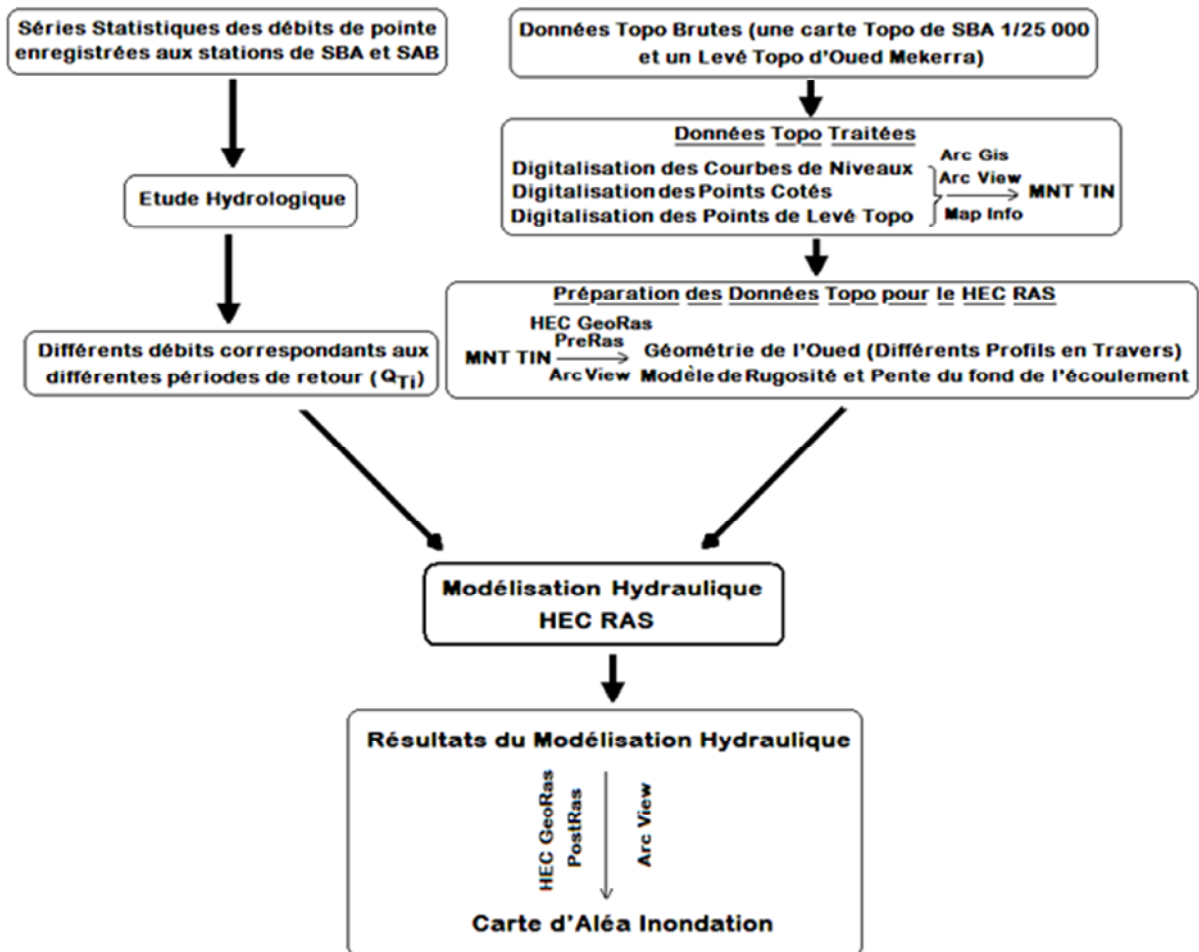


Figure 01 : Diagramme de travail pour cartographier l'aléa inondation.

Cet enchainement d'études présente la plateforme pour la cartographie de l'aléa inondation, plusieurs scénarios peuvent se présenter en fonction de différents jeu de données ce qui met à la disposition des décideurs une vision claire sur l'ampleur de phénomène et l'impact des aménagements à projeter.

Ce mémoire s'organise en quatre chapitres, le premier propose une présentation des différentes composantes du risque inondation. Il montre que le risque d'inondation est un concept qui regroupe à la fois l'aléa et la vulnérabilité. Le deuxième offre une idée générale sur la façon d'évaluation du risque inondation (aléa et vulnérabilité) et expose les diverses stratégies de gestion de ce risque. Le troisième précise les différentes approches et techniques utilisées pour cartographier le risque inondation. Il montre que la réalisation de la carte des inondations passe automatiquement par la découverte et la superposition de deux cartes ; la carte d'aléa et de vulnérabilité. Et le quatrième chapitre, qui est consacré à l'application, présente la manière expérimentale de cartographie de l'aléa inondation par l'approche de la modélisation hydraulique.

CHAPITRE 1 : CONNAISSANCE DU RISQUE INONDATION

1. INTRODUCTION

Les zones inondables sont soumises à différents types d'inondation, dont les caractéristiques influencent le déroulement des crises et l'ampleur des impacts humains et économiques. Le risque n'est pas le même sur les différents territoires exposés puisque ni l'aléa ni la vulnérabilité sont les mêmes ; les crues surviennent de manière plutôt lente sur les bassins plats alors qu'elles se produisent de manière extrêmement rapide et brutale sur les bassins pentus. Aussi les inondations ne provoquaient pas de catastrophes susceptibles de marquer les esprits si les zones inondables n'étaient pas ou peu occupées par l'homme. [LEDOUX 2006]

La réaction face à ce risque d'inondation a consisté pendant plusieurs décennies à lutter contre les crues qui signifiait d'abord que l'on cherchait à agir sur le phénomène naturel – la crue – et uniquement sur lui, c'est-à-dire sur une seule composante du risque – l'aléa – et non sur les enjeux ou leur vulnérabilité. [LEDOUX 2006]

Le but principal de ce chapitre est de développer la connaissance du risque inondation ; le phénomène naturel générateur de ce risque, ses causes, ses modalités de survenance et de déroulement ainsi que les enjeux et leur vulnérabilité. Il clarifie le désordre de cette notion en montrant que le risque d'inondation est un concept complexe bien souvent associé à l'unique dimension physique liée à l'aléa, alors que l'aléa n'est pas nécessairement le moteur du risque, la vulnérabilité aussi.

2. RISQUES MAJEURS – INONDATIONS

Les types de risques auxquels chacun de nous peut être exposé sont regroupés en cinq familles :

- ❖ **Risques naturels** : avalanche, feu de forêt, **inondation**, mouvement de terrain, cyclone, tempête, séisme et éruption volcanique ;
- ❖ **Risques technologiques** : d'origine anthropique, ils regroupent les risques industriels, nucléaire, biologique, rupture de barrage...
- ❖ **Risques de transports collectifs** (personnes, matières dangereuses) : sont des risques technologiques, on en fait un cas particulier car les enjeux varient en fonction de l'endroit où se développe l'accident ;
- ❖ **Risques de la vie quotidienne** (accidents domestiques, accidents de la route...)
- ❖ **Risques liés aux conflits. (MERABET 2006)**

Le risque majeur peut être défini comme la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre. Alors **seules les trois premières catégories font partie de ce risque majeur** qui est caractérisé

- Une faible fréquence : L'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes ;
- Une énorme gravité : Nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement. [MERABET 2006, RAHMANI 2004]

Dans le domaine de la gestion des risques, les probabilités d'occurrence des phénomènes naturels sont appelés des aléas ; étudier les aléas c'est chercher à caractériser ces phénomènes selon les principaux paramètres suivants : leur fréquence de survenance, intensité destructrice et leur étendue. En matière d'inondation, leur intensité s'exprime principalement pour un endroit donné, par la hauteur et la durée de submersion ainsi que la vitesse du courant. Ces paramètres sont fournis, avec une précision plus ou moins grande, pour l'ensemble de la zone inondable par une crue de fréquence donnée. [LEDOUX 2006]

Pour faire une meilleur connaissance du risque inondation, on expliquera :

- L'aléa « inondation » ;
- Les enjeux exposés ;
- La vulnérabilité des enjeux exposés ;

3. CONNAISSANCE DE L'ALEA « INONDATION »

L'aléa interpelle deux disciplines principales ; l'hydrologie et l'hydraulique fluviale. Dans le cas des inondations, l'hydrologie est la discipline qui permet d'obtenir les débits et leurs périodes moyennes de retour. Tandis que l'hydraulique est la discipline qui permet d'obtenir les niveaux d'eau et accessoirement les vitesses correspondant à ces débits. La combinaison de ces deux disciplines permet donc d'associer des périodes de retour à des niveaux et vitesses d'écoulement en divers points d'un cours d'eau. [BLIN 2001]

Pour mieux comprendre l'aléa inondation, on commentera les notions élémentaires suivantes ; les paramètres fondamentaux du cours d'eau, la crue, l'inondation, les principaux paramètres caractérisant l'aléa inondation, les types d'inondations et les causes de formation des crues et des inondations.

3.1. PARAMETRES FONDAMENTAUX DU COURS D'EAU

3.1.1. LITS DU COURS D'EAU

Le lit d'une rivière étant façonné par les eaux qu'il transporte on conçoit que ses dimensions soient fortement liées aux régimes hydrologiques.

Lit mineur : qui est constitué par le lit ordinaire du cours d'eau, pour le débit d'étiage ou pour les crues fréquentes (crues annuelles). [MERABET 2006]



Figure 02 : Lit mineur d'un cours d'eau. [MERABET 2006]

Lit moyen : Il correspond à l'espace fluvial ordinairement occupé par la ripisylve.



Figure 03 : Lit moyen d'un cours d'eau. [MERABET 2006]

Lit majeur : comprend les zones basses situées de part et d'autre du lit mineur, sur une distance qui va de quelques mètres à plusieurs kilomètres. Sa limite est celle des crues exceptionnelles. [MERABET 2006]

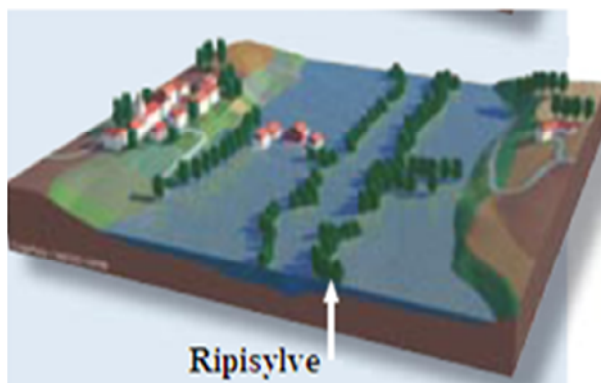


Figure 04 : Lit majeur d'un cours d'eau. [MERABET 2006]

Le lit majeur alors fait partie intégrante de la rivière ; si en s'y implantant, on s'installe donc dans la rivière elle-même. Cet espace (lit majeur) occupé par un cours d'eau lors d'une inondation peut-être partagé en deux zones :

- ❖ Une zone d'écoulement, au voisinage du lit mineur, où le cour

- ❖ Une zone de stockage des eaux, où la vitesse est faible. Ce stockage est fondamental, car il permet le laminage de la crue, c'est-à-dire la réduction du débit et de la vitesse de montée des eaux à l'aval. [MERABET 2006]

3.1.2. RIVE, BERGE

La berge est le talus incliné qui sépare le lit mineur et le lit majeur. Tandis que la rive est le milieu géographique qui sépare les milieux aquatique et terrestre. Elle démarre au sommet de la berge et constitue une partie plate plus ou moins étendue qui reste sous l'influence du milieu aquatique. [MERABET 2006]

3.1.3. RIPISYLVE

C'est la formation végétale naturelle située sur la rive. Elle peut être une véritable forêt alluviale s'étendant sur plusieurs dizaines ou centaines de mètres de part et d'autre du lit mineur. Le rôle de la Ripisylve sur les crues peut être important ; lorsqu'elle occupe une part significative du lit majeur, elle augmente notablement la rugosité du lit, d'où deux conséquences de nature hydraulique :

- ❖ Une diminution des vitesses dans le lit majeur, et donc une réduction des effets érosifs du courant ;
- ❖ Un écrêtement des crues pour l'aval. [MERABET 2006]

3.1.4. ALLUVIONS ET SUBSTRATUM

Les alluvions sont les grains fins ou grossiers alternativement déposés ou repris par le courant. Elles recouvrent le substratum qui est une couche formée d'une roche dure ou plus ou moins tendre (schistes, grès, marnes...). [MERABET 2006]

3.2. CRUE

La crue correspond à l'augmentation de la quantité d'eau qui s'écoule dans la rivière et peut concerner l'ensemble du lit majeur de la rivière. 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. De façon plus pratique, on admet qu'une rivière est en crue lorsqu'elle déborde des limites de son lit mineur. Il s'agit d'un phénomène naturel périodique qui n'est exceptionnel que lorsque les débits deviennent considérables par rapport à son module ; on parle alors de crue critique, laquelle peut engendrer une inondation sur les zones riveraines. [SALOMON 1997]

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

cet hydrogramme qui est appelé « crue », la partie descendante étant « la décrue ». Une crue se définit par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume. [SALOMON 1997]

3.3. INONDATION

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

Définition : Tout d'abord, le **risque** est un croisement de l'**aléa** et de la **vulnérabilité** ; l'aléa peut être défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène physique ; par exemple, le débit de la crue centennale est défini comme le débit qui a une chance sur cent d'être dépassé au cours d'une année, il est caractérisé par son intensité, son étendue, sa fréquence, sa durée. Tandis que la vulnérabilité étant les personnes, les biens et les activités susceptibles de subir des dommages lorsque survient l'aléa.

On peut alors dire qu'une **inondation** est une submersion rapide ou lente d'une zone habitée ordinairement hors d'eau. Ainsi, le risque inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut déborder de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial. L'importance de l'inondation dépend de la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue. Ces paramètres sont conditionnés par la précipitation, l'état du bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines. [CORTES 2006, MERABET 2006]

3.4. PRINCIPAUX PARAMETRES SPECIFIANT L'ALEA « INONDATION »

Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour caractériser l'aléa inondation :

a) PERIODE DE RETOUR

La notion de période de retour « T » n'est qu'une autre façon de caractériser la **fréquence** d'apparition d'un phénomène à un moment donné. Statistiquement, on la définit comme l'inverse de la probabilité d'occurrence de dépassement « p » de ce phénomène ; $T=1/P$. Un phénomène ayant une période de retour de cent ans (phénomène centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé chaque année. Cela est vérifié à condition de considérer une très longue période. Mais elle peut aussi, sur de courtes périodes (quelques années), se répéter plusieurs fois. Autrement dit, en vingt ans, un individu a une chance sur cinq de vivre la crue centennale.

On associe souvent à la notion de crue la notion de période de retour (crue décennale, centennale, millénaire, etc.) ; plus cette période est grande, plus les débits et

l'intensité sont importants. Les événements les plus souvent représentés sur la carte d'aléa sont la crue décennale (Q_{10}) et la crue centennale (Q_{100}). [MERABET 2006]

b) HAUTEUR ET DUREE DE SUBMERSION

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur le bâti, notamment lorsqu'elle dépasse la cote de référence. Lorsque la durée de submersion est importante, des problèmes sanitaires peuvent survenir, l'eau étant souvent malpropre, contaminée par les égouts ou parfois le mazout échappé des cuves. Pour l'homme, on considère généralement que des hauteurs d'eau supérieures à 50 cm sont dangereuses. À titre d'exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau. [MERABET 2006]

c) VITESSE DU COURANT

La vitesse d'écoulement est conditionnée par la pente du lit et sa rugosité, la dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur/vitesse. À titre d'exemple, à partir de 0,5 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets charriés à vive allure. [MERABET 2006]

d) VOLUME DE MATIERE TRANSPORTEE

Ce volume est communément appelé « transport solide ». Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, galets, blocs, etc.) se trouvant dans les cours d'eau et dont le transport peut s'effectuer soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement sur le fond du lit, du fait des forces liées au courant. L'aléa inondation d'une rivière torrentielle sera essentiellement caractérisé par une vitesse du courant élevée et un fort transport solide. [MERABET 2006]

3.5. TYPES D'INONDATIONS

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

Dans les quatre premiers cas, le phénomène générateur est la pluie et l'inondation engagera à partir des fleuves et des rivières ; la classification consiste donc à distinguer les inondations provoquées par des crues à cinématique lente (inondations de plaine, remontée de nappe) de celles générées par des crues à cinématique rapide (crues torrentielles, ruissellement). Tandis que dans les deux derniers cas ; le premier c'est les circonstances locales qui jouent pour faire d'une inondation s

événement particulier et le deuxième c'est l'action de la mer qui est le facteur principal déterminant la survenance des désordres. [LEDOUX 2006]

3.5.1. INONDATIONS DE PLAINES

Les inondations de plaine se produisent à la suite d'épisodes pluvieux océaniques prolongés mais d'intensités modérée, s'abattant sur des sols où le ruissellement est long à déclencher, sur des bassins versants moyens à grands (supérieur à 500 km²). Le cours d'eau sort lentement de son lit ordinaire pour occuper son lit majeur et inonder la plaine pendant une période relativement longue. Ces phénomènes concernent particulièrement les terrains bas ou mal drainés. Sa dynamique lente perdure plusieurs semaines.

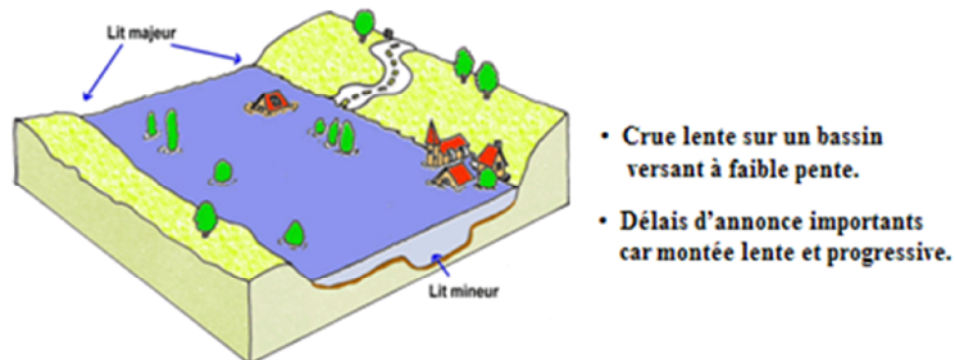


Figure 05 : Inondation de Plaine. [MERABET 2006]

Les dommages que provoque ce type d'inondation sont imputables aux hauteurs et durées de submersion. [MERABET 2006]

3.5.2. INONDATIONS PAR REMONTEES DES NAPPES PHREATIQUES

Elles correspondent à des inondations par débordement indirect qui se manifestent par la remontée de la nappe phréatique qui affleure en surface et/ou par l'intrusion d'eau dans les différents réseaux d'assainissement. [MERABET 2006]

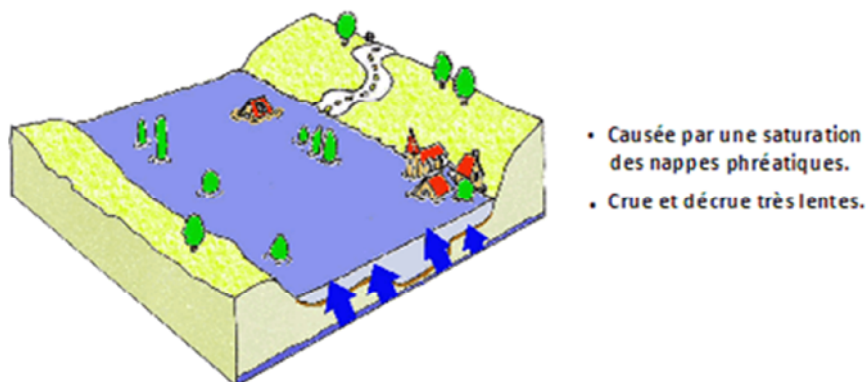


Figure 06 : Inondation par remontées des nappes phréatiques. [MERABET 2006]

Les désordres liés à ce type d'inondation se traduisent par des remontées sous bâtisses, l'engorgement des ouvrages souterrains, la déstabilis

tassements de remblai, des glissements de terrain, des perturbations sur les réseaux publics, des pressions sous les constructions, etc. [BOUBCHIR 2007]

3.5.3. INONDATIONS PAR CRUES TORRENTIELLES

Les crues torrentielles sont des phénomènes brusques et violents résultant d'épisodes pluvieux intenses et localisés, du type orages convectifs. De manière un peu conventionnelle, on parle de crues torrentielles lorsque la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombant sur le point « hydrologiquement » le plus éloigné atteigne l'exutoire est inférieure à 12 heures (ou 24 h pour certains auteurs). Les spécialistes retiennent cinq critères pour définir la crue torrentielle : la rapidité de la réponse du cours d'eau, sa pente, le nombre de Froude, le transport solide, les effets de ces crues. Ces crues touchent principalement les zones de montagne et les cours d'eau du pourtour méditerranéen, elles ont des vitesses d'écoulement importantes, même dans le lit majeur. Les bassins versants qui peuvent être affectés par ces phénomènes sont celles qui ont de petite à moyenne superficie et une forte pente moyenne.

Les crues torrentielles se caractérisent par un très fort transport solide et une profonde modification du lit à l'occasion de l'événement. Les dommages imputables à ces phénomènes sont avant tout liés à la vitesse du courant, renforcés par les matériaux que peuvent charrier les rivières générant de telles crues. [LEDOUX 2006]

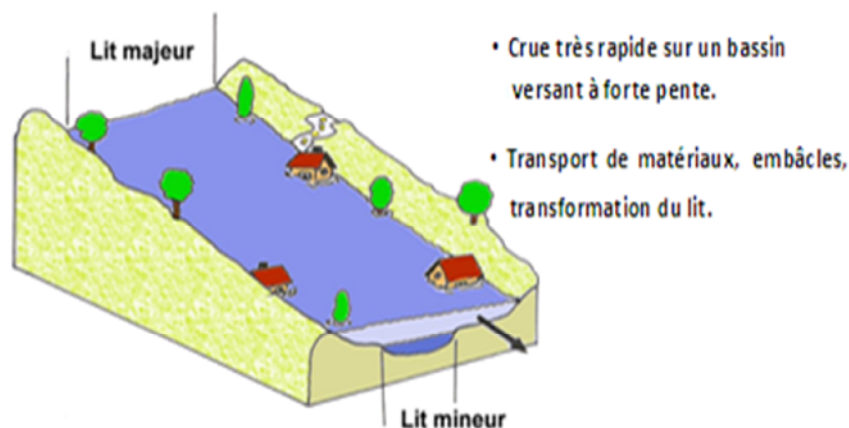


Figure 07 : Inondation par crues torrentielles. [MERABET 2006]

3.5.4. INONDATIONS PAR RUISSELLEMENT EN SECTEUR URBAIN

Les inondations par ruissellement recouvrent des phénomènes physiques différents selon qu'elles se produisent en milieu rural, périurbain ou urbain. Mais ces phénomènes se caractérisent par leur soudaineté et leur courte durée, ce qui les rend peu prévisibles et difficilement maîtrisables en période de crise. Il s'agit de phénomènes très locaux, intéressant les petits bassins versants. [LEDOUX 2006]



Figure 08 : Inondation par ruissellement en secteur urbain. [MERABET 2006]

Le ruissellement pluvial urbain provoque d'importantes inondations lorsque les terrains sont plus imperméables, le tapis végétal plus faible, la pente plus forte et les précipitations plus violentes et il demeure un phénomène naturel que l'on ne peut pas empêcher. Malheureusement, l'intervention humaine est parfois source d'aggravation de ce phénomène. Ce fut le cas des inondations de Bâb El Oued du 10 novembre 2001 à Alger, des pluies exceptionnelles et intenses, sur une étendue de 40 km², de l'ordre de 214 mm pendant 24h, ont causé 750 morts et 120 personnes disparues et plus de 10000 familles sinistrées. [MERABET 2006, DGPCA]

3.5.5. INONDATIONS PAR RUPTURE D'OUVRAGE OU D'EMBACLE

Dans le cas de rivières endiguées, l'inondation survient brutalement soit par débordement au-dessus de la digue, soit par rupture de la digue. Le phénomène peut être très brutal et d'autant plus dommageable que le site est proche de la digue. Le fait d'être derrière un ouvrage de protection dimensionné pour un certain niveau de crue peut donc rehausser le seuil de risque en cas de rupture ou dépassement de ce dernier. Des secteurs habituellement hors de l'eau peuvent se trouver brutalement inondés.

Un embâcle consiste en l'obturation d'un cours d'eau par la constitution d'une digue naturelle entraînant une retenue d'eau importante. La digue peut être constituée par des éléments solides arrachés à l'amont et charriés par le cours d'eau ou par un glissement de terrain. La rupture d'embâcle peut se produire plusieurs jours après une période de pluies exceptionnelles ou l'apparition d'un mouvement de terrain. [BOUBCHIR 2007, LEDOUX 2006, SPPPI 2004]

3.5.6. INONDATIONS MARINES

Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques (fortes dépressions et vents de mer) et forts

coefficients de marée. Elles se traduisent par l'invasion par des eaux salées particulièrement agressives. Elles se manifestent soit lors d'un raz de marée ou de tsunami (occurrence très faible, mais phénomène dévastateur), soit lors d'une tempête (surcote marine, vents et précipitations importants) ou en cas de rupture des défenses contre la mer (dans ce cas, les risques se concentrent le long du boulevard de littoral dans les secteurs dépressionnaires). [SPPPI 2004]

3.6. CAUSES DE FORMATION DES CRUES ET DES INONDATIONS

Il est important de connaître les manières de formation des crues et des inondations ; un même territoire peut être inondé dans des proportions identiques par des crues différentes, leur hydrogramme respectif traduisant des modalités de déroulement différentes. Les causes de formation peuvent fractionner en deux styles ; causes directes et phénomènes aggravant l'aléa.

3.6.1. CAUSES DIRECTES

a. ABONDANCE DES PRECIPITATIONS :

C'est le principal facteur explicatif des crues et des inondations. On peut distinguer plusieurs types :

- ❖ **Les averses brutales de type orageux** où les orages porteurs de précipitations ont des lames d'eau de 200 à 300 mm en quelques heures. On peut citer comme exemples l'intensité pluviométrique de **10 mm/min*** en Espagne. Si l'on observe qu'une intensité de **01 mm/min** représente un débit d'eau météorique de **16,6 m³/s/km²**, il n'est pas surprenant que certains petits bassins versants puissent fournir des débits spécifiques record, parfois supérieurs à **30 m³/s/km²** pendant quelque temps, avec les conséquences catastrophiques que l'on suppose !
- ❖ **Les averses durables** qui sont moins brutales car elles comportent en fait des séries d'averses successives entrecoupées de périodes de tranquillité, mais elles sont tout aussi dévastatrices. L'exemple de la crue la plus représentative est celui de la Saintes en 1994 qui fut inondée plusieurs semaines.
- ❖ **Les pluies de type orographique et cyclonique** ; à titre d'exemple une pluie de 1136 mm en 24 heures au Philippines.[#]

En règle générale, la puissance de la crue et les dégâts qu'elle occasionne sont d'autant plus forts que les précipitations sur le bassin versant ont été fortes, intenses et

* Un des plus forts débits spécifiques de crues listés en Europe et qui atteint par le Rio Segura (Province de Murcie, Espagne) le 14 octobre 1979.

Pluie enregistré par la station de « Baguio » en Juin 1911 aux Philippines.

durables, que les quotients d'écoulement sont plus élevés et que la morphologie et la nature des matériaux se prêtent à l'érosion. [SALOMON 1997]

b. FUSION BRUTALE DES NEIGES :

Elle est fréquente en Europe à la fin du printemps et au début de l'été. En effet, en fin d'hiver l'arrivée de front chaud (avec vent et pluie) va fusionner rapidement la neige qui couvre les bassins versants montagneux (Alpes, Pyrénées en France par exemple) ce qui provoque de grandes crues particulièrement importantes sur un sol parfois gelé et sans végétation. Mais le plus souvent l'alimentation d'origine neigeuse se combine à celle des averses. [SALOMON 1997]

c. DEBACLE DES GLACES FLUVIALES :

Celle-ci intervient à la suite de la rupture de barrages naturels de glace que ce soit en haute montagne (Alpes) ou dans les pays des hautes latitudes (cas de grands fleuves sibériens ou canadiens). Dans le dernier cas le phénomène est saisonnier ; chaque hiver les températures glaciales gèlent les eaux des fleuves d'abord en surface, puis progressivement en profondeur. De grands embâcles se produisent interdisant peu à peu tout écoulement superficiel. Cependant dans les parties amont des cours d'eaux, la prise par les fleuves est moins effective du fait d'une position plus méridionale (donc relativement plus chaudes), si bien que l'eau restée à l'état liquide s'accumule en de grands lacs temporaires. Dès l'arrivée du printemps, la conjonction du réchauffement des températures et de la poussée fantastique des eaux accumulées en arrière des barrages de glace, amène tôt ou tard à la rupture de ces derniers. A ce moment-là, s'effectuent les vastes débâcles qui emportent tout sur leur passage.

Ces crues catastrophiques et heureusement très rares, ne sont pas gérables une fois déclenchées. Seule la prévention est possible, par exemple par un dynamitage préalable des embâcles dès que ceux-ci atteignent un certain seuil. [SALOMON 1997]

d. ACCIDENTS : ex : rupture accidentel de barrage naturel ou artificiel. Parfois cet accident est lui-même lié à un autre phénomène exceptionnel (glissement de terrain, lié à des précipitations importantes, volcanisme, séisme...). [MERABET 2006]

3.6.2. PHENOMENES AGGRAVANT L'ALEA

Un grand nombre de facteurs autres que celles dictés précédemment intervient, souvent de façon aggravante, dans les dégâts occasionnés par les inondations. Parmi ces derniers, on peut rappeler l'influence des facteurs naturels et anthropiques.

a. INFLUENCE DES FACTEURS NATURELS

- ❖ Surface et forme du bassin versant : ainsi pour une **même surface**, l'allure de **l'hydrogramme de crue** résultant d'une pluie donnée est très différente suivant **la forme du bassin versant** ; un bassin très allongé ne réagit pas comme un bassin de forme ramassée ce qui a amené l'utilisation d'un indice pour évaluer le « coefficient de compacité ». En principe plus cet indice est faible, plus la concentration des eaux apportées par les affluents est rapide et plus les crues risquent d'être brutales et bien différenciées. [LEDOUX 2006, SALOMON 1997]
- ❖ Configuration du relief des lits des cours d'eau : La pente exerce une influence directe sur la rapidité de l'écoulement et donc sur la puissance de la crue. Si le profil en long du cours d'eau est assimilable à une suite de segments plus ou moins pentus, il exerce une action visible sur la crue. Le profil en travers est aussi important; pour un même débit de crue, un cours d'eau encaissé verra sa hauteur d'eau monter beaucoup plus vite qu'un cours d'eau à profil plus évasé. En contrepartie, ce dernier a de plus grands risques de débordements. [LEDOUX 2006, SALOMON 1997]
- ❖ Densité des cours d'eaux et perméabilité du bassin versant : ainsi la densité des cours d'eau était fonction de la nature des terrains, le réseau est d'autant plus développé et complexe que le terrain est moins perméable. On comprend aisément que plus l'imperméabilité est forte, plus les eaux météoriques sont disponibles pour le ruissellement de surface. De ce point de vue, à priori les cours d'eau drainant les régions imperméables ont une plus forte probabilité à développer des crues dangereuses. [LEDOUX 2006, SALOMON 1997]
- ❖ Facteurs biogéographiques : la végétation joue un rôle climatique complexe, elle agit sur le ruissellement, retient une part des pluies, évapore l'eau, etc. L'on sait depuis longtemps qu'une couverture végétale dense réduit et ralentit considérablement l'écoulement. D'abord la forêt intercepte la pluie et la neige, cette dernière pouvant mettre très longtemps à fondre sous couvert. Ensuite elle accroît fortement l'évapotranspiration ; pour la zone tempérée celle-ci atteint ou dépasse fréquemment 500 à 700 mm/an. On comprend facilement que cela limite le ruissellement direct et l'alimentation des cours d'eau. Bien souvent une végétation vigoureuse aux arbres dotés de racines nombreuses et bien enchevêtrées, constitue une excellente protection naturelle, quasi totale, contre l'érosion torrentielle. Inversement la destruction du couvert végétal constitue un facteur aggravant la puissance des crues. [LEDOUX 2006, S/

b. INFLUENCE DES FACTEURS ANTHROPIQUES

- ❖ Occupation de zones riveraines : la concentration des personnes et l'accumulation des biens dans les champs d'inondation génère le risque d'inondation par accroissement des enjeux, augmentation des vulnérabilités et absence de prévention-précaution.
- ❖ Imperméabilisation forte (conséquences d'aménagements urbains ou agricoles);
- ❖ Défiance des dispositifs de protection (digues, déversoirs). [LEDOUX 2006, SALOMON 1997]

3.7. L'HOMME ET L'INONDATION

Depuis la naissance de l'humanité, les inondations ont eu un caractère magique et religieux. Malgré cela et grâce à sa technique, l'homme est arrivé à infléchir, autrement contrôler, le cours naturel des rivières, oubliant peu à peu ce que sont des phénomènes naturels. Alors qu'en fonction de leur importance et leur localisation géographique, les crues et les inondations peuvent se produire et provoquer des dégâts et des dramatiques catastrophes qui se manifestent surtout par :

- L'érosion des cours d'eau et des sols parfois fertiles et cultivés.
- L'étranglement des cultures en plaine où l'eau qui a débordé peut rester durablement ce qui menace les récoltes par une submersion totale des champs qui seront perdus.
- La destruction des forêts que différents travaux ont montré que lorsque les inondations sont violentes, les forêts sont détruites sur de vastes surfaces mettant en place des formations peu denses et plus fragiles.
- La modification de la configuration du cours d'eau par la présence des sapements ou les accumulations de galets chassés par à-coups lors des fortes crues.
- La destruction d'ouvrages d'arts (barrages, ponts), de voies de communication (routes et chemin de fer) et de construction (bâtiments collectifs, usines etc.).
- Des catastrophes avec de nombreux morts. Les mauvais désastres de l'histoire ont certainement ceux provoqués par les crues Honang HO (fleuve Jaune) car la surélévation fréquente au-dessus de la plaine a entraîné d'immenses défluviations au cours desquelles les eaux emportaient tout sur leur passage. Les victimes se comptèrent alors par centaines de milliers.

On retiendra que statistiquement, les dommages dus aux crues sont d'autant plus graves qu'ils sont moins fréquents, car l'homme à la mémoire courte, ou obéit à des considérations économiques à court terme qui l'amènent à négliger le phénomène ou à admettre ses inconvénients. [SALOMON 1997]

3.8. CAUSES ET TYPES D'INONDATIONS CATASTROPHIQUES EN ALGÉRIE

L'Algérie est l'un des pays les plus confrontés aux phénomènes de crues et des inondations qui se manifestent de façon catastrophiques telles que les inondations de Mars 1973 sur l'Est Algérien, de Janvier 1992 sur le centre Algérien, de Janvier 1999 sur l'Ouest du Sahara Algérienne, d'Octobre 2000 à Sidi Bel Abbas et de novembre 2001 sur la cote Algéroise (inondation de Bab El Oued). Ces événements sont imprévisibles dans le temps et dans l'espace et ils constituent une contrainte majeure pour le développement économique et social. [OUFELLA 2003]

Les précipitations se caractérisent en Algérie par une très forte irrégularité tant interannuelle que saisonnière entraînent ainsi des étiages extrêmement sévères des cours d'eau et des fortes crues et des inondations engendrant des dégâts humains et matériels considérables. La genèse des crues et leurs impacts sur l'environnement se varient d'une région à une autre en fonction des conditions géographiques, climatiques et d'occupation des sols qui les caractérisent. [MERABET 2006]

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

- 1) Causes liées à des **situations météorologiques remarquables** se traduisant par une forte pluviosité tels que les inondations de décembre 1957 des bassins du Mazafran et du Sebaou, de l'automne 1969 en Algérie et en Tunisie, de Mars 1974 des bassins versants de l'Algerois et du Sebaou, de Décembre 1984 sur tout l'Est Algérien, de 1997 du bassin de la Mekerra à Sidi Bel Abbés et les inondations de 18 avril 2007 de Moulay Slissen etc. [MERABET 2006, OUFELLA 2003, BAHLOULI 2001]
- 2) Causes provoquées par des **facteurs liés à l'effet de l'homme** : la défaillance des réseaux d'assainissement et de collecte des eaux pluviales, le gonflement des oueds par les débris et les détritiques sont autant de facteurs qui provoquent des dégâts lors des averses saisonnières ; les cas de la ville de Tiaret inondée presque à chaque hiver et la plaine du Mzab ou des inondations se produisent tous les 02 à 03 ans illustrent parfaitement l'influence de ces facteurs dans l'apparition du phénomène d'inondation. [MERABET 2006, OUFELLA 2003, BAHLOULI 2001]
- 3) Causes produites dans des **régions présentant un environnement topographique défavorable** comme le cas des villes traversées par des oueds (Bordj Bou Arréridj, Oued R'hiou, Sidi Bel Abbés) ou **situées au pied d'une montagne** (Ain Defla, Batna, Medea). Ces agglomérations à forte population et sous l'effet d'une urbanisation anarchique et non réglementée présentent des gr

humaines et des destructions de constructions sont enregistrées à chaque inondation aussi légère qu'elle soit. [MERABET 2006, OUFELLA 2003, BAHLOULI 2001]

Ces inondations selon les caractéristiques des crues, leurs durées et leurs étendues sont de deux types:

- **Inondations engendrées par des crues torrentielles** : elles affectent les petits bassins versants de quelques dizaines de Km² et elles sont le plus souvent liées à des chutes de pluies isolées et localement intenses issues de phénomènes de convection sous forme de tempêtes orageuses se produisant généralement en automne et été. Les crues de ce type sont particulièrement dangereuses en raison de la soudaineté et de la rapidité avec lesquelles elles se produisent, les ruissellements extrêmement rapides et violents peuvent intervenir moins d'une heure après la pluie et les débits des oueds passent de quelques m³/s à plusieurs milliers de m³/s en 02 ou 03 heures seulement. L'inondation de la ville de Oued R'hiou, (le 20 octobre 1993) où 20 minutes de pluies ont fait 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus, est l'exemple parfait de ce type de crues. [MERABET 2006]
- **inondations des grands bassins versants** : elles résultent le plus souvent des précipitations importantes généralisées sur des grandes étendues et caractérisées par leur quantité et leur durée qui peut atteindre 10 à 15 jours. Les crues sont massives, lentes et à évolution facilement prévisibles sauf lorsqu'elles sont brutalement aggravées par des affluents avals plus courts et plus rapides. En Algérie, ce type d'inondation survient généralement en saison hivernale entre les mois de Décembre et Mai. [MERABET 2006]

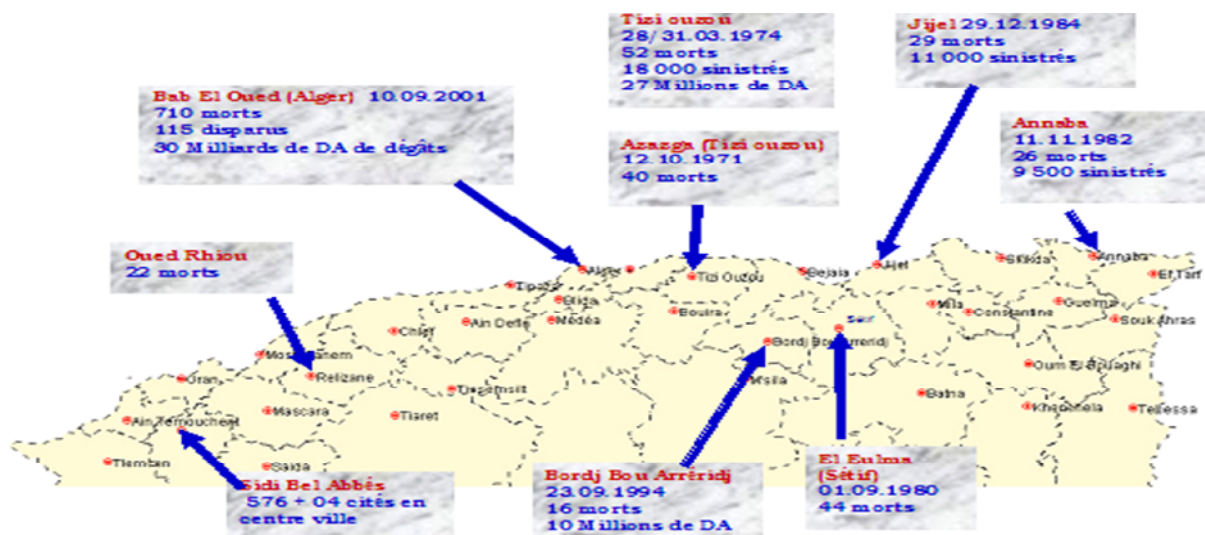


Figure 09 : Cas significatifs des inondations survenues en Algérie. [MERABET 2006]

4. CONNAISSANCE DES ENJEUX ET DE VULNERABILITE

Le terme d'enjeux désigne les personnes habitant la zone inondable, les biens de toute nature, les cultures et les animaux d'élevage, les activités économiques. Tandis que l'étude de ces enjeux consiste à les recenser, les décrire et les localiser, selon des typologies plus ou moins précises. Néanmoins le terme d'enjeux ne devrait pas être réduit à l'existant, il est parfois pertinent d'apprécier le potentiel de développement des zones inondables, on nomme ces enjeux du futur ; les « enjeux de développement ». La distinction entre ces deux natures d'enjeux est la garantie d'inscrire la réflexion sur la politique globale de gestion du risque dans une perspective de recherche d'alternative au développement hors zone inondable, donc de fournir une meilleure base à la concertation. [LEDOUX 2006]

Cependant, il n'existe pas une définition unanimement reconnue du concept de la vulnérabilité même qu'il existe un relatif accord au sein des principales instances internationales (Office of the United Nations Disaster Relief) pour **définir la vulnérabilité comme le degré de perte (de 0 à 100) résultant d'un phénomène susceptible d'engendrer des victimes et des dommages matériels**. La mesure utilisée pour la perte dépend de l'élément menacé : la vulnérabilité peut être mesurée par la proportion de personnes tuées ou blessées par rapport à la population totale, par le coût de la réparation, ou encore par le degré de dommage physique défini par une échelle appropriée. Pour un grand nombre d'éléments, comme la construction, la perte peut être définie en termes de proportion des bâtiments ayant subi un certain niveau de dommage. On constate que les discours et les définitions oscillent entre deux pôles :

- ❖ Soit la vulnérabilité est entendue comme la quantification des enjeux. Mais les méthodes de quantification sont développées dans différentes approches ;
- ❖ Soit la vulnérabilité permet de différencier les différents modes d'occupation du sol, en fonction de leur plus ou moins grande tolérance aux inondations. Là, les approches sont plus techniques, plus opérationnelles. [LEDOUX 2006]

En matière d'inondation, la méthode Inondabilité développée par le CEMAGREF correspond à la réflexion la plus soutenue et la plus aboutie sur le thème de la vulnérabilité. Elle prend en compte la diversité de l'occupation du sol existante et elle tâche d'identifier une échelle de mesure permettant de classer, au moins en valeur relative, les caractéristiques des différents types d'occupation du sol de manière à attribuer à chaque élément de surface une valeur représentative de sa vulnérabilité dans un système commun à l'ensemble de la zone considérée. [LEDOUX 2006]

5. CONCLUSION

L'inondation n'est pas le risque ; le risque exige qu'un phénomène auquel on peut attribuer une probabilité de survenance et une intensité – l'aléa – soit susceptible, en se produisant, de provoquer des dommages. Il faut donc que la zone inondable soit occupée par l'homme. Malgré cela l'importance des enjeux – populations, habitations, équipement...– n'explique pas à elle seule la gravité potentielle de la catastrophe. Celle-ci est également tributaire de la vulnérabilité de ces enjeux, c'est-à-dire leur propension à subir des dommages.

La plupart des experts définissent le risque comme «Risque = aléa * vulnérabilité», alors que d'après cette formule, un même risque peut être le produit d'un aléa fort avec une vulnérabilité faible, d'un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne ou d'un aléa faible et une vulnérabilité forte.

Il est donc préférable de définir le risque d'une façon plus générale «Risque = F (aléa, vulnérabilité)», où F est une relation qui dépend de problèmes analysés, et en représentant l'aléa et la vulnérabilité par deux axes dans un espace plan pour obtenir des courbes d'isorisque (figure 10 et 11).

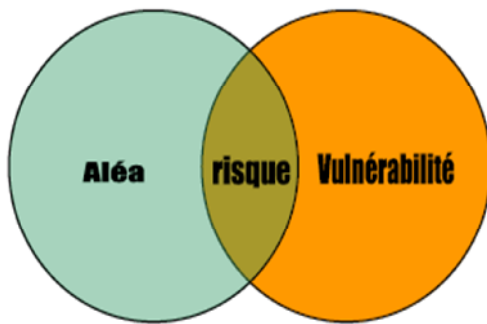


Figure 10 : Risque = F (aléa, vulnérabilité).
[BOUBCHIR 2007]

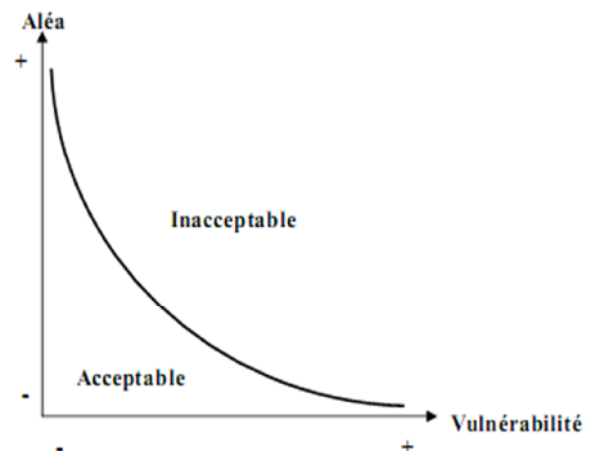


Figure 11 : Courbe d'isorisque.
[CHACHOUA 2009]

Alors, étudier le risque inondation comme un croisement d'un **aléa** et d'**enjeux**, eux-mêmes caractérisés par une **vulnérabilité**, constitue un enrichissement du concept par rapport à la définition trop limitatrice : **risque = aléa**. La réflexion sur la gestion et l'évaluation du risque s'en trouve enrichie, puisqu'elle ne peut plus se limiter aux seules mesures de protections mais doit intégrer celles sur les enjeux et leur vulnérabilité. Donc comment évaluer et gérer ce risque ? Ça c'est ce qu'on va remédier dans le chapitre suivant.

Chapitre 2 : POLITIQUES D'ÉVALUATION ET DE GESTION DU RISQUE INONDATION

1. INTRODUCTION

Les inondations représentent la source de catastrophes naturelles la plus fréquente dans le monde ; ainsi aux Etats Unis, les dommages liés aux tempêtes et crues représentent un cout annuel de l'ordre de 10 milliards de dollars. Aussi en Europe et au cours de la période 1980-2002, les inondations ont essentiellement touchées la France (22%), l'Italie (17%) et la Grande-Bretagne (12%). En conséquence, le nombre de morts provoqués par ce risque concerne l'Italie (30%), puis l'Espagne (20%) et la France (17%). Les pertes économiques les plus importantes ont été enregistrées en Allemagne et en Italie (11 Milliards d'euros pour ces deux pays), suivis par l'Espagne et la Grande-Bretagne (6 Milliards d'euros à eux deux). [LEDOUX 2006, OUFELLA 2003]

Afin de limiter les effets dommageables de ces calamites naturelles, l'amélioration des méthodes d'évaluation et le choix de la politique optimale de gestion apparaissent comme des outils efficaces dans ce cadre. Alors comment peut-on évaluer et gérer le risque inondation ?

Le but principal de ce chapitre est d'offrir une idée générale sur la manière d'évaluation du risque inondation (aléa et vulnérabilité) ainsi que de présenter une stratégie globale de gestion de ce risque.

2. EVALUATION DU RISQUE INONDATION

Puisque le risque inondation est caractérisé par deux composantes l'aléa inondation et la vulnérabilité des enjeux exposés, alors l'évaluation de celui-là se base à la fois sur l'évaluation de ces deux derniers. Ainsi, évaluer le risque inondation veut dire apprécier, estimer, quantifier, calculer et mesurer la valeur de l'aléa, délimiter, localiser, identifier, peser, chiffrer et analyser l'importance de la vulnérabilité.

L'évaluation de la première composante l'aléa inondation bénéficie aujourd'hui de méthodes bien rôdées qui permettent de découper un territoire inondable en zones d'aléa d'intensité plus ou moins forte, en fonction de paramètres hydrauliques (hauteur d'eau, durée de submersion, vitesse d'écoulement) et pour différentes crues. [DEFrance 2009]

Aussi l'étude des enjeux, leur recensement précis et fiable, leur cartographie et leur hiérarchisation en fonction de leur plus ou moins grande vulnérabilité, ont bénéficié au cours des dernières années d'avancées méthodologiques certains, grâce notamment aux systèmes d'information géographique et à l'automatisation du traitement des photographies aériennes. [DEFrance 2009]

2.1. EVALUER L'ALEA « INONDATION » ET SES INCERTITUDES

La prédominance de l'aléa a gommé partiellement la vulnérabilité de l'équation du risque. L'aléa étant le concept phare du risque, comment est-il évalué et quantifié dans le cas du risque inondation et est-ce qu'il y a des incertitudes associées ?

L'évaluation de l'aléa inondation est en quelque sorte appréciée la crue responsable de la formation de l'inondation. Cela veut dire qu'on interpelle deux disciplines principales : l'hydrologie et l'hydraulique fluviale. L'hydrologie est la discipline qui permet d'obtenir les débits et leurs périodes de retour. Tandis que l'hydraulique permet d'obtenir les hauteurs et les vitesses d'eaux correspondantes à ces débits. La combinaison de ces deux disciplines permet donc d'associer des périodes de retour à des niveaux et vitesses d'écoulement en divers points d'un cours d'eau pour obtenir la carte des aléas. [BLIN 2001]

2.1.1. HYDROLOGIE POUR ESTIMER L'ALEA

Lorsqu'on fait appeler la science de l'hydrologie, veut dire quand on fixe la cible sur la détermination du débit de la crue, de sa période de retour et de sa durée de submersion de la crue. En hydrologie, il y a deux approches : l'approche déterministe et celle statistique. L'approche déterministe considère tous les apports et facteurs pouvant influencer le débit (pluie, neige, eau dans le sol, etc.) et les introduit dans un modèle qui estime le débit. Cette méthode n'est pas conçue pour donner une période de retour correspondante au débit trouvé. Ce qui empêche son utilisation dans l'estimation de l'aléa inondation puisque la probabilité des crues est un élément essentiel du calcul du risque. Par contre, elle peut servir à la prévision des crues et conséquemment à la gestion opérationnelle du risque. Tandis que 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. [BLIN 2001]

Alors, le débit, l'élément primordial pour l'estimation de la crue, peut être quantifié par plusieurs méthodes :

- Méthodes par **débitmétrie** : comme les méthodes *volumétriques*, pratiquées que pour des débits très faibles, qui permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient de volume connu, les méthodes *d'exploration du champ de vitesse* qui consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section tout en mesurant la surface de la section mouillée (ces mesures s'effectuent par le jaugeage a

ou par des sondes électromagnétiques), les méthodes basées sur les lois de l'hydraulique dite méthodes *hydraulique* qui tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...) et les méthodes *par dilution* qui consistent à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. [HOSTACHE 2006, BLIN 2001]

- Méthodes par **limnimétrie** : le limnimètre est l'élément de base des dispositifs de lecture et d'enregistrement du niveau de l'eau. Plusieurs types de limnigraphes existent ; les limnigraphes à flotteur, à pression dit aussi *bulle à bulle* ou des limnigraphes qui utilisent des capteurs capacitifs ou des capteurs à ultrasons. Le niveau d'eau est ainsi facilement observable, le passage du limnigramme $H=f(t)$ au hydrogramme $Q=f(t)$ se fait par l'établissement d'une courbe de tarage $Q=f(H)$ (voir Figure 12). Il est nécessaire de vérifier régulièrement la courbe de tarage au cours du temps, pour tenir compte d'éventuelles déficiences de l'appareil de mesure ou modifications de la section du cours d'eau. [HOSTACHE 2006, BLIN 2001]

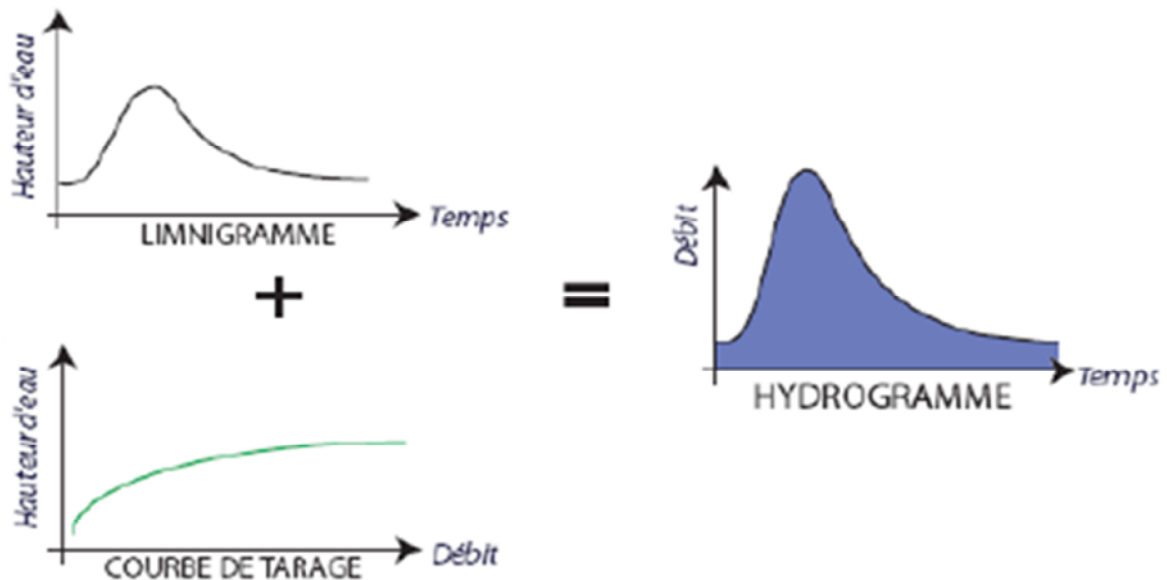


Figure 12 : Hydrogramme de crue obtenu par limnimétrie. [BARROCA 2006]

2.1.2. HYDRAULIQUE POUR QUANTIFIER L'ALÉA

Une fois que l'hydrologie arrive à déterminer le débit, on fait l'appelle à l'hydraulique pour continuer l'évaluation de l'aléa. Cela veut dire qu'on va estimer la hauteur et la vitesse de la crue responsable de l'inondation. En fonction de la rugosité du terrain, la forme de la section en travers et la pente du fond, on peut déterminer la hauteur de l'eau de l'écoulement. Ensuite, lorsqu'on connaît la section en travers de l'écoulement, on peut facilement calculer la vitesse de l'eau.

2.1.3. INCERTITUDES DANS L'ÉVALUATION DE L'ALÉA

Pour évaluer la crue en cas d'inondation, un ensemble d'étude et de choix doit être opéré. A chaque étape, des incertitudes apparaissent, ce qui rend complexe l'estimation de l'incertitude globale. Lorsqu'une incertitude est affichée pour la modélisation de crue, elle correspond généralement à la seule incertitude liée à l'échantillonnage. Cette incertitude affichée oublie l'incertitude de la donnée, l'incertitude liée au choix du modèle statistique, et les incertitudes liées aux modèles hydrauliques qui reposent eux-mêmes sur des données comportant aussi des incertitudes. Et par conséquent, l'erreur globale de l'évaluation de la crue paraît bien difficile à apprécier, ce qui explique peut-être le manque de travaux sur ce thème malgré la profusion de recherches - notamment sur le choix du modèle statistique - liées à des étapes spécifiques. [BARROCA 2006]

2.2. EVALUER LA VULNERABILITE

La prise en compte du risque inondation devra nécessairement passer par la valorisation des études d'évaluation de la vulnérabilité comme base indispensable à la définition des objectifs pour une gestion territorialisée de ce risque. L'évaluation de la vulnérabilité des enjeux est en quelque sorte déterminer, identifier, chiffrer, quantifier, localiser et analyser les effets dommageables de l'aléa sur les enjeux. Différentes démarches méthodologiques permettent d'analyser et d'évaluer la vulnérabilité.

2.2.1. DEMARCHES QUANTITATIVES

Elle se fonde essentiellement sur l'élément vulnérable, il s'agit de mesurer les conséquences dommageables *a priori* d'un phénomène sur les enjeux. La vulnérabilité est ici conçue soit comme le pourcentage de ce qui peut être perdu en cas de sinistre, soit comme le coût économique des dommages probables. Généralement, ces méthodes couplent des modèles hydrauliques avec des relevés de l'occupation du sol, des hypothèses de valeur des biens et des courbes d'endommagement. [BARROCA 2006]

Ainsi les méthodes développées sont de deux types :

- a. Des démarches analytiques *a priori* qui consistent à traduire les vulnérabilités des zones exposées au risque d'inondation en unité monétaire et à réaliser des constats d'endommagement débouchant sur des simulations de sinistres.
- b. Des démarches dites « phénoménologiques » *a posteriori* qui consistent à analyser les vulnérabilités à partir de *retours d'expérience*, à estimer le coût moyen annuel à l'échelle du bassin versant et calculer les dommages potentiels. [BARROCA, POTTIER, LEFORT 2005, BARROCA 2006]

2.2.2. DEMARCHES QUALITATIVES

Dans une approche qualitative, la vulnérabilité apparaît comme la tendance d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel comme l'inondation. Cette propension varie selon le poids de certains facteurs qu'il est nécessaire d'identifier et d'analyser car ils induisent un certain type de réponse de la société. Deux méthodes peuvent être présentées :

a) **Méthode inondabilité du CEMAGREF** : cette méthode construit une quantification dite *objective* du risque permettant d'exprimer sur une carte synthétique un *Risque Maximum Acceptable* ; c'est-à-dire d'accepter de prendre certains risques en échange de certains bénéfices. A chaque type d'occupation du sol correspond ainsi un objectif de protection correspondant au risque maximum acceptable. L'acceptabilité serait une propriété intrinsèque de l'occupation des sols. L'objectif de protection est exprimé à l'aide des critères hydrologiques qui sont : la période de retour, la durée de submersion, la profondeur d'eau et la vitesse de l'eau. La création d'une échelle commune de mesure « *le temps de retour* » pour chacune des variables aléa et vulnérabilité permet d'établir une comparaison explicite de ces variables aboutissant à une mesure du risque, qui distingue :

- ❖ Des zones *sous-protégées* pour lesquelles le risque est dit positif ou à déficit de protection ; $Aléa > Vulnérabilité$;
- ❖ Des zones *surprotégées* pour lesquelles le risque est dit négatif ou à crédit de protection ; $Aléa < Vulnérabilité$. [DEFRANCE 2009, BARROCA 2006, BARROCA, POTTIER, LEFORT 2005]

b) **Techniques hiérarchiques multicritères** : qui a pour objectif de caractériser la vulnérabilité des zones urbaines et des projets d'aménagement exposés au risque à partir du mode d'occupation du sol. La vulnérabilité est appréhendée de manière chiffrée à partir de données qualitatives variées. Chaque critère de vulnérabilité est standardisé, puis pondéré en fonction de son importance supposée. Au final un indice d'évaluation unique définit la valeur de l'occupation du sol en termes d'enjeux économiques et humains. [BARROCA, POTTIER, LEFORT 2005]

3. GESTION DES INONDATIONS

La gestion du risque inondation doit 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. La combinaison de ces deux objectifs est la base d'une démarche cohérente de gestion des inondations.

Pour présenter la gestion des inondations en général, on a choisi pour structurer les idées deux aspects complémentaires qui se différencient par le niveau d'urgence des moyens à mettre en œuvre :

- 1) La prévention et le retour d'expérience : hors contexte de crise,
- 2) La prévision et la gestion de crise : en contexte de crise. [HOSTACHE 2006]

3.1. PREVENTION ET RETOUR D'EXPERIENCE : HORS CONTEXTE DE CRISE

La prévention et le retour d'expérience sont des aspects de la gestion des inondations hors contexte de crise. Ils sont basés sur l'analyse de crues potentielles ou passées afin d'aider la compréhension des phénomènes physiques et de limiter le risque. [HOSTACHE 2006]

3.1.1. PREVENTION FACE AU RISQUE D'INONDATION

La prévention intervient au préalable d'une crise, elle regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes et les biens. En matière 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. Les démarches entamées sont nombreuses mais reposent sur les mêmes principes :

- ❖ La répartition des responsabilités,
- ❖ Les travaux de protection pour réduire l'aléa,
- ❖ La maîtrise de l'urbanisation pour réduire la vulnérabilité.

A. Répartition des responsabilités

Face à ce risque, l'État, les collectivités territoriales, les propriétaires riverains et les habitants localisés dans les zones exposées ont chacun d'eux un rôle à jouer ; l'État et les collectivités territoriales ont un rôle de prévention qui se traduit notamment par des actions d'information et une politique d'entretien et de gestion des cours d'eaux domaniaux. De plus, les collectivités territoriales ont à leur charge la prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme et l'État la réalisation des plans de prévention des risques naturels (PPR) pour les communes les plus menacées. Aussi les propriétaires riverains de cours d'eau non domaniaux ont l'obligation de curer régulièrement le lit, pour rétablir le cours d'eau dans sa largeur et sa profondeur

naturelles, d'enlever les embâcles et débris, pour maintenir l'écoulement naturel des eaux et assurer la bonne tenue des berges. [www.prim.net]

B. Travaux de protection pour réduire l'aléa

La protection consiste en l'aménagement du cours d'eau ou du bassin versant en vue de contrôler le déroulement et les conséquences de la crue : on parle de protection passive. Diverses mesures existent, tels que les enrochements, endiguements, pièges à matériaux, plages de dépôts, etc. Ces protections sont efficaces pour une certaine intensité du phénomène, appelée crue de projet. En cas de dépassement de celle-ci, les protections peuvent être inefficaces, voire dangereuses en cas de rupture. C'est le cas des digues qui peuvent être submergées ou des barrages égaliseurs sur les grands fleuves, dont l'efficacité est faible en cas de crue majeure. [CORTES 2006, www.prim.net]

C. Maîtrise de l'urbanisation pour réduire la vulnérabilité

La maîtrise de l'urbanisation doit s'exprimer à travers deux documents : le document d'urbanisme et le plan de prévention des risques. Dans le premier, le code de l'urbanisme exige d'imposer la prise en compte des risques dans les documents d'urbanisme. Ainsi, les plans locaux d'urbanisme (PLU) doivent refuser ou accepter sous certaines conditions un permis de construire, notamment dans des zones inondables. Le refus concerne les biens économiques, les constructions (privées et publiques), les bâtiments industriels et commerciaux, les réseaux de communication, d'électricité, d'eau, etc. qui peuvent être situés dans les zones exposées. C'est pour cela, il est nécessaire d'effectuer une formation des divers intervenants (architectes, ingénieurs en génie civil, entrepreneurs etc.) en matière de conception et de prise en compte des phénomènes naturels climatiques, aussi que la définition de règles de construction. L'application de ces règles doit par ailleurs être garantie par un contrôle des ouvrages.

Tandis que les plans de prévention des risques (PPR), définissent des zones d'interdiction et des zones de prescription, constructibles sous réserve. Ils peuvent imposer d'agir sur l'existant pour réduire la vulnérabilité des biens. Ainsi, les propriétaires, locataires ou plus simples citoyens, peuvent contribuer à se protéger efficacement et diminuer leur propre vulnérabilité.

L'objectif de ces deux actions est double : le contrôle du développement en zone inondable et par conséquent la réduction de la vulnérabilité, et la préservation des champs d'expansion des crues. [OUFELLA 2003, www.prim.net]

3.1.2. RETOUR D'EXPERIENCE

Le retour d'expérience, ultérieur à la crise, vise à tirer des renseignements des crues survenues par le passé afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu et d'aider la gestion des crues à venir. Dans une démarche d'analyse préventive par retour d'expérience, les données et connaissances disponibles sur les crues passées (mesures hydrométriques, surfaces inondées extraites d'images satellitaires ou de photographies aériennes...) sont analysées afin de comprendre et modéliser les phénomènes physiques. Le retour d'expérience est en particulier mis en œuvre pour une analyse de la vulnérabilité et le découpage spatial des plaines d'inondation en termes d'exposition au risque d'inondation. En conséquence, le retour d'expérience s'avère très utile pour l'amélioration de la prévention des crues. [DEFRANCE 2009, HOSTACHE 2006]

3.2. PREVISION ET GESTION DE CRISE : EN CONTEXTE DE CRISE

Contrairement à la prévention et au retour d'expérience, la prévision et la gestion de crise correspondent à des actions en état d'urgence.

3.2.1. Prévision, en préalable direct d'une crise éventuelle

Elle consiste la modélisation du phénomène naturel et l'observation instantanée et régulière des variables descriptives. Les informations qu'on tire de cette prévision sont de deux types : intensité et probabilité d'occurrence de crue à long terme et valeurs des variables météorologiques en temps réel. [CHACHOUA 2009]

En temps réel, elle 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. Elle s'intéresse à des inondations réelles, en cours de formation, qui risquent d'atteindre des zones vulnérables. En conséquence, elle s'applique aux états d'urgence, qui impliquent une réaction quasiment instantanée afin de fournir des informations très rapidement. Les modèles hydrauliques utilisés pour cela doivent par conséquent être simples à mettre en œuvre avec des temps de calcul très courts. [HOSTACHE 2006]

Alors, la première démarche à entamer pour prévoir le risque inondation est de procéder à l'élaboration d'un inventaire ou d'une carte englobant la délimitation précise des secteurs inondables pour chaque type de crue, la typologie des inondations (intensité, durée, période de retour...), l'ampleur des inondations et l'évaluation des dommages à craindre tant sur le plan matériel qu'humain. La seconde est de mettre en place un service d'annonce de crue qui informe les habitants quelque heures avant d'arriver la crue. [CORTES 2006, OUFELLA 2003]

L'inondation est un risque prévisible dans son intensité, mais il est difficile de connaître le moment où elle se manifestera. Les paramètres participant à la formation des crues sont nombreux, néanmoins l'un d'eux est déterminant : la pluie. La prévision des inondations consiste donc principalement en une observation continue des précipitations. C'est pour cela, il est nécessaire que les centres météorologiques publient quotidiennement une carte de surveillance diffusée par les moyens de transmission d'informations. La surveillance météorologique doit compléter par un suivi des débits dans la plupart des cours d'eau pour transmettre les informations et alerter ensuite la population exposée afin de prendre les mesures de protection envisageables. [CORTES 2006, www.prim.net]

3.2.2. 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. [HOSTACHE 2006]

Pour synthétiser, la Figure suivante présente les différents aspects de la gestion des inondations.

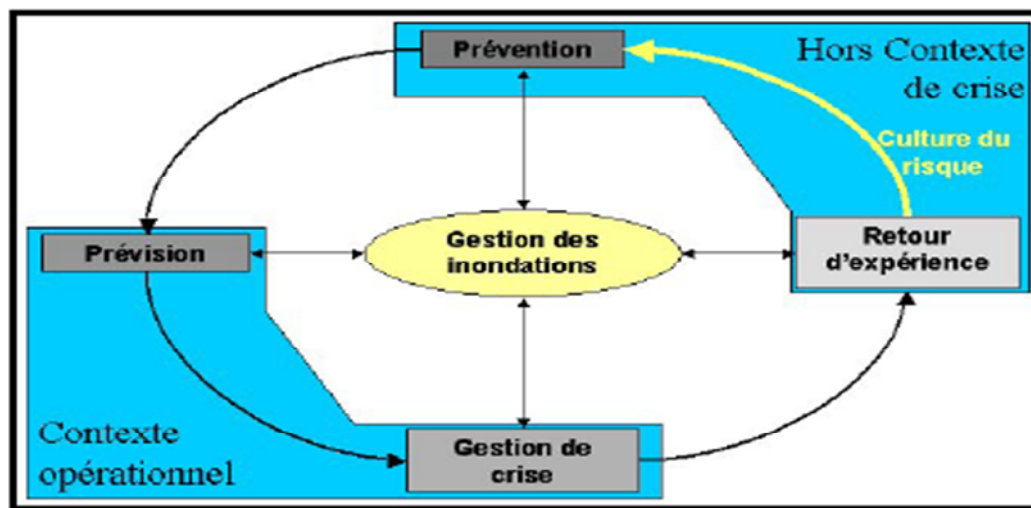


Figure 13 : Champs d'intervention dans la gestion des inondations. [HOSTACHE 2006]

4. POLITIQUE ALGERIENNE DE GESTION DU RISQUE INONDATION

L'Algérie a connu, par le passé, de nombreuses catastrophes naturelles et particulièrement celles liées aux inondations (de Bab El oued du 10 Novembre 2001, de Skikda du 19 janvier 2004 et récemment celles de Ghardaïa du 1^{er} Octobre 2008), qui ont engendré la perte de nombreuses vies humaines et causé des dégâts importants.

La prévention contre ces risques représente un intérêt particulier pour le développement durable du pays. La stratégie Algérienne prise en

au risque d'inondation s'introduit dans la politique générale de prévention des risques majeurs, elle se résume à une politique de prévention basée sur l'évolution de la législation et des comportements ; ce sont les procédures et les règles visant à limiter la vulnérabilité des hommes et des biens face aux aléas naturels.

Le cœur de cette politique préventive est l'institution d'un Plan Général de Prévention (PGP) ; il s'agit de :

- Un établissement de la carte nationale d'inondabilité avec les zones inondables ;
- Mise en place du système de veille et d'alerte.

Ensuite, l'Agence Nationale de Prévention et de Gestion des Risques Majeurs a apparu pour prendre en charge les activités suivantes :

- Proposer les éléments d'une stratégie nationale dans le domaine de la prévention et la gestion des risques majeurs ;
- Mener des études sur les systèmes de gestion des catastrophes naturelles et écologiques ;
- Assister les institutions chargées d'élaborer les plans en matière de prévention et de réduction des risques majeurs ;
- Collecter, traiter, diffuser et conserver les données à caractère scientifique, statistique, technique, économique et social en matière de prévention et gestion des risques majeurs ;
- Contribuer à la formation des compétences nationales chargées de la de prévention et gestion des risques majeurs.

Et enfin et afin de garantir la protection des biens et des personnes, la loi prévoit deux autres mesures importantes :

- Le recours obligatoire au système national d'assurance, dans le cadre des plans ;
- Le recours à la procédure de l'expropriation pour cause d'utilité publique face aux risques majeurs. **[RAHMANI 2004]**

5. POLITIQUES DE GESTION DES INONDATIONS DANS LE MONDE

En matière de gestion des inondations, il est de coutume de considérer que le monde accuse un certain retard par rapport au pays réputés pour leur savoir-faire en la matière : les Etats-Unis et l'Angleterre. Ils se distinguent par l'importance des recherches entreprises et le niveau de développement des méthodes de gestion et d'évaluation des inondations. **[BAROCA, POTTIER, LEFORT 2005, RELIANT, HUBERT 2004]**

C'est aux Etats-Unis que la notion de gestion des plaines inondables (flood plain management) est apparue dans les années 1950 avec les travaux du géographe Gilbert WHITE, véritable précurseur des recherches menées sur ce thème. Les États-Unis ont donné une place très importante à l'échelon fédéral dans la gestion des inondations. Le principal acteur de cette gestion est le Federation Emergency Management Agency (FEMA) et le levier d'action de cette agence est le National Flood Insurance Program (NFIP). [BAROCA, POTTIER, LEFORT 2005, RELIANT, HUBERT 2004]

En Angleterre, la gestion des inondations est divisée en une politique de protection (flood defence) et une politique de maîtrise de l'urbanisation et de l'occupation des sols en zones inondables (floodplain management). La recherche est menée par le Flood Hazard Research Center ; un des premiers centres travaillant sur la problématique de gestion du risque inondation autour d'une équipe interdisciplinaire qui étudie plus spécialement les relations entre les inondations et la société. De nombreux types de dommages ont été étudiés, essentiellement au travers d'approches quantitatives telle que la construction de fonctions de dommages et l'analyse coûts/avantages. [BAROCA, POTTIER, LEFORT 2005, RELIANT, HUBERT 2004]

En France, les risques naturels et particulièrement les inondations sont devenus un objet de politique publique à partir des années 1970, alors qu'ils n'étaient pas auparavant l'objet d'une gestion spécifique. Une analyse historique rapide d'un siècle et demi de gestion des inondations permet de constater que les politiques de gestion de ces risques se sont construites au fil du temps. La première étape consistait à **une politique de sécurité** orientée vers des actions basées sur l'aléa ; que ce soit par construction d'ouvrages de protection essentiellement au travers de digues ou par des actions sur la couverture forestière des bassins versants, ensuite **une politique d'urbanisme**. En général, cette politique s'appuie à la fois sur la loi Barnier de 1995 qui a donné l'impulsion politique qui manquait et la loi Bachelot de 2003 qui a complété la panoplie des outils nécessaire à une bonne stratégie de réduction du risque inondation. [DEFrance 2009, IRIS 2009, BARTHÉLÉMY 2006, OUFELLA 2003]

Les démarches entreprises par les pays du monde dans le cadre de leur lutte contre les inondations sont nombreuses mais reposent sur les mêmes principes.

a) LA REGLEMENTATION : elle devrait prendre en compte les actions anthropiques aboutissant à une modification substantielle du relief, à l'édification de toute construction en zones inondable.

b) LA PRÉVENTION : qui a les principes suivants :

- ❖ Améliorer la connaissance du phénomène : un travail bibliographique est mené afin d'étudier les crues anciennes et modéliser l'impact du phénomène qui pourrait se produire dans le temps.
- ❖ Maîtrise de l'urbanisation : la connaissance du risque est intégrée dans les documents d'urbanisme afin que des zones ne soient pas ouvertes à l'urbanisation lors d'un aléa potentiel capable d'impacter ces zones.
- ❖ Agir sur la limitation de l'aléa et de la vulnérabilité : pour l'aléa, il s'agit de travaux de ralentissement hydraulique. Et pour la vulnérabilité, encourager les autorités locales et les particuliers à prendre des mesures adoptées pour les habitations existantes.
- ❖ Favoriser l'information des populations : grâce aux moyens disponibles. **[DEFrance 2009, IRIS 2009, BARTHÉLÉMY 2006, OUFELLA 2003]**

c) **LA PRÉVISION** : qui s'articule sur les principes suivants :

- ❖ Le suivi du phénomène : analyser aux différentes zones susceptibles de subir une inondation l'ampleur et la typologie de cette inondation ainsi que la délimitation précise des secteurs inondables.
- ❖ La surveillance du phénomène : mise en place d'un service d'annonce et d'alerte des crues.
- ❖ La préparation de la crise : organisation et mise en œuvre des plans de secours

d) **LE RETOUR D'EXPERIENCES** : en analysant comment la gestion de crise s'est mise en œuvre et en étudiant ce en quoi l'événement qui s'est produit, apporte une nouvelle connaissance du risque. **[DEFrance 2009, IRIS 2009, BARTHÉLÉMY 2006, OUFELLA 2003]**

6. CONCLUSION

Du fait que le risque d'inondation est défini par l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité des enjeux exposés, son évaluation se base sur l'appréciation de ces deux derniers. En conséquence, évaluer l'aléa c'est faire assembler l'hydrologie (pour obtenir les débits et leurs périodes moyennes de retour) avec l'hydraulique fluviale (afin d'avoir les niveaux d'eau et les vitesses correspondant à ces débits) pour associer en fin les périodes de retour à des niveaux et vitesses d'écoulement en divers points d'un cours d'eau. Tandis qu'évaluer la vulnérabilité des enjeux exposés c'est quantifier les effets dommageables de l'aléa sur les enjeux, que ce soit par des démarches méthodologiques quantitatives (pourcentage ou coût économique des dommages) ou qualitatives (fonction de l'occupation des sols).

Dans la gestion du risque inondation, il est possible de distinguer la prévention, la prévision et la gestion de crise. 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 mise en œuvre. Tandis que la prévision et la gestion de crise correspondent à des actions en état d'urgence, elles nécessitent des outils opérationnels pour des décisions rapides. 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.

La cartographie du risque inondation dans le cadre de la gestion de ce dernier constitue une question essentielle pour l'urbanisation et l'aménagement du territoire ; dans la mesure où on trouve un territoire qui pourrait être remise en cause par une inondation de grande ampleur, cela sera conditionné l'organisation de cet espace pour garantir sa sûreté et sa cohésion. Ce qui oblige les responsables de l'aménagement du territoire à inciter les autorités locales pour intégrer les cartes des inondations dans leurs documents d'urbanisme. Dans ce sens, quelles sont les outils et techniques d'analyse et de cartographie du risque inondation ? Ça c'est ce qu'on va récolter dans le chapitre suivant.

Chapitre 3 : OUTILS ET TECHNIQUES DE CARTOGRAPHIE DU RISQUE INONDATION

1. INTRODUCTION

La cartographie est définie comme l'ensemble des études et des opérations scientifiques, techniques, et artistiques, intervenant à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation, en vue de l'élaboration, de l'établissement et de l'utilisation de cartes, plans et autres modes d'expression.

La complexité des problèmes liés à l'abondance des données dans un cadre de cartographie du risque inondation (topographie, hydrologie, hydraulique, occupation des sols), nécessite le développement d'interfaces évoluées pour aider l'utilisateur et rendre son intervention plus efficace afin de résoudre les problèmes issus du risque inondation. C'est pour cela, la progression d'outils de cartographie automatiques couplés avec les outils de modélisation hydraulique est une nécessité pour disposer de cartes actualisables contribuant à la gestion du risque inondation. Des programmes de recherche spécifiques sont nécessaires pour faire progresser ce volet et utiliser les capacités de traitement informatique qu'offrent les matériels modernes.

L'objectif principal de ce chapitre est d'exposer les outils et les techniques qui peuvent être utilisés pour cartographier le risque inondation. Il illustre l'utilisation des cartes thématiques du système d'information géographique comme outil de cartographie des zones vulnérables au risque d'inondation. Ces cartes communiquent, expriment des similitudes, des différences, des tendances, des orientations, et jouent un rôle à tous les niveaux d'une étude, comme document de travail, de recherche, d'information et d'aide à la décision.

2. DEMARCHE DE CARTOGRAPHIER DU RISQUE INONDATION

La cartographie du risque inondation sur un territoire donné doit se baser en réalité à la fois sur la création de la carte de l'aléa et de la vulnérabilité. Néanmoins, la conception de la carte de vulnérabilité des enjeux est rare ou superficielle malgré que la vulnérabilité soit évoluée au cours du temps plus rapidement que l'aléa ; c'est donc elle qui fait varier l'ampleur du risque.

2.1. CARTE D'ALEA

On parle de la carte d'aléa ou du zonage de l'aléa lorsque la zone inondable est découpée en secteurs caractérisés par des paramètres hydrauliques différents en cas de survenance d'une crue importante (exemple : zone d'aléa fort pour des hauteurs de submersion supérieures à un mètre, zone d'aléa moyen pour des hauteurs comprises entre 1 mètre et 50 centimètres, zone d'aléa faible pour des h :

centimètres). Ce type de cartes représente le plus souvent une étude préliminaire à l'élaboration du zonage réglementaire.

Ces cartes peuvent être élaborées à différentes échelles et avec différentes approches suivant les objectifs assignés :

- ❖ L'approche historique ;
- ❖ L'approche hydrogéomorphologique ;
- ❖ La modélisation hydraulique. [LEDOUX 2006]

2.1.1. APPROCHE HISTORIQUE

Cette approche consiste à rassembler puis à exploiter l'ensemble des informations disponibles sur les événements passés. Elle s'appuie en premier lieu sur le dépouillement d'archives. Les productions les plus pertinentes sont celles issues d'équipes pluridisciplinaires, qui mobilisent historiens de formation et spécialistes de l'hydrologie. En France par exemple, une collaboration entre historiens, archivistes et hydrologues a permis de reconstituer l'histoire de trois rivières (le Guiers, l'Isère et l'Ardèche) et de dresser une chronologie qualitative des crues depuis la seconde moitié du 18^{ème} siècle. Il est parfois possible de faire appel à des paléohydrologues qui étudient les sédiments et matières organiques des lits majeurs pour dater les dépôts. Ensuite, et à l'aide d'un modèle hydraulique, les chercheurs ont reconstitué des chroniques de débit et évalué l'importance de chaque événement. [LEDOUX 2006]

2.1.2. APPROCHE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE

Cette méthode, qui repose sur une approche naturaliste s'opposant à la modélisation hydraulique, a été mise au point au cours des années 80. Son principe en est simple : les limites externes du lit majeur d'un cours d'eau constituent la courbe enveloppe des crues passées de ce cours d'eau. Elle utilise les cartes topographiques, géologiques, pédologiques, la photo-interprétation stéréoscopique des photographies aériennes et les observations de terrain. Elle permet de déterminer des unités spatiales homogènes traduisant le fonctionnement hydraulique du cours d'eau pour ses différents régimes ainsi que des limites précises séparant ces différentes unités, et permettant d'en assurer la cartographie. La zone inondable dans ce cas englobe des unités fonctionnelles constituant les différents lits : mineur (écoulement hors période de crue), moyen (écoulement des crues inférieures à la décennale), majeur (crues rares, de période de retour supérieure à la décennale, et exceptionnelles). [LEDOUX 2006]

Cette méthode présente l'aléa inondation dans sa dynamique propre, selon sa fréquence, et se développant dans une plaine inondable où soi

organismes-perturbateurs de cette dynamique. Tandis que la simple cartographie de la zone inondable, qu'elle soit obtenue par l'approche historique ou par modélisation, ne rend pas compte de cette dynamique. Or celle-ci est essentielle. C'est pourquoi les résultats des études hydrogéomorphologique devraient être largement valorisés, au même titre que ceux des modélisations hydrauliques. Cependant, cette méthode ne permet pas de déterminer les hauteurs et les vitesses d'écoulement, paramètres hydrauliques essentiels pour élaborer les PPR. En plus qu'en milieu urbain, la difficulté de l'interprétation, liée au fait que les éléments naturels sont le plus souvent masqués, constitue une autre limite de l'approche hydrogéomorphologique. [LEDOUX 2006]

2.1.3. MODELISATION HYDRAULIQUE

Déterminer les zones inondables par l'approche de la modélisation hydraulique veut dire qu'on convoque deux études : hydrologique et hydraulique. La première permet d'obtenir les débits et leurs périodes moyennes de retour et la deuxième permet d'avoir les hauteurs et les vitesses correspondantes à ces débits. [BLIN 2001]

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. Ce débit est utilisé notamment dans la perspective de la modélisation hydraulique. Leur détermination peut s'effectuer de différentes manières. On peut utiliser le débit d'une crue historique correctement renseignée, par les repères des plus hautes eaux enregistrées lors de cette crue ou par les données issues de stations limnigraphiques. On peut mobiliser des analyses hydrologiques, relations pluies-débits découlant du traitement statistique des données pluviométriques, de l'appréciation de la réactivité des bassins versants (notions de coefficient de ruissellement et de gradex), de la vitesse de propagation des crues dans les sous-bassins, des effets de laminage des crues dans les lits majeurs et les retenues existantes. On peut caler une loi de probabilité des débits de pointe de crues (loi des valeurs extrême de type Gumbel ou Fréchet) sur une série plus ou moins longue de valeurs mesurées. On peut utiliser le modèle QdF (débit-durée-fréquence) qui est destiné à la prévention des crues ; il détermine des expressions fréquentielles des débits de crue, son originalité est de faire apparaître de façon explicite la durée du phénomène. Enfin, on peut se servir de connaissances régionales sur les pluviométries et les débits enregistrés dans le passé sur différents bassins versants comparables, notamment à l'aide de formules empiriques reliant le débit à la surface drainée.

L'application de ces méthodes permet ainsi d'associer un débit maximum et une période de retour. [LEDOUX 2006]

La modélisation hydraulique permet d'obtenir par le calcul, dans tous les secteurs exposés, les caractéristiques hydrauliques des écoulements (hauteur d'eau, vitesses du courant) atteintes pour les gammes de débit simulées. Elle permet ensuite de dresser une cartographie des zones inondables à partir du report en plan des résultats hydrauliques. Elle permet enfin de définir et de tester les aménagements hydrauliques, dans le cadre de la gestion globale ou locale des inondations ou de l'amélioration des écoulements. [LEDOUX 2006]

Du point de vue évaluation de l'incertitude totale de la modélisation, Il est difficile d'apprécier la marge d'erreur relative au résultat final. Néanmoins, il était ainsi recommandé de présenter des intervalles de confiance pour les résultats des scénarios de crues (hydrologie) et dans la modélisation hydraulique. [LEDOUX 2006]

2.1.3.1. DONNEES TOPOGRAPHIQUES

La topographie joue un rôle central dans l'élaboration des modèles numériques et dans leur précision, la constitution des données topographiques indispensables à la modélisation hydraulique représente toujours une part très importante du coût global de la modélisation (jusqu'à 50 % de ce coût). La construction du modèle consiste en une succession de profils topographiques en travers du lit mineur et du lit majeur, choisis de façon à bien représenter la géométrie de ces lits, raison pour laquelle on retient des profils plus serrés à proximité des obstacles (ponts, remblais, etc.). La précision et la densité des données topographiques conditionnent en majeure partie l'incertitude des résultats des calculs hydrauliques. Les incertitudes dues au calcul sont négligeables par rapport à celles des données. [LEDOUX 2006]

2.1.3.2. TYPES DE MODELES HYDRAULIQUES

Les modèles hydrauliques sont divisés en deux types en fonction du régime d'écoulement : modèles en régime permanent dits aussi monodimensionnels ou 1D (sans variation du débit dans le temps ni dans l'espace) et modèles en régime transitoire dites aussi bidimensionnels ou 2D (variations du débit dans le temps et dans l'espace le long du cours d'eau notamment par le remplissage ou la vidange du champ d'inondation). Les premiers sont moins complexes : le calcul est fait uniquement le long de l'axe de l'écoulement et on considère que la cote d'eau calculée est valable pour l'ensemble du profil en travers. Ce type de modèle est donc bien adapté à l'écoulement en lit mineur, éventuellement aux lits moyen ou majeur dans le cas où l

homogène. Tandis que les secondes sont plus complexes, ils s'appuient sur des équations particulières, dites de Barré de Saint-venant, qui tiennent compte non seulement du débit de pointe mais aussi du volume écoulé par la crue. Ils sont capables de calculer tous les échanges entre le lit mineur et le lit majeur et à l'intérieur. Ils font appel à une discrétisation bidimensionnelle des équations complètes de l'écoulement. Leur mise en œuvre est plus coûteuse que dans le cas d'autres modèles, mais la performance surtout en milieu urbain est en pleine évolution. [LEDOUX 2006]

Les modèles les plus utilisés actuellement, proposent une complexité intermédiaire entre les modèles 1D et 2D. Au lieu de calculer les échanges entre tous les points des lits mineur ou majeur, on découpe le lit majeur en casiers où le niveau de l'eau est supposé horizontal et chaque casier correspond à un seul point de calcul, souvent placé au centre du casier. C'est en ce point que sont calculées les grandeurs hydrauliques, qui sont des moyennes sur la surface du casier. [LEDOUX 2006]

Cependant, il faut signaler que les écoulements forcément chargés en transport solide n'obéissent pas aux lois classiques de l'hydraulique fluviale et que leur modélisation est beaucoup plus complexe. Des recherches sont encore à développer, sur le thème des écoulements à forte charge solide, jusqu'aux écoulements de laves torrentielles. [LEDOUX 2006]

2.2. CARTE DE VULNERABILITE

La création de la carte de vulnérabilité se limite très souvent à une cartographie basée sur une distinction des différents modes d'occupation du sol en fonction de leur plus ou moins grande tolérance aux inondations. Deux grands types de recensement des enjeux peuvent être identifiés : l'approche zonale et l'approche par entité de biens. La première consiste à cartographier le territoire inondable selon une typologie d'occupation des sols puis à attribuer à chaque zone homogène une densité moyenne de biens. La seconde approche, moins répandue, consiste à recenser chaque enjeu. Elle est plutôt bien adaptée pour les zones faiblement urbanisées et pour les petits territoires.

La typologie la plus courante est la suivante :

- ❖ L'habitat (ou biens des particuliers, intégrant l'immobilier et le mobilier) ;
- ❖ Les activités (ou enjeux économiques) (entreprises commerciales, artisanales, industrielles ; l'enjeu concerne alors le bâtiment, l'outil de production ou le matériel, les stocks, l'activité en terme de chiffre d'affaire, ou bénéfice) ;
- ❖ Les enjeux agricoles (terrains et sièges d'exploitation) ;

- ❖ Les infrastructures (établissements et réseaux d'équipement publics) ;
- ❖ Les enjeux humains. [LEDOUX 2006]

3. METHODES DE CARTOGRAPHIE DU RISQUE INONDATION

Parmi les méthodes existantes les plus connus de cartographie du risque inondation, on peut citer :

- ❖ La méthode de cartographie de Canada-Québec (PDCC) ;
- ❖ La méthode des zones d'assurabilité des USA ;
- ❖ La méthode INONDABILITÉ (France). [BARROCA 2006, BLIN 2001]

3.1. METHODE DE CARTOGRAPHIE DE CANADA-QUEBEC (PDCC)

Cette méthode est utilisée au Québec dans le cadre d'un programme conjoint fédéral-local appelé Convention Canada-Québec, et elle a été reprise par le Programme de Détermination des Côtes de Crue (PDCC) opéré exclusivement par le ministère de l'Environnement du Québec.

La base de cette méthode est exclusivement hydrologique/hydraulique ; elle ne considère que l'aléa et son rapport avec le terrain (seules les zones inondables délimitées par les crues à l'eau libre de périodes de retour de 20 et de 100 ans sont indiquées sur la carte). Elle ne considère aucunement les caractéristiques locales des résidences présentes ou potentielles et néglige ainsi tout l'aspect vulnérabilité qui est pourtant une des variables de base de la définition du risque. [BARROCA 2006, BLIN 2001]

3.2. METHODE DES ZONES D'ASSURABILITE DES USA

Cette méthode américaine ressemble un peu celle utilisée au Québec en ce sens que la carte du risque inondation ne représente que des limites de niveau d'eau en relation avec des aléas de probabilité donnée. La différence tient surtout à la législation et au mode d'intervention applicable dans ces zones.

En effet, les inondations aux États-Unis sont administrées par la « Federal Emergency Management Agency » (FEMA) dans le cadre du « National Flood Insurance Program » (NFIP). Ce programme se base sur un accord entre les communautés locales et le gouvernement fédéral. Il établit que les communautés doivent prendre des mesures d'aménagement des plaines inondables pour réduire les risques d'inondations des nouvelles constructions dans des zones cartographiées spécifiquement désignées, nommées « Special Flood Hazard Area » (SFHA). En échange de quoi, le gouvernement fédéral rend disponible une assurance d'inondation protégeant financièrement ces

communautés contre les pertes dues aux inondations. La cartographie des SFHA est réalisée par la US. Army Corps of Engineers (USACE), et elle est en fait la partie de la plaine inondable d'une communauté qui a une récurrence de 100 ans. Par conséquent, il ressorte deux types de cartes spécifiques à chaque communauté pour représenter les SHFA : la « Flood Hazard Boundary Map » (FHBM) et la « Flood Insurance Rate Map » (FIRM). La première, basée sur des données approximatives, ne fait que donner la limite des SHFA en leur donnant une teinte de gris foncé et sert surtout dans les cas plus urgents. La seconde donne les élévations de base d'inondation et les différentes zones d'assurances du risque en plus des limites de la plaine d'inondation.

Une certaine complexité peut ressortir de cette méthode car elle ne se limite pas à montrer des critères hydrologiques ou économiques mais y présente aussi des critères d'ordre administratif (état des travaux d'aménagement, état des études hydrologiques). Par contre, elle semble être efficace puisqu'elle impose pratiquement la prise de mesures de protection contre les inondations dans les zones de récurrence de 100 ans.

[BARROCA 2006, BLIN 2001]

3.3. METHODE INONDABILITÉ (FRANCE)

Cette méthode adopte une approche intégrée utilisant les deux éléments du risque (l'aléa et la vulnérabilité) tel qu'il est définie précédemment. Pour ce faire, on a choisi une unité de mesure homogène à l'aléa et à la vulnérabilité qui a l'aspect d'une probabilité au dépassement. Ainsi, cette méthode comporte deux aspects qui la distinguent.

- Le premier est la procédure d'estimation de la vulnérabilité laquelle fait intervenir la notion d'acceptabilité des dommages. Cette notion nécessite le recours à diverses formes de négociation et de sensibilisation ; en prenant que le risque nul n'existe pas et en éduquant les intervenants d'accepter les seuils des risques selon leurs probabilités d'occurrence (risque acceptable). Ce seuil d'acceptabilité statistique devient par la suite un objectif de protection (**Variable TOP**). Par exemple, on voudra prémunir les résidences contre les crues de récurrence 100 ans tandis que les récoltes ne seront protégées que contre celles dépassées aux cinq ans seulement.
- Le second aspect consiste à estimer l'aléa dans la même unité de mesure hydrologique ; il s'agit d'évaluer statistiquement et hydrauliquement l'événement initiant le début des dommages sur une parcelle donnée. Cette estimation s'effectue avec un modèle synthétique nommé « QdF » associé à un modèle hydraulique. La valeur statistique représentée est désignée par la **variable TA^r**

On obtient donc pour chaque parcelle, une période de retour équivalente à l'aléa (TAL) qui correspond au début d'inondation et une équivalente à l'objectif de protection (vulnérabilité acceptée) (TOP). Et par conséquent, il est très aisé de procéder à la cartographie de ces deux variables et de les comparer. Ainsi, en faisant la différence entre ceux-ci, on obtient une indication très simple du risque qui est illustré sous forme de pastilles de couleurs apposées sur une carte d'occupation du territoire. Ainsi, on se retrouve avec trois situations possibles pour chaque parcelle:

1. $TOP < TAL$ ce que veut dire que les objectifs de protection sont inférieurs à l'aléa et sont donc suffisants. La couleur verte est alors donnée à la pastille;
2. $TOP > TAL$ ce que veut dire que les objectifs de protection sont supérieurs à l'aléa et sont donc insuffisants. La couleur rouge est alors donnée à la pastille;
3. $TAL > 1000$ ans ce que veut dire que la parcelle est hors de la zone maximum inondée. La couleur jaune est alors donnée à la pastille.

Avec cette carte, nous pouvons ainsi dire de façon simpliste que les aménagistes n'ont plus qu'à faire passer les pastilles de la couleur rouge à la couleur verte ou jaune en intervenant soit sur la vulnérabilité, soit sur l'aléa ou encore sur les deux. L'avantage principal de cette méthode est l'indépendance qui est établie entre l'aléa et la vulnérabilité, Ceci permet de définir un seuil d'acceptabilité du risque spécifique à chaque situation et cela de façon purement socio-économique. Par contre, elle a aussi le défaut de son avantage puisque c'est justement dans cette détermination de la vulnérabilité acceptable que résident les plus grandes difficultés. Au niveau de la cartographie, les résultats sont simples, aisément lisibles et faciles à utiliser. Les cartes demandent une mise à jour régulière pour garder leur valeur. [BARROCA 2006, BLIN 2001]

4. OUTILS UTILISES POUR L'AIDE A LA CARTOGRAPHIE DU RISQUE INONDATION

La création de la carte du risque inondation nécessite des outils et des instruments performants tels que les modèles hydrologiques/hydrauliques, la télédétection spatiale et aérienne et notamment le système d'information géographique.

4.1. UTILISATION DES MODELES HYDROLOGIQUES/HYDRAULIQUES

Les modèles hydrologiques sont utilisés principalement pour prévoir les débits des crues correspondants aux différents périodes de retour d'un territoire donné. Tandis que les modèles hydrauliques 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. Par ailleurs, ils ont besoins d'observations de crues réelles pour s'affranchir la véritable rivière, confirmer les hypothèses et valider la simulation numérique. [HOSTACHE 2006]

4.2. UTILISATION DE LA TELEDETECTION SPATIALE ET AERIENNE (PHOTOGRAPHIE AERIENNE ET IMAGES SATELLITAIRES)

La télédétection est définie comme l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. Les appareils photographiques constituent les capteurs les plus anciens et les plus répandus en télédétection aérienne pour cartographier le risque inondation. Cependant, ils ont subi une avancé très marqué au cours du temps. En effet aux campagnes traditionnelles de couverture systématique par photographies aériennes viennent s'ajouter de plus en plus d'offres commerciales permettant de choisir le type de capteurs (photographie aérienne analogique et maintenant numérique, scanner, laser...) et le type de plates-formes (avions, hélicoptères ...). [RACLOT 2003]

En plus dans les années 1970, il apparait les données spatiales d'observation de la terre issues de télédétection par satellite, elles fournissent des visions objectives aussi bien d'occupation du sol (Google Maps, Google Earth) que des inondations sur de grands territoires (RSO ou ROP). [HOSTACHE 2006]

Que ce soit les appareils photographiques, les satellites imageurs Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) ou optiques passifs (ROP), tous vont permettre d'obtenir des cartes d'inondations qui s'avèrent très utiles dans un contexte opérationnel et qui sont fournies en quelques heures aux utilisateurs habilités afin d'aider les secours et les actions entreprises. Hors contexte de crise, croisées avec les données de l'occupation du sol, ces cartes d'inondations fournissent des informations concernant les conséquences des inondations et la vulnérabilité. Ces images, satellitaires ou aériennes, sont riches d'informations qui peuvent être très profitables à la gestion des inondations et en particulier à la modélisation hydraulique. Par exemple, une caractérisation tridimensionnelle fine, couplée à une modélisation hydraulique, permettrait d'exploiter de façon plus complète les images satellitaires. [HOSTACHE 2006, RACLOT 2003]

4.3. UTILISATION DU SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Le Systèmes d'Information Géographique (SIG) peut jouer un rôle majeur dans le cadre de l'aide à la cartographie du risque inondation ; il autorise la création des cartes (carte d'aléa et de vulnérabilité et regroupe les deux dans une même interface pour faire extraire la carte du risque inondation), l'intégration de tout type d'information, la mieux visualisation des différents scénarios, la mieux présentation des idées et la mieux appréhension de l'étendue des solutions possibles. [ZEROUALI 2005]

5. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE : OUTIL PUISSANT POUR CARTOGRAPHIER LE RISQUE INONDATION

Les enjeux majeurs auxquels nous avons à faire face aujourd'hui ont tous un lien étroit avec la géographie. En conséquence, les bases de données utilisées pour cartographier le risque inondation sont multipliées permettant ainsi l'accès à un ensemble disparate et très large de données physiques (géographie, morphologie, hydrologie, topographie, occupation du sol) indispensables à la caractérisation des inondations. Le premier frein, dans la prise en compte du spatial pour cette cartographie, a sûrement reposé sur des limitations techniques d'acquisition et de gestion de données géographiques. L'apparition des systèmes d'information géographique au milieu des années soixante, exactement en 1964 aux Etats-Unis, et son véritable développement au début des années quatre-vingt, a fortement desserré ces contraintes. [ZEROUALI 2005, RACLOT 2003]

5.1. DEFINITIONS DU SIG

Un Système d'Information Géographique « SIG » est la traduction de l'abréviation anglais GIS qui désigne : *Geographic Information Systems*. C'est un ensemble de données numérique localisées géographiquement et structurées à l'intérieur d'un système de traitement informatique comprenant de matériels, de logiciels, et de processus conçus pour permettre, à partir des diverses sources, de rassembler et de construire, de combiner et d'analyser, de modeler et de gérer, d'élaborer et de représenter cartographiquement la base de données selon des critères sémantique et spatiaux afin de résoudre les problèmes complexes. Il représente un ensemble de documents cartographiques en format numérique auxquels est associée une base de données que l'on peut exploiter à l'aide de requêtes et analyser à l'aide d'opérations pour produire des cartes thématiques. Il a donné naissance à une discipline récente ; la géomatique qui combine la géographie et l'informatique. [ZEROUALI 2005]

5.2. COMPOSANTS DU SIG

Un SIG peut être constitué d'un ensemble de matériels (ordinateurs), de logiciels d'applications, de données géographiques et tabulaires, d'utilisateurs ou exploitants de l'outil et des méthodes qui se traduisent par le respect des règles et procédures propre à chaque organisation (Figure 14). [ZEROUALI 2005]



Figure 14 : Composantes d'un SIG. [ZEROUALI 2005]

Un SIG contient plusieurs couches ; chaque couche contient des objets de même type (*point* ; puits, regard, *ligne* ; routes, cours d'eau, *polygone* ; bâtiments, limites de communes) et chaque objet est constitué d'une forme (géométrie de l'objet) et d'une description. La figure 15 montre un exemple d'organisation du SIG en couches d'information : les villages, les routes et les cultures. [ZEROUALI 2005]

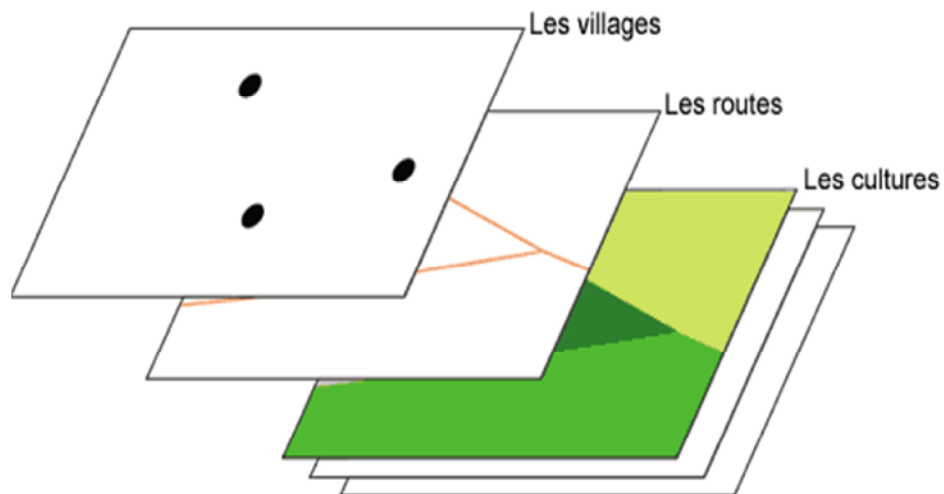


Figure 15 : Organisation des couches d'information dans le SIG. [ZEROUALI 2005]

5.3. STRUCTURE DU SIG

La structure d'un SIG peut être représentée en quatre groupes (figure 16) ; l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la gestion de la base de données, l'analyse spatiale (traitement et exploitation) et la présentation des résultats sous forme cartographique. [ZEROUALI 2005]

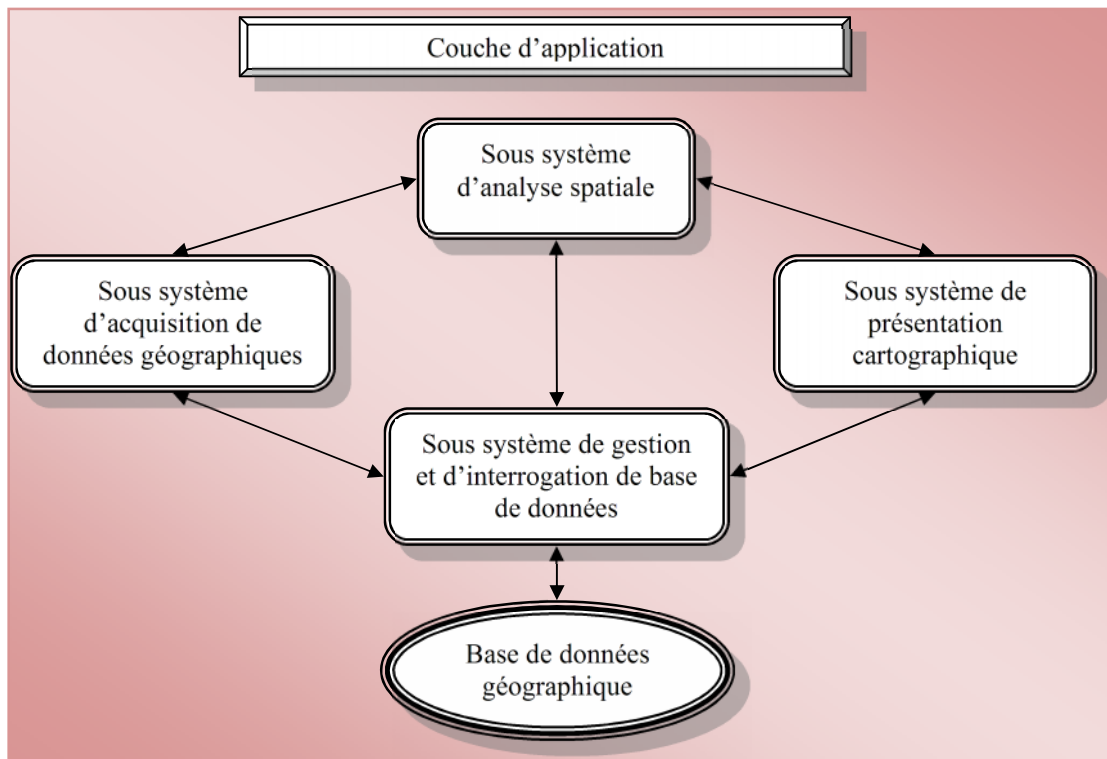


Figure 16 : Structure d'un SIG. [ZEROUALI 2005]

5.4. FONCTIONNALITES DU SIG

Un SIG permet de générer dans des délais raisonnables, des produits cartographiques : cartes, tableaux, graphes pouvant permettre de répondre à certaines questions essentielles et pratiques de gestion et de planification. Il comprend des outils de saisie, de stockage, d'analyse et d'affichage de données spatiales. Les principales fonctions d'un SIG sont résumées comme suit :

- ❖ Collecte, la production et la gestion de données géographiques : il s'agit de créer une base de données pour en permettre la consultation en divers types d'utilisation, de disposer ces données dans un système de référencement et de les convertir d'un système à un autre, de superposer deux cartes de sources différentes, de fusionner tous les objets ayant une caractéristique commune ;
- ❖ Edition de cartes et de graphiques : veut dire produire des cartes thématiques ou autre documents graphiques ;

- ❖ Optimisation de flux : il s'agit de chercher du chemin optimal dans un réseau à partir d'un ensemble de contraintes imposées.
- ❖ Choix du lieu d'implantation d'installation : trouver le meilleur site pour implanter une digue de protection contre les inondations par exemple. [ZEROUALI 2005]

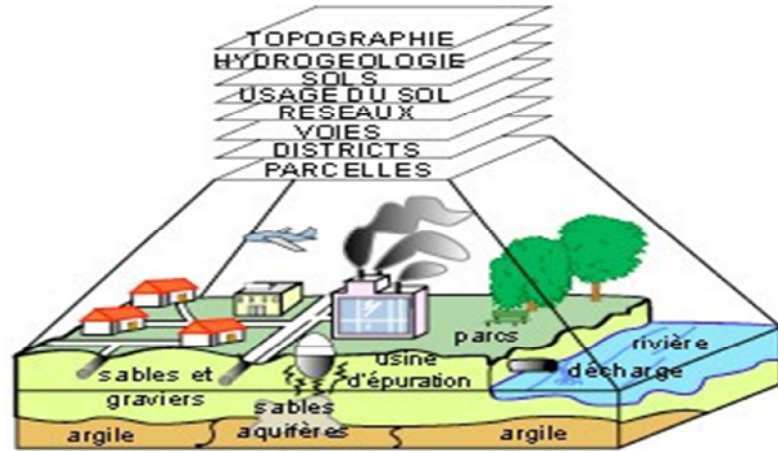


Figure 17 : Fonctionnalités d'un SIG. [ZEROUALI 2005]

5.5. DONNEES DANS UN SIG

Les données dans un SIG peuvent être s'identifiées par leur type, leur mode et leur méthode d'acquisition.

5.5.1. TYPES DE DONNEES DANS UN SIG

Pour qu'un objet spatial soit prêt à être utilisé par un SIG, deux données doivent être fournies : données spatiales et associées. [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

a) DONNEES SPATIALES

Elles déterminent les caractéristiques spatiales d'une entité géographique définissant ainsi la position dans l'espace, la forme (point, ligne, polygone) et la taille (périmètre, surface) de cette entité. [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

b) DONNEES ASSOCIEES

Ces données permettent de compléter la représentation spatiale de l'entité géographique, elles renferment les données de classification (ranger l'entité), d'identification (numéro permettant d'identifier l'entité) et les données attributaires (information propre à chaque objet identifié). [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

5.5.2. MODES DE DONNEES DANS UN SIG

La prise de documents cartographiques dans un SIG, peut se faire de deux modes différents : mode vecteur et mode raster (figure 17). [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

a) MODE VECTEUR

Dans ce mode, les objets spatiaux peuvent être représentés sur une carte par des points, des lignes ou des polygones décrivant ainsi seulement le contour des objets. Ce mode présente les avantages qu'il a une meilleure adaptation à la description des entités ponctuelles et linéaires, une facilité d'extraction de détails et une simplicité de transformation de coordonnées. Tandis qu'il a l'inconvénient de la difficulté de croisement des couches d'information. [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

b) MODE RASTER OU TRAME

Ce mode, appelé également modèle matriciel, décrit la totalité de la surface cartographique point par point. Il est utilisé principalement dans les systèmes à balayage (scanner, capteurs en télédétection...). Il a l'avantage qu'il présente une meilleure adaptation à la représentation des détails surfaciques. Tandis qu'il a les inconvénients de la mauvaise adaptation à la représentation des détails linéaires (obligation de parcourir toute la surface pour extraire un détail) et l'impossibilité de réaliser certaines opérations topologiques (la recherche du plus court chemin dans un réseau par exemple). [ZEROUALI 2005, BOB, ANDY 2001]

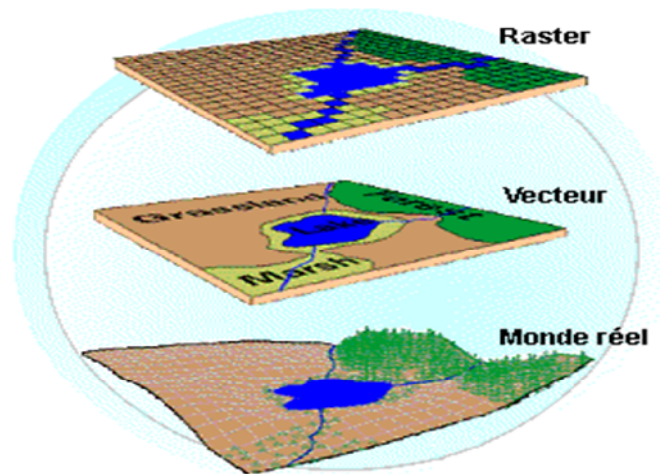


Figure 18 : Modèle vecteur et raster. [ZEROUALI 2005]

5.5.3.METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES

Les données utilisées dans un SIG sont directement mesurées sur terrain (levés topographiques) ou captées à distances (photos aériennes ou satellitaires) ou encore saisies à partir de cartes existants. Alors, pour intégrer ces données hétérogènes de qualité, de fiabilité, de précision et d'extension spatiale bien différente dans un SIG, différentes méthodes d'acquisition peuvent se présenter. [ZEROUALI 2005]

a) NUMERISATION (DIGITALISATION)

Ce mode permet de récupérer la géométrie des objets sur une carte préexistante. Il consiste à faire évoluer un curseur sur une carte posée sur une table à digitaliser et préalablement calée en coordonnées. La table est réceptive aux signaux électriques émis par le curseur pour les localiser sur le plan de la table. [ZEROUALI 2005]

b) BALAYAGE ELECTRONIQUE (SCANNERISATION)

Ce mode est plus rapide que la digitalisation manuelle, il saisit la géométrie d'un plan existant à l'aide d'un scanner. [ZEROUALI 2005]

c) PHOTOGRAMMETRIE AERIENNE

Cette méthode est utilisée pour constituer les cartes à moyenne échelle dans les pays dont la couverture cartographique est déficiente ou pour la constitution de plan à grand échelle pour un coût avantageux. [ZEROUALI 2005]

d) IMAGES SATELLITAIRES (TELEDETECTION)

Il s'agit d'utiliser soit les photographies aériennes, soit les images enregistrées et transmises par satellite ; le plus souvent sous forme numérique dont le traitement géométrique permet de calculer également la position de tout point visible sur les images. [ZEROUALI 2005]

e) IMPORT DE FICHIERS

C'est une façon de réduire le coût de saisie par récupération des données existantes et de les convertir au format, au système d'unité et au système de projection souhaité. Pour cela, on utilise des interfaces qui permettent soit de transformer directement ces données dans le format interne du SIG récepteur grâce à des bibliothèques de conversion, soit de passer par l'intermédiaire d'un format d'échange reconnu par une fonction d'importation de données du SIG récepteur. [ZEROUALI 2005]

5.6. AVANTAGES ET CONTRAINTES DU SIG**5.6.1. AVANTAGES**

- ❖ Capacité de stockage, combinaison de données de sources différentes et rapidité de restitution des données ;
- ❖ Précision des processus cartographiques et facilité de mise à jour (outil de suivi) ;
- ❖ Analyse des relations spatiales (intégration, requête spatiale, combinaison et superposition de cartes) et production de cartes. [ZEROUALI 2005]

5.6.2. CONTRAINTES

- ❖ Coût élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables ;
- ❖ Non standardisation des formats de données ;
- ❖ Nécessité d'une mobilisation contenue des acteurs. [ZEROUALI 2005]

5.7. DOMAINES D'APPLICATION DU SIG

Un SIG est un outil fiable à la main du gestionnaire administrateur qui doit bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions. Il peut être employé dans les domaines suivants :

- ❖ La gestion foncière et cadastrale (recensement des propriétés, calcul de surface) ;
- ❖ La planification urbaine (plan d'occupation des sols et d'aménagement) ;
- ❖ La gestion des transports (voies de circulations, signalisation routière) ;
- ❖ La gestion des réseaux (assainissement, AEP, gaz, électricité, téléphone...) ;
- ❖ La gestion du patrimoine (espace verts, Parcs, jardins...) ;
- ❖ Les applications topographiques (travaux publics et génie civil) ;
- ❖ La gestion des ressources naturelles (protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques ou hydrographiques) ;
- ❖ La gestion des inondations (cartographie des zones vulnérables aux inondations). [ZEROUALI 2005]

6. Conclusion

La cartographie du risque inondation, c'est porter un regard nouveau sur les phénomènes des crues et des inondations, c'est non seulement prendre en compte leur dimension spatiale, mais aussi appréhender les interactions du sujet avec les territoires étudiés. Elle requiert, au préalable, une série d'études conduisant non seulement à la cartographie d'aléas mais aussi de vulnérabilités. La gestion et le traitement de ces informations sont grandement facilités par l'utilisation de systèmes d'informations géographiques (SIG) qui représente un outil fiable à la main des responsables décideurs qui doivent bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions.

La procédure de cartographie du risque inondation est illustrée dans la figure suivante (figure 19).

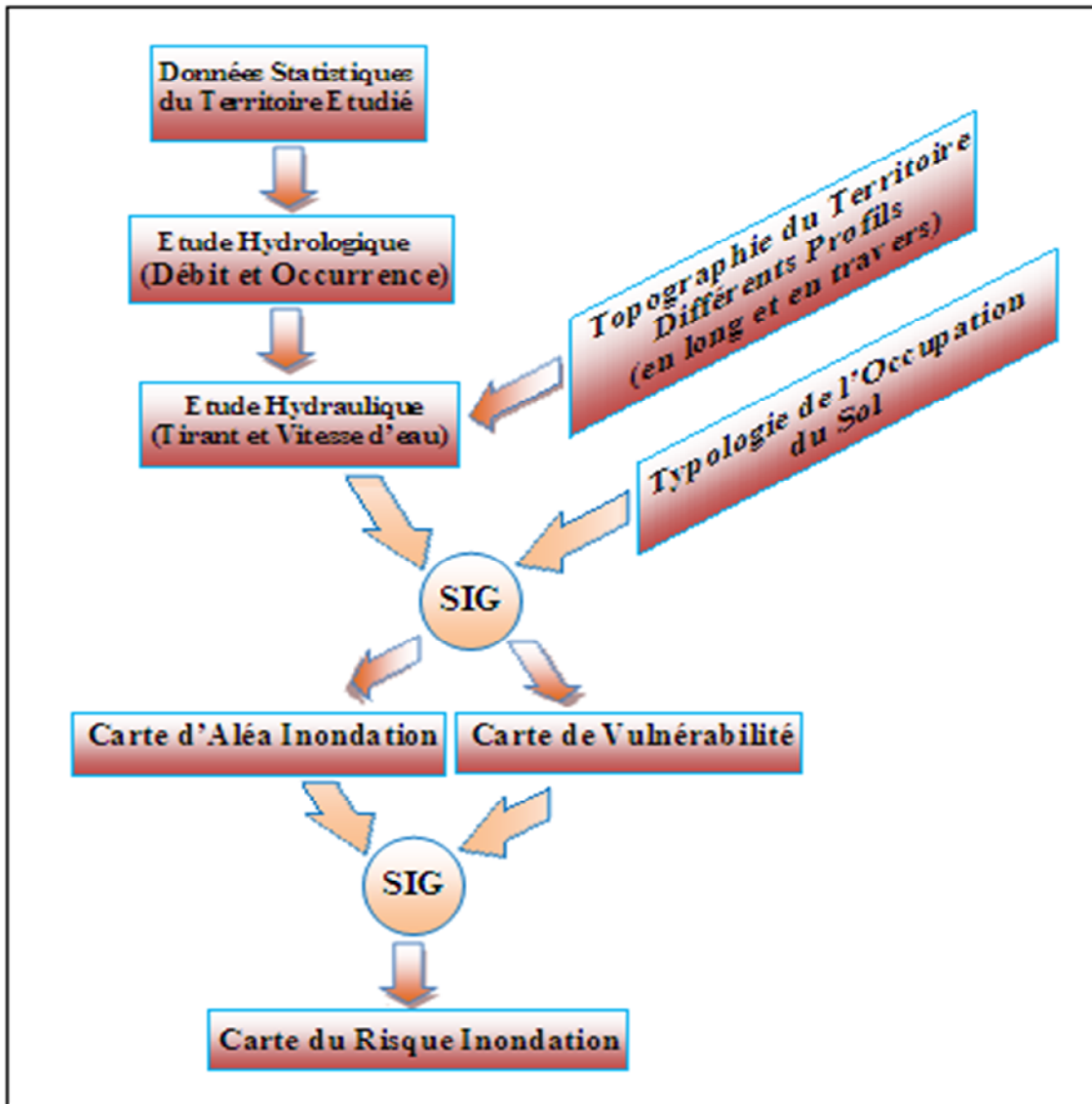


Figure 19 : Procédure de cartographie du risque inondation.

Chapitre 4 : CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION PAR APPROCHE DE MODELISATION HYDRAULIQUE ; CAS DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES

1. INTRODUCTION

Les plaines alluviales que traversent les rivières sont très intéressantes pour la population riveraine. Elles sont fécondes ; ce qui favorise le développement des cultures. En plus, la proximité d'une rivière a fourni un approvisionnement facile en eau et un moyen adéquat d'évacuation de rejets. Néanmoins, à de rares intervalles et en période de hautes eaux, les plaines alluviales servent à absorber et écouler les eaux en crue qui excèdent la capacité du lit de la rivière. Il faut donc comprendre que malgré son intérêt, l'occupation des plaines inondables comporte le risque d'inondation.

Les inondations paraissent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dévastatrices en Algérie. Touchant plusieurs régions atteignant parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale. Pour remédier à cette situation, l'élaboration d'une carte des zones inondables serait un outil précieux pour les planificateurs dans la définition des plans d'occupation des sols, la construction des ouvrages de protection et l'amélioration des systèmes de prévision et d'alerte de crues.

L'objectif principal de ce chapitre est de faire une synthèse bibliographique sur la cartographie de l'aléa inondation en milieu urbain par approche de modélisation hydraulique, ainsi d'exposer les capacités des outils informatiques dans la cartographie des résultats présentant ainsi un outil très ambitieux en matière de l'aide à la décision dans un contexte de gestion de risque.

La démarche est appliquée comme exemple sur l'agglomération de Sidi Bel Abbes, et effectuée à l'aide du logiciel HEC RAS comme instrument de modélisation hydraulique et du système d'information géographique comme outil de cartographie des zones exposées. Ce choix est bien argumenté puisque la ville de Sidi Bel Abbès est confrontés continuellement aux inondations générées par les crues d'oued Mekerra, le modèle (1D) HEC-RAS montrera bien sa capacité en matière de représentation de l'étendue de l'inondation et le système d'information géographique permettras de bien spatialiser les éléments exposés à ce risque et par conséquent aboutir à une meilleure décision pour leur gestion.

L'évolution du travail commence par une étude hydrologique qui sert à prévoir les débits des crues d'Oued Mekerra correspondants aux différentes périodes de retours. Ensuite, une étude hydraulique qui consiste à avoir les hauteurs d'eaux correspondantes à ces débits prévus. Et enfin la cartographie des résultats de la modélisation hydraulique en vue de réaliser le zonage des aléas.

2. PRESENTATION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE

Les inondations catastrophiques dans la wilaya de Sidi Bel Abbès sont liées aux crues de l'oued Mekerra qui est le cours d'eau le plus important du réseau hydrographique. Notre zone d'étude concernera plus particulièrement le territoire de la ville de Sidi Bel Abbès qui est l'agglomération la plus affectée par ces calamités.

2.1. PRESENTATION DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES

La ville de Sidi Bel Abbès est située au Nord-Ouest de l'Algérie, à 75 kilomètres au Sud d'Oran. Depuis 1974, elle a considéré comme Chef-lieu de la wilaya de Sidi Bel Abbès qui est délimitée par la wilaya d'Oran au Nord, d'Ain Témouchent au Nord-Ouest, de Mascara au Nord-Est, de Tlemcen à l'Ouest, de Saida à l'Est et de Naama et El Bayadh au Sud. La wilaya a une superficie de 9150 km² et comprend 52 communes regroupées en 15 daïras dont la daïra et la commune de Sidi Bel Abbès. [MERABET 2006]

La ville de Sidi Bel Abbès, qui est une région agricole avec quelques industries, couvre une superficie d'environ 2 237 ha, sa population est estimée à environ 300 000 habitants en 2006, ce qui en fait la 5^{ème} grande ville du pays. Elle est confrontée continuellement aux inondations générées par les crues de l'oued Mekerra.¹

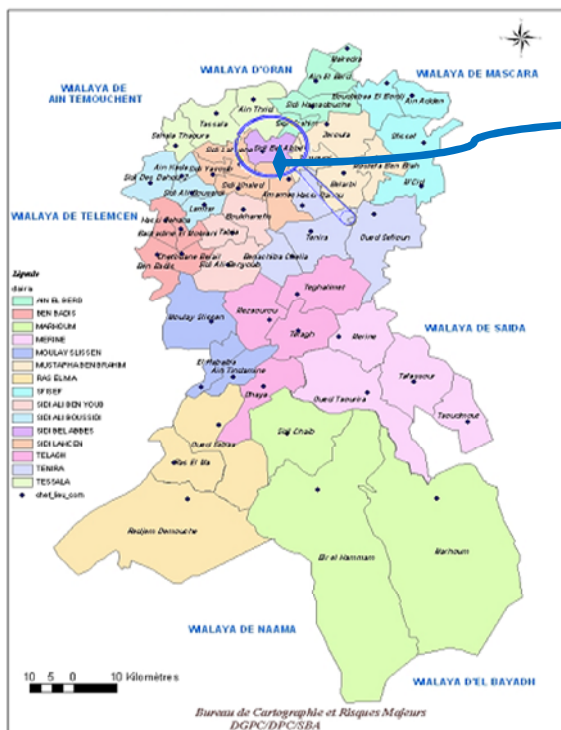


Figure 20 : Décomposition administrative de la wilaya de Sidi Bel Abbès.

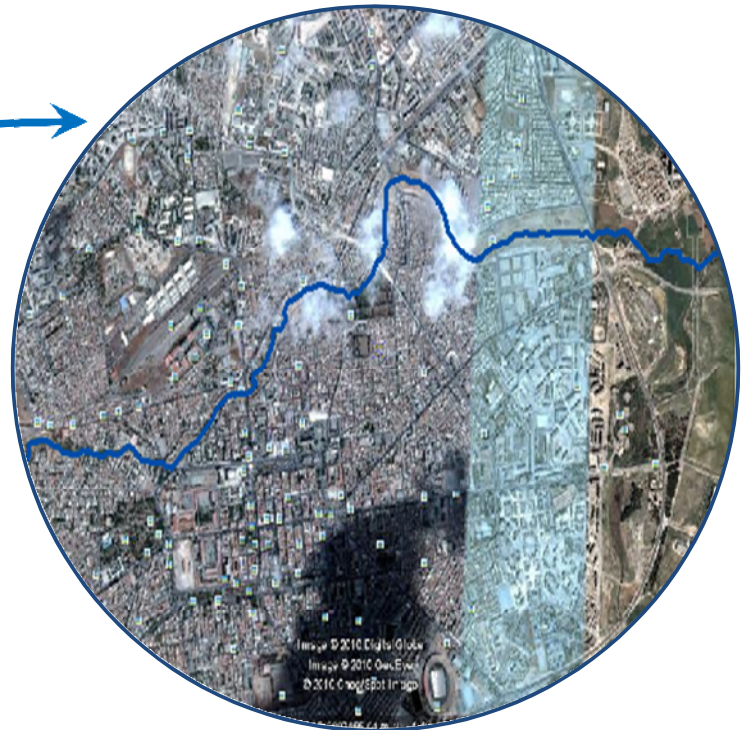


Figure 21 : Vue générale de la ville de Sidi Bel Abbès à partir de Google Earth.

¹ Consulté le <http://algeriaspace.blogspot.com/2009/05/photos-ville-de-sidi-bel-ab>

2.2. CONTEXTE TOPOGRAPHIQUE

Les écosystèmes de la wilaya de Sidi Bel Abbès présentent une grande diversité ; zones montagneuses, plaines et steppiques. La zone Montagneuse occupe 24,6 % de la superficie totale ; au Nord, on trouve les monts de Tessala–Beni Chougrane qui sont fortement érodés et occupés par des céréalicultures. Dans la partie centrale, on trouve les monts de Dhaya qui sont fortement boisés à 40% du domaine forestier de la wilaya. La zone plaine, insérée entre ces zones montagneuses, couvre une superficie de 35,4 % du territoire de la wilaya. On y retrouve deux zones distinctes : les plaines de Sidi Bel Abbès qui occupent environ 65 % de la superficie des zones plaines avec une altitude variée entre 400 et 800 m, et les hautes plaines de Télagh qui couvrent environ 35 % de cette superficie dont l'altitude varie entre 400 et 1000 m. Et enfin la zone steppique, située au Sud de la wilaya, qui couvre 40 % de la superficie totale, c'est une vaste plaine quaternaire à relief relativement plat. [MERABET 2006]

2.3. OCCUPATION DU SOL

L'urbanisation dans le bassin de la Mekerra est faible et concentrée autour de petites villes implantées le long de l'oued Mekerra (Ras El Ma, El Haçaïba, Mouley Slissen, Sidi Ali Benyoub, Boukhanéfis, Sidi Khaled, Sidi Lahcen et Sidi Bel Abbès). Seulement (20%) du bassin est couvert de forêts, principalement au niveau des massifs montagneux compris entre El Haçaïba et Mouley Slissen ainsi que dans les zones collinaires non cultivables qui sont constituées essentiellement de pins d'Alep et de chênes verts. A l'amont de Ras El Ma, près de 80% du bassin versant mis en valeur est occupés par des cultures céréalières. Entre Ras El Ma et El Haçaïba, où l'alfa couvrait par le passé des surfaces importantes, a été remplacé par des cultures céréalières. Entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès, les cultures céréalières sont en général associées à des cultures secondaires types vergers ou oliveraies. [HALLOUCHE 2007]

2.4. CONTEXTE CLIMATIQUE

La ville de Sidi Bel Abbès appartient à l'étage bioclimatique méditerranéenne semi-aride à influence continentale. Elle se caractérise par un climat humide et froid en hiver, sec et chaud en été, le printemps et l'automne sont de courtes durées. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15 °C, le nombre moyen interannuel de jour de gelées est de l'ordre de 35 jours et la quantité moyenne inter annuel de la précipitation est de l'ordre de 390 à 400 mm. [MERABET 2006, YAHIAOUI 2009]

2.5. CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Le bassin de la Mekerra est situé au Nord-Ouest du territoire algérien, il fait partie du bassin de la Macta. L'Oued Mekerra prend sa source dans la zone des hauts plateaux au Sud de Ras El Ma, à partir de Djebel Rharbal (1189 m), Djebel El Kemit (1265 m) et Djebel Marhoum (1250 m), jusqu'à la ville de Sidi Bel Abbès à une longueur de 83.7 km. Il draine une surface de 1812 km² et un périmètre de 216.7 km.

Du point de vue géomorphologique, ce bassin peut être subdivisé en trois parties :

1. **Haute Mekerra** : s'étend depuis le Sud de Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub.
2. **Moyenne Mekerra** : comprise entre Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbès.
3. **Basse Mekerra** : correspond à toute la partie du bassin située en aval de la ville de Sidi Bel Abbès. [MAREF 2010, HALLOUCHE 2007]

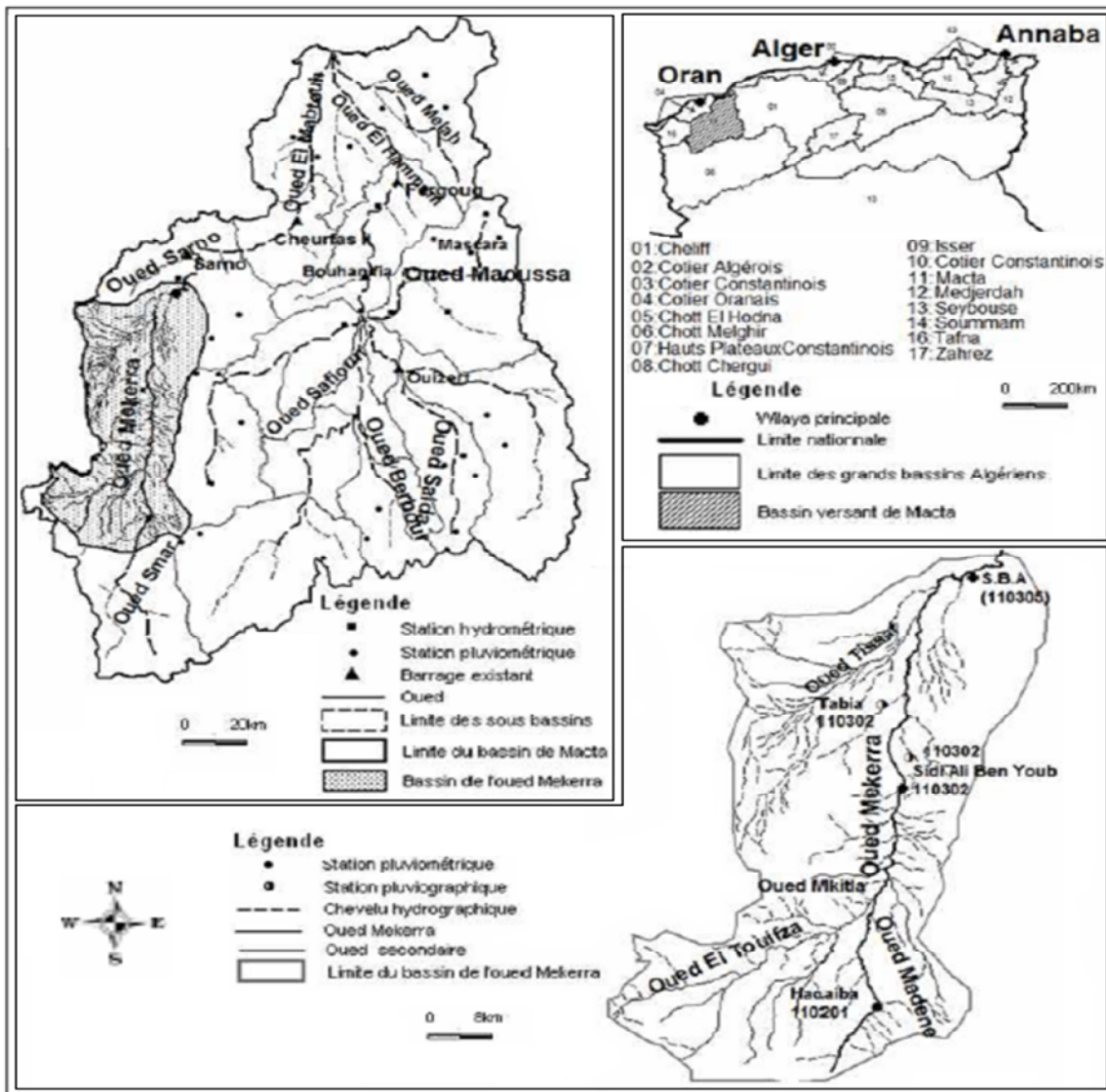


Figure 22 : Géographie du bassin versant de l'Oued Meke.

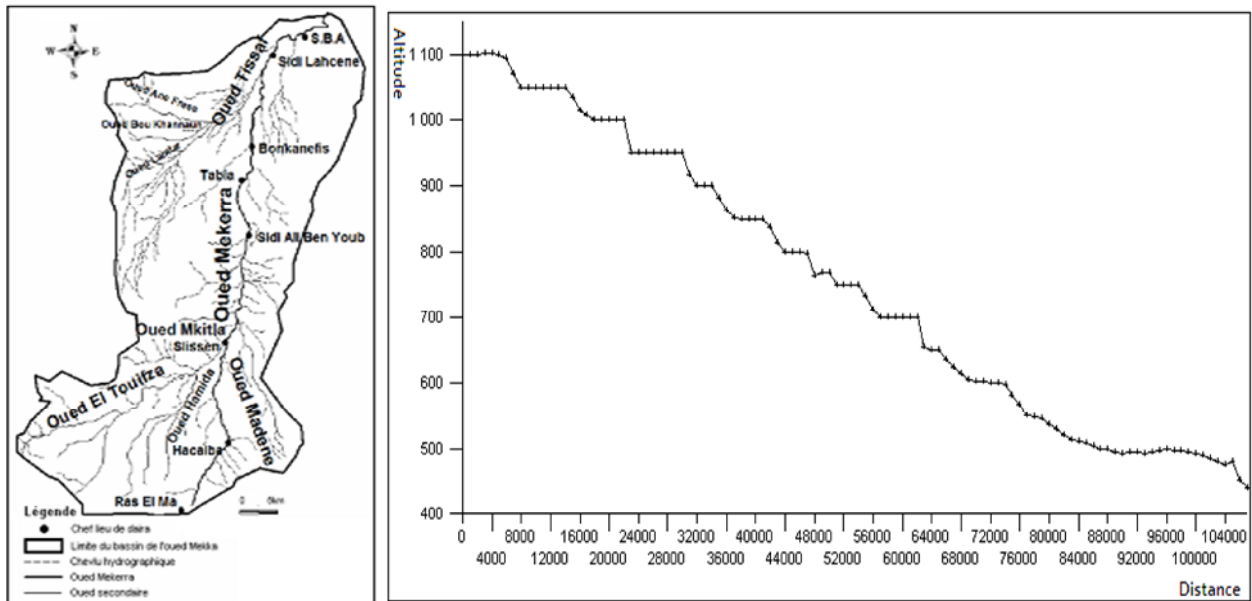


Figure 23 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Mekerra et profil en long d'Oued Principal. [MAREF 2010]

Ce bassin peut être subdivisé en trois grandes sections en fonction de leur rôle :

- Zone de production ou de réception : entre la source de l'oued et Mouley Slissen,
- Zone de transfert : de Mouley Slissen à Boukhanéfis,
- Zone d'expansion : de Boukhanéfis à Sidi Bel Abbés. [MAREF 2010, HALLOUCHE 2007]

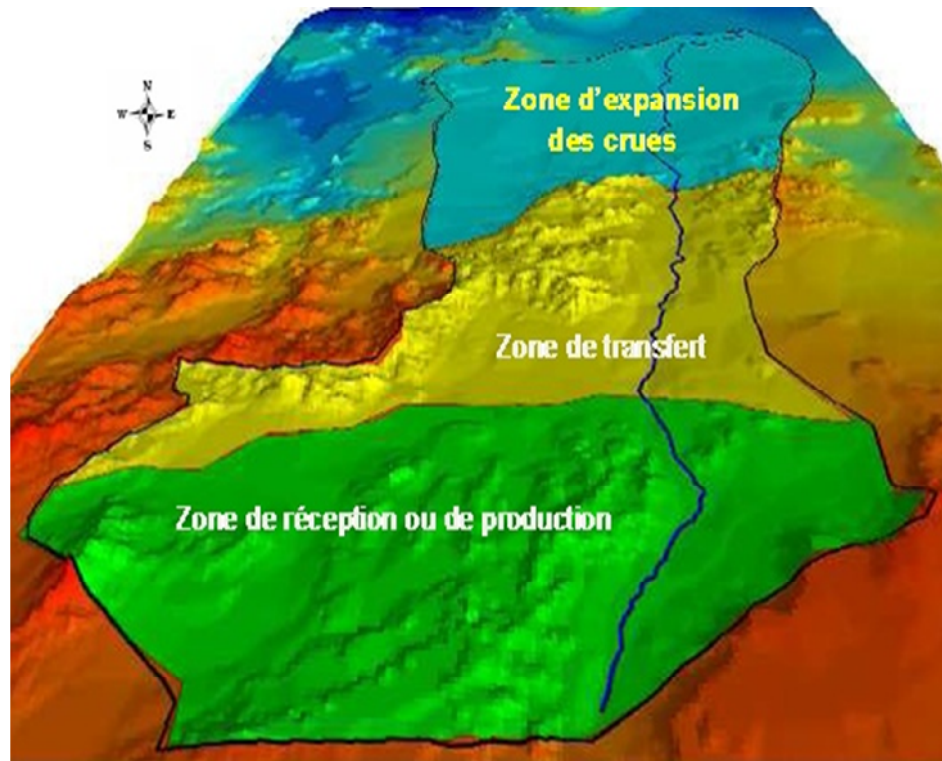


Figure 24 : Organisation hydrogéomorphologique du bassin versant de l'Oued Mekerra. [MAREF 2010]

Des informations récapitulatives concernant la morphométrie et l'hydrométrie du bassin versant de l'Oued Mekerra sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 01 : Caractéristiques morphométriques et hydrographiques du BV de la Mekerra.

Caractéristiques		symboles	unité	valeurs
Superficie du B V		A	Km ²	1812
Périmètre du B V		P	Km	216.7
Indice de compacité		KC	/	1.93
Rectangle équivalent	Longueur	L	Km	161.36
	Largeur	l	Km	16.50
Altitudes	Maximal	H _{max}	m	1600
	Minimal	H _{min}	m	400
	Moyenne	H _{moy}	m	917.39
	Médiane	H _{med}	m	1080
Indice de pente	De Roche	IP	%	3.836
	Globale	Ig	%	0.0452
Pente moyenne		I _{moy}	%	0.743
Densité de Drainage		Dd	Km/Km ²	0.625
Coefficient de Torrentialité		Ct	/	0.057

La pente moyenne de l'oued de Ras El Ma jusqu'à Sidi Ali Benyoub est d'environ 0,9 à 1,64 % et elle est de 3 à 8 % entre Boukhanéfis et Sidi Bel Abbès. La pente de l'oued de Ras El Ma jusqu'à Sidi Bel Abbès est la principale cause des inondations dans la plaine. [MAREF 2010, HALLOUCHE 2007]

2.6. AMENAGEMENTS DE PROTECTION DE LA VILLE DE SIDI BEL ABBES CONTRE LES INONDATIONS

Ces aménagements sont étudiés à court et à long terme.

- a) **A COURT TERME** : Ceux-ci sont destinés à la protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre un débit décennal. Parmi lesquels, on peut citer :
- 1) L'aménagement du bassin versant amont et cela par construction des banquettes dans les zones à forte pente, sauvegarde du patrimoine végétal naturel, et prévoir des reboisements dans le massif montagneux du bassin. [MERABET 2006]
 - 2) La création de zones d'épandage sur deux des principaux affluents de l'oued Mekerra à savoir : l'Oued Mouzen, avec une zone d'épandage de 2 millions de m³ de capacité, et l'Oued Mellah avec une capacité de 2.4 millions de m³. [BENMANSOUR 2009]

3) L'augmentation de la capacité de transit des eaux dans la ville de Sidi Bel Abbès ; en réalité, il ne paraît pas intéressant de recalibrer l'oued en élargissant sa section (emprise limitée du fait de l'urbanisation importante des berges), mais plutôt d'optimiser la capacité de l'oued en limitant les interventions aux emprises actuelles afin d'obtenir une capacité homogène sur toute la longueur du tracé. les interventions sont principalement : suppression au maximum des ouvrages limitateurs (ponts, canalisations, habitations à protéger ou démolir,...), amélioration de l'état des surfaces du lit de l'oued pour diminuer sa rugosité et favoriser les écoulements et rectification de la pente de l'oued. **[BENMANSOUR 2009, MERABET 2006]**

La section en travers actuelle de la partie aménagée de l'Oued Mekerra dans sa traversée de Sidi Bel Abbès a une forme trapézoïdale de 16 m de large au miroir, 10 m en fond et une hauteur totale comprise entre 3 et 4 m. **[MERABET 2006]**

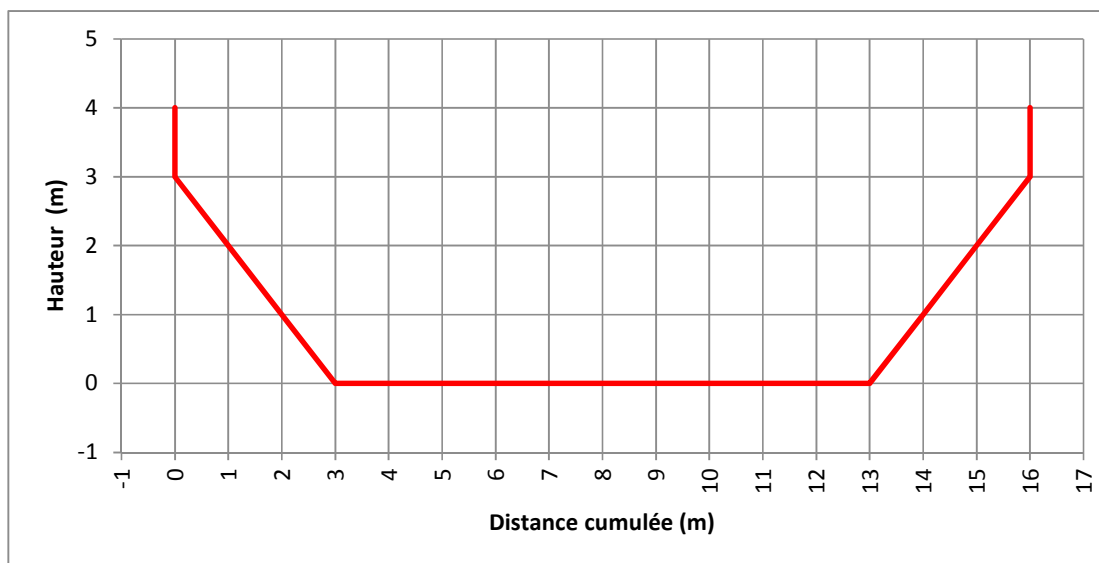


Figure 25 : Profil en travers d'Oued Mekerra dans sa traversée de Sidi Bel Abbès. **[MERABET 2006]**

4) La création d'un ouvrage de dérivation des eaux depuis l'amont de Sidi Bel Abbès ; lorsque les crues de l'Oued Mekerra ont produit un débit supérieur à celui adopté pour aménager la section de l'Oued dans sa traversée de Sidi Bel Abbès et puisque les possibilités d'accroissement de la capacité de l'oued dans cette traversée sont limitées par les emprises d'urbanisation, la création d'un ouvrage de dérivation apparaît comme une solution intéressante qui permet de faire transiter les eaux excédentaires depuis l'amont de la zone urbaine jusqu'à l'aval. Cet ouvrage permet d'évacuer un débit maximum de 150 m³/s. **[BENMANSOUR 2009, MERABET 2006]**

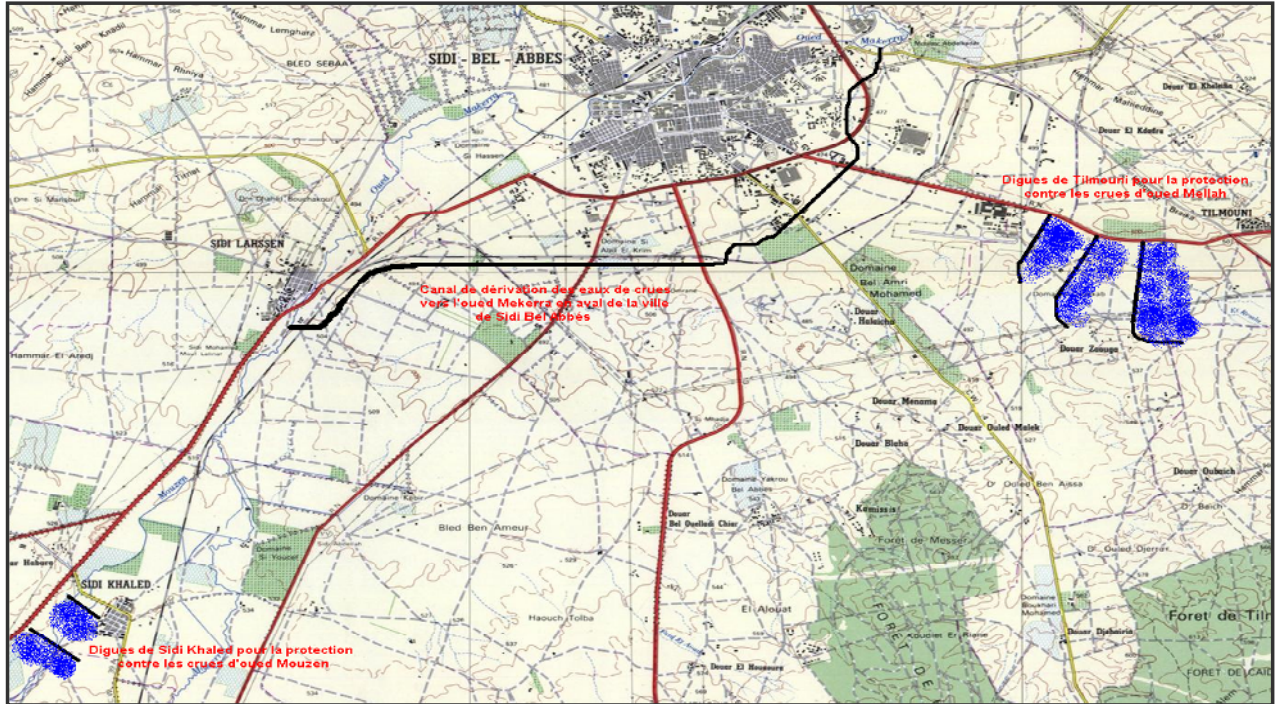


Figure 26 : Aménagements réalisés pour protéger la ville de SBA contre les inondations.

[BENMANSOUR 2009]

b) **A LONG TERME** : La variante la plus importante qui a été adoptée et qui constitue le plus important ouvrage de protection à moyen et à long terme, est la réalisation d'un barrage écrêteur à l'amont de Sidi Bel Abbès ; il s'agit d'un barrage supposé protéger la ville d'un débit centennal. C'est le barrage d'écrêtement de Tabia qu'il a une capacité de 25 Hm^3 et qui sert à écrêter les crues de l'Oued Mekerra à la valeur maximale de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Il a un évacuateur à seuil libre sur rive gauche fonctionne au-delà de la crue centennale avec un débit de $387 \text{ m}^3/\text{s}$. [BENMANSOUR 2009]

3. ETUDE HYDROLOGIQUE

Elle a pour but de prédire, à la tête de la ville de Sidi Bel Abbès, les débits de pointes des crues d'Oued Mekerra convenants aux différentes périodes de retour.

Plusieurs méthodes statistiques ou déterministes¹ peuvent être utilisées pour avoir ces informations. Néanmoins, l'analyse fréquentielle (une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés afin d'en définir les probabilités

¹ L'approche statistique permet d'estimer des débits, d'une probabilité donnée, à partir de lois statistiques qui ont été ajustées à l'aide de séries de données de débits mesurés. Tandis que l'approche déterministe considère tous les apports et facteurs pouvant influencer le débit (pluie, neige, eau dans le sol, etc.) et les introduit dans un modèle qui estime ce débit, elle n'est pas conçue pour donner une période de retour correspondant au débit trouvé ce qui empêche son utilisation dans ce cas. (BLIN 2001)

d'apparition future) reste la meilleure façon de réaliser ce but surtout qu'on est devant la nécessité de détermination de la période de retour. [MUSY 2005]

Cette étude statistique comprend généralement les trois étapes suivantes :

- 1) La première consiste à rassembler une série de données des débits de pointes enregistrés par la station locale de la ville de Sidi Bel Abbès. Ensuite, critiquer, classer, mettre en ordre cette série et utiliser les statistiques descriptives pour condenser l'information à l'aide de valeurs types telles que moyenne, écart-type, etc.
- 2) La deuxième étape consiste à analyser les résultats afin de leur adapter le modèle probabiliste le plus adéquat qui décrit la probabilité d'apparition d'un débit de pointe de valeur donnée. Et c'est du choix du modèle fréquentiel que dépendra la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. Diverses lois de distribution statistiques sont utilisées pour l'ajustement fréquentiel, parmi lesquelles on mentionnera les plus fréquentes tel que la loi normale, log-normale et la loi de Gumbel.
- 3) La troisième étape permet de récolter les fruits du travail des deux premières étapes ; on utilise alors le modèle mathématique obtenu précédemment pour avoir l'objectif de l'étude. [MUSY 2005, BENNIS 2004]

3.1. ACQUISITION DES DONNEES HYDROMETRIQUES

En réalité, les données hydrométriques de n'importe quelle région sont obtenues grâce à l'ANRH régionale. Dans ce but, on a déplacé à l'ANRH d'Oran où on a confronté du manque de données. Devant cette situation, on a essayé d'avoir ces données auprès de l'ABH d'Oran où on a trouvé deux séries des débits de pointe enregistrées successivement aux stations hydrométriques de Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub.

Le choix de ces deux stations est justifié puisque la station de Sidi Bel Abbès est positionnée près de l'agglomération de Sidi Bel Abbès qui représente notre zone d'étude. Néanmoins, sa position à l'aval de la ville a provoqué l'ajout de la deuxième station de Sidi Ali Benyoub qui se trouve de 20 Km à l'amont de la ville de Sidi Bel Abbès. A la fin de l'étude, on a fait une étude critique pour choisir la station représentative.

Le Tableau I-A de l'annexe I contient deux séries ; la première comporte 47 valeurs de débit de pointe enregistrées à la station hydrométrique de Sidi Bel Abbès et la deuxième renferme 44 valeurs enregistrées à la station de Sidi Ali Benyoub.

3.2. AJUSTEMENT DE LA SERIE DES DEBITS DE POINTE ENREGISTRÉE A LA STATION DE SIDI BEL ABBES SUIVANT LES LOIS DE DISTRIBUTION

3.2.1. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI DE GAUSS (OU NORMALE)

A. DESCRIPTION THEORIQUE

Dans cette loi, on se sert plutôt de tables de probabilité qui présentent des valeurs basées sur la fonction de répartition suivante:

$$F(Q_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{U^2}{2}} du \quad \text{Avec } U = \frac{Q_p - \overline{Q_p}}{\sigma_{Q_p}}$$

Avec : $F(Q_p)$: fonction de la loi normal, U : variable réduite de Gauss, Q_p : débit de pointe et $\overline{Q_p}$ et σ_{Q_p} : sont successivement la moyenne et l'écart-type de la série statistique des débit de pointe. **[LABORDE 2000]**

La démarche suivie est organisée comme suite :

- Utiliser les statistiques descriptives pour estimer les paramètres de la loi (moyenne, Ecart Type ...).
- Trier les valeurs dans l'ordre décroissant et attribuer un rang à chaque valeur.
- Calculer la probabilité expérimentale de dépassement pour chaque rang (d'après l'équation de Weibull : $P(Q > Q_i) = (R / (N+1))$).
- Calculer la probabilité expérimentale de non dépassement pour chaque rang ($P(Q < Q_i) = 1 - P(Q > Q_i)$).
- Calculer la variable réduite expérimentale de Gauss pour chaque rang (en fonction de la probabilité de non dépassement et à l'aide du Tableau IV-A de l'annexe IV).
- Calculer la variable réduite théorique de Gauss pour chaque rang ; $U_i = \frac{Q_{pi} - \overline{Q_p}}{\sigma_{Q_p}}$.
- Calculer la probabilité théorique de non dépassement pour chaque rang (en fonction de la variable réduite théorique et à l'aide du Tableau IV-A de l'annexe IV).
- Comme un test graphique d'adéquation, tracer les deux courbes des débits de pointes observés en fonction de la variable réduite théorique et expérimentale de Gauss et voir est ce que la série suit la droite théorique d'Henry.
- Confirmer l'adéquation de la loi par le test de χ^2 .

B. RESULTATS PRATIQUES

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi normale, sont représentés dans le tableau 02.

Tableau 02 : Estimation des paramètres de la loi normale.

	Moyenne Arithmétique \bar{Q}_p (m ³ /s)	Ecart-type Q_p (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C_s	Coef. de variation C_V
Utilité	Caractérise l'ordre de grandeur des observations des débits de pointe	Indique la dispersion des observations autour de la moyenne	Mesure la symétrie de la distribution par rapport à la moyenne	Vérifier la dissymétrie de la série statistique
Formule mathématique	$\bar{Q}_p = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Q_{pi}$	$\sigma = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^2 \right]^{1/2}$	$C_s = \frac{[N \sum_{i=1}^N (Q_{pi} - \bar{Q}_p)^3]}{(N-1)(N-2)\sigma^3}$	$C_V = \frac{\sigma}{\bar{Q}_p}$
Valeurs obtenues	46.88	48.81	1.657	1.04

Quand C_s est positif, cela veut dire qu'on a une asymétrie à droite. Et puisque C_V est supérieur à 0,5, on peut dire que la distribution de la série est dissymétrique et l'échantillon suit soit une loi log-normale (légère dissymétrie), Gumbel ou Pearson.

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul de la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau II-A. de l'annexe II.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI NORMAL

a) Test graphique

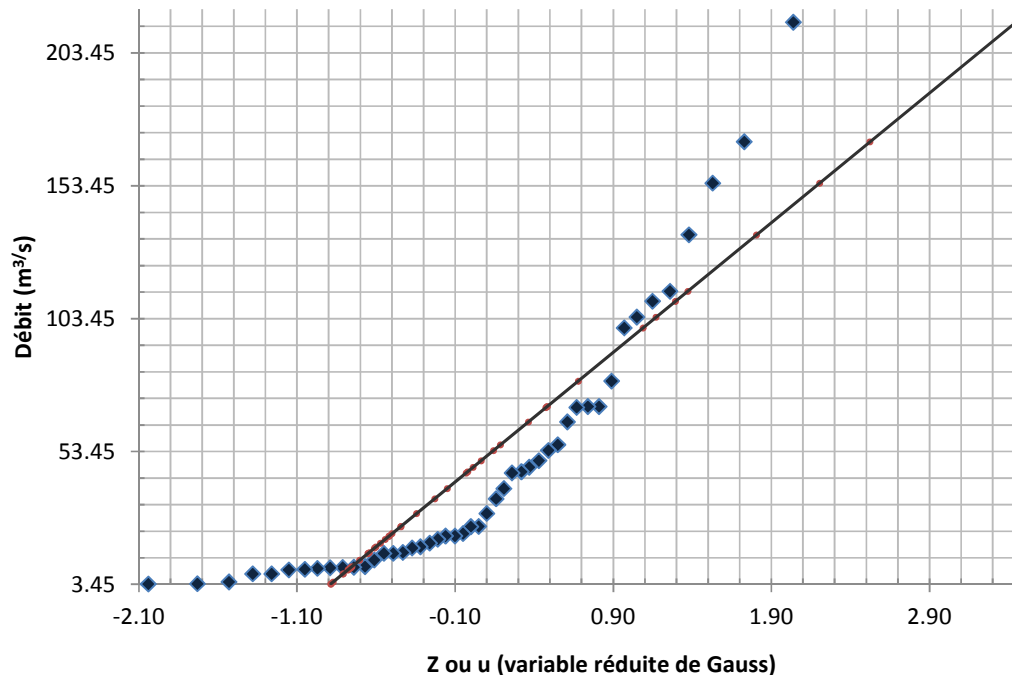


Figure 27 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi normale.

Il est clair sur la figure 27 que la loi normale n'ajuste plus aux valeurs des débits de pointe de la station hydrométrique de la ville de Sidi Bel Abbès.

b) Test de χ^2 :

Dans ce teste, on a fixé 04 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} qui est égal au rapport du nombre d'effectifs de la série sur le nombre de classes (pour notre cas, $N_{pi} = 47/4 = 11.75$). Le calculer des limites de classe est passé par l'équation de Henry. Avec $Q = \bar{Q} + \sigma \cdot u$

➤ 1^{ère} classe: $F_u = \frac{11,75}{47} = 0,25$, $u_{(0,25)} = -0,67$ donc $Q = 46,88 - 48,81 \cdot 0,67$ Alors **$Q \leq 14,18$**

➤ 2^{ème} classe: $F_u = \frac{2 \times 11,75}{47} = 0,5$, $u_{(0,5)} = 0$ donc $Q = 46,88$ Alors **$14,18 \leq Q \leq 46,88$**

➤ 3^{ème} classe: $F_u = \frac{3 \times 11,75}{47} = 0,75$, $u_{(0,75)} = 0,67$ donc $Q = 46,88 + 48,81 \cdot 0,67$

Alors **$46,88 \leq Q \leq 79,58$**

➤ 4^{ème} classe $F_u = \frac{4 \times 11,75}{47} = 1$ Alors **$Q \geq 79,58$**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau 03.

Tableau 03 : Résultats d'adéquation de la loi normale par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	$P = \sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$
1	$Q \leq 14,18$	0,25	13	11,750	0,133
2	14,18 - 46,88	0,5	17	11,750	2,346
3	46,88 - 79,58	0,75	08	11,750	1,197
4	$Q \geq 79,58$	1	09	11,750	0,644
χ^2 Calculé =					4,319
χ^2 Tabulé =					3,84
ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1					

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a χ^2 Tabulé = f(ddl = 1, erreur = 5%) = 3,84 < χ^2 Calculé (=4,319) ; veut dire que cette loi n'ajuste plus avec cette série des débits de pointe.

3.2.2. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI DE GALTON (OU LOG-NORMALE)

A. DESCRIPTION THEORIQUE

Cette loi a une expression presque identique à celle de la loi normale sauf qu'il y a une transformation logarithmique près. En effet, on peut lui donner la représentation suivante :

$$F(Q_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{u^2}{2}} du \quad \text{Avec} \quad U = \left(\frac{\log(Q_p) - M}{\sigma_{Q_p}} \right)$$

Où ; M : la moyenne des logarithmes de la variable Q_p , $M = \frac{\sum_{i=1}^N \log(Q_{pi})}{N}$

Q_p l'écart-type des logarithmes de la variable Q_p .

La procédure d'utilisation est identique à celle de la loi normale, mis à part qu'on doit procéder avant toute chose à une transformation logarithmique des données (logarithme népérien ou à base 10).

B. RESULTATS PRATIQUES

Les paramètres de la série des logarithmes des débits sont représentés dans le tableau 04.

Tableau 04 : Estimation des paramètres de la loi Log-normale.

	Moyenne Arithmétique M (m ³ /s)	Ecart-type LogQ _p (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C _s	Coefficient. de variation C _v
Valeurs obtenues	1.45	0.46	0.01	0.32

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul des logarithmes des débits et la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau II-B de l'annexe II.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI LOG-NORMAL

a) Test graphique

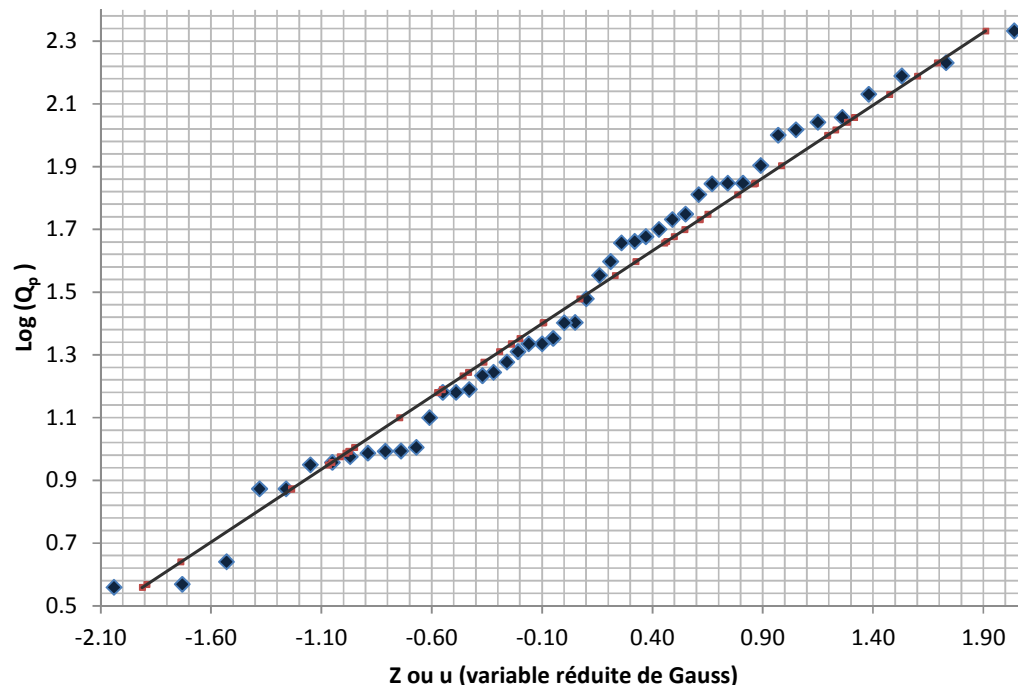


Figure 28 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi Log-normale.

Quand on compare la figure 28 de l'ajustement suivant la loi Log-normale à la figure 24 de l'ajustement suivant la loi normale, il ressort clairement que la loi log-normale s'ajuste mieux que la loi normale aux valeurs des débits de pointe.

b) Test de χ^2 :

De la même façon, on a fixé 04 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} (pour notre cas, $N_{pi} = 47/4 = 11.75$). Le calcul des limites de classe est passé par l'équation de Henry. Avec $\text{Log}(Q_p) = M + \sigma \cdot u$

➤ 1^{ère} classe : $F_u = \frac{11,75}{47} = 0,25$, $u_{(0,25)} = -0,67$ donc $\text{Log}(Q_p) = 1,45 - 0,46 \cdot 0,67$

Alors **$Q \leq 1,1418$**

➤ 2^{ème} classe : $F_u = \frac{2 \times 11,75}{47} = 0,5$, $u_{(0,5)} = 0$ donc $Q = 46,88$ Alors **$1,1418 \leq Q \leq 1,45$**

➤ 3^{ème} classe : $F_u = \frac{3 \times 11,75}{47} = 0,75$, $u_{(0,75)} = 0,67$ donc $\text{Log}(Q_p) = 1,45 + 0,46 \cdot 0,67$

Alors **$1,45 \leq Q \leq 1,7582$**

➤ 4^{ème} classe $F_u = \frac{4 \times 11,75}{47} = 1$ Alors **$Q \geq 1,7582$**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 05 : Résultats d'adéquation de la loi Log-normale par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	$P = \sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$
1	$\text{Log}(Q_p) \leq 1,1418$	0,25	13	11,750	0,133
2	1,1418 - 1,45	0,5	12	11,750	0,005
3	1,45 - 1,7582	0,75	09	11,750	0,644
4	$\text{Log}(Q_p) \geq 1,7582$	1	13	11,750	0,133
χ^2 Calculé =					0,915
χ^2 Tabulé =					3,84
ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1					

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a χ^2 Tabulé = f(ddl = 1, erreur = 5%) = 3,84 > χ^2 Calculé (=0,915), veut dire que la loi Log-normale ajuste mieux que la loi normale avec cette série des débits de pointe.

3.2.3. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI DE GUMBEL

A. DESCRIPTION THEORIQUE

La loi de Gumbel est un modèle fréquentiel très souvent utilisé pour décrire le comportement statistique des valeurs extrêmes. La fonction de répartition $F(Q_p)$ s'exprime de la manière suivante :

$$F(Q_p) = e^{-e^{-\alpha(Q_p-u)}} \dots\dots\dots(1)$$

Les paramètres α et u peuvent être estimés à partir de la moyenne et de l'écart type de l'échantillon par les relations suivantes :

$$= 1,2825 / \sigma_{Q_p} \dots \dots \dots (2)$$

$$u = \bar{O}_p - 0,45 \cdot \sigma_{Q_p} \dots \dots \dots (3)$$

Pour une période de retour donnée, le débit extrême maximal correspondant peut être estimé à partir de la relation :

$$Q_{pi} = \bar{O}_p + K \cdot \sigma_{Q_p} \dots \dots \dots (4)$$

Avec K est la variable réduite de Gumbel : $K = - \frac{\sqrt{6}}{\pi} \left\{ 0,5772 + \ln \left[\ln \left(\frac{T}{T-1} \right) \right] \right\} \dots \dots \dots (5)$

Et $T = \frac{1}{1-F}$

La démarche suivie est organisée comme suite :

- Utiliser les statistiques descriptives pour estimer les paramètres de la loi (moyenne, Ecart Type ...).
- Trier les valeurs dans l'ordre décroissant et attribuer un rang à chaque valeur.
- Calculer la probabilité expérimentale de dépassement pour chaque rang (d'après l'équation de Weibull : $P(Q > Q_i) = (R / (N+1))$).
- Calculer la probabilité expérimentale de non dépassement pour chaque rang ($P(Q < Q_i) = 1 - P(Q > Q_i)$).
- Calculer la période de retour expérimentale ($T = 1 / P(Q > Q_i)$).
- Calculer la variable réduite expérimentale de Gumbel pour chaque rang ; équation (5)
- Calculer la probabilité théorique de non dépassement pour chaque rang ; équations (1), (2) et (3).
- Calculer la probabilité théorique de dépassement pour chaque rang ($P(Q > Q_i) = 1 - P(Q < Q_i)$).
- Calculer la période de retour théorique ($T = 1 / P(Q > Q_i)$).
- Calculer la variable réduite théorique de Gumbel pour chaque rang ; équation (5)
- Comme un test graphique d'adéquation, tracer les deux courbes des débits de pointes observés en fonction de la variable réduite théorique et expérimentale de Gumbel et voir est ce que la série suit la droite théorique d'Henry.
- Confirmer l'adéquation de la loi par le test de χ^2 .

B. RESULTATS PRATIQUES

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de Gumbel, sont représentés dans le tableau 06.

Tableau 06 : Estimation des paramètres de la loi de Gumbel.

	Moyenne Arithmétique $\overline{Q_p}$ (m ³ /s)	Ecart-type σ_{Q_p} (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C_s	Coefficient de variation C_v
Valeurs obtenues	46.88	48.81	1.657	1.04

$$\alpha = \frac{1,2825}{\sigma_{Q_p}} = \frac{1,2825}{48,81} = 0,02627$$

$$u = \overline{Q_p} - 0,45 \cdot \sigma_{Q_p} = 46,88 - 0,45 \times 48,81 = 24,9114$$

$$F(Q) = e^{-e^{-\alpha(Q-u)}} = e^{-e^{-0,02627(Q-24,9114)}}$$

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul de la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau II-C de l'annexe II.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI DE GUMBEL

a) Test graphique

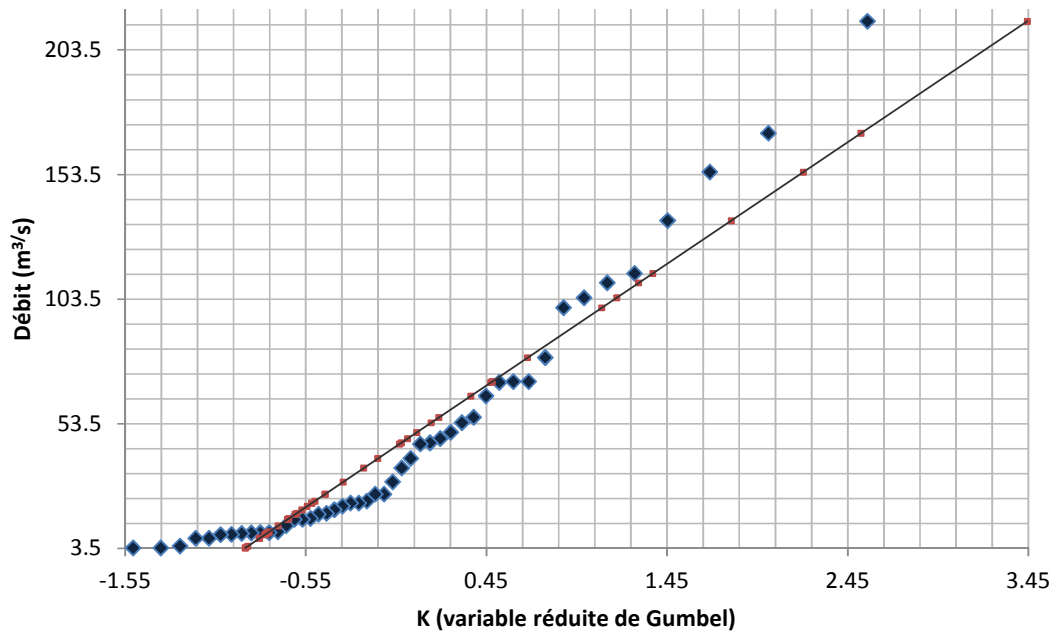


Figure 29 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi de Gumbel.

Graphiquement, on peut dire que la loi Log-normale s'ajuste mieux aux valeurs de cette série des débits que la loi normale et la loi de Gumbel.

b) Test de χ^2

On a fixé 04 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} (pour notre cas, $N_{pi} = 47/4 = 11.75$). Le calcul des limites de classe s'effectue comme suite :

- 1^{ère} classe : $F_u = \frac{11,75}{47} = 0,25$, $K_{(0,25)} = -0,704$ donc $Q_p = 46,88 - 0,704 \times 48,81$
Alors **Q ≤ 12,48**
- 2^{ème} classe : $F_u = \frac{2 \times 11,75}{47} = 0,5$, $K_{(0,5)} = -0,164$ donc $Q_p = 46,88 - 0,164 \times 48,81$
Alors **12,48 ≤ Q ≤ 38,86**
- 3^{ème} classe : $F_u = \frac{3 \times 11,75}{47} = 0,75$, $K_{(0,75)} = 0,52$ donc $Q_p = 46,88 + 0,52 \times 48,81$
Alors **38,86 ≤ Q ≤ 72,32**
- 4^{ème} classe $F_u = \frac{4 \times 11,75}{47} = 1$ Alors **Q ≥ 72,32**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau 07.

Tableau 07 : Résultats d'adéquation de la loi de Gumbel par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	P= $\sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$
1	Q ≤ 12,48	0,25	12	11,750	0.005
2	12,48 - 38,86	0,5	15	11,750	0.899
3	38,86 - 72,32	0,75	11	11,750	0.048
4	Q ≥ 72,32	1	09	11,750	0.644
χ^2 Calculé =					1,596
χ^2 Tabulé =					3,84
ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1					

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a χ^2 Tabulé = f(ddl = 1, erreur = 5%) = 3,84 < χ^2 Calculé (=1,596), veut dire que la loi de Gumbel n'ajuste plus avec cette série des débits de pointe.

3.3. AJUSTEMENT DE LA SERIE DES DEBITS DE POINTE ENREGISTRÉE A LA STATION DE SIDI ALI BENYOUB SUIVANT LES LOIS DE DISTRIBUTION

3.3.1. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI NORMALE

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de normale, sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 08 : Estimation des paramètres de la loi de normale.

	Moyenne Arithmétique \bar{Q}_p (m ³ /s)	Ecart-type σ_{Q_p} (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C_s	Coefficient. de variation C_v
Valeurs obtenues	131.77	130.23	1.77	0.99

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul de la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau III-A. de l'annexe III.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI NORMAL

a) Test graphique

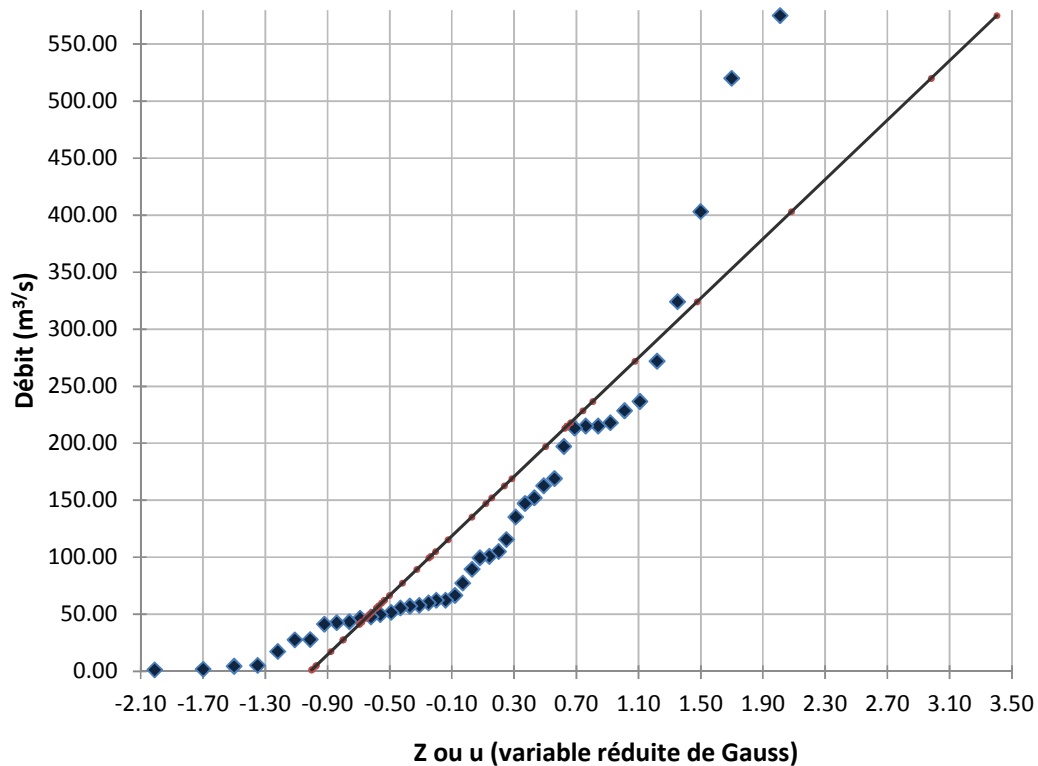


Figure 30 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi normale.

Il est clair sur cette figure que la loi normale n'ajuste plus aux valeurs des débits de pointe de la station hydrométrique de Sidi Ali Benyoub.

b) Test de χ^2 :

Dans ce test, on a fixé 04 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} qui est égale au rapport du nombre d'effectifs de la série sur le nombre de classes (pour notre cas, $N_{pi} = 44/4 = 11$). Le calcul des limites de classe est passé par l'équation de Henry.

Avec $Q = \bar{Q} + \sigma \cdot u$

➤ 1^{ère} classe : $F_u = \frac{11}{44} = 0,25$, $u_{(0,25)} = -0,67$ donc $Q = 131,77 - 130,23 \cdot 0,67$ Alors **$Q \leq 44,52$**

➤ 2^{ème} classe : $F_u = \frac{2 \times 11}{44} = 0,5$, $u_{(0,5)} = 0$ donc $Q = 131,77$ Alors **$44,52 \leq Q \leq 131,77$**

➤ 3^{ème} classe : $F_u = \frac{3 \times 11}{44} = 0,75$, $u_{(0,75)} = 0,67$ donc $Q = 131,77 + 130,23 \cdot 0,67$

Alors **$131,77 \leq Q \leq 219,03$**

➤ 4^{ème} classe $F_u = \frac{4 \times 11}{44} = 1$ Alors **$Q \geq 219,03$**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau 09.

Tableau 09 : Résultats d'adéquation de la loi normale par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	$P = \sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$	
1	$Q \leq 44,52$	0,25	10	11	0.091	
2	44,52 - 131,77	0,5	17	11	3.273	
3	131,77 - 219,03	0,75	10	11	0.091	
4	$Q \geq 219,03$	1	7	11	1.455	
					χ^2 Calculé =	4.909
					χ^2 Tabulé =	3.840
					ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1	

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a χ^2 Tabulé = 3,84 < χ^2 Calculé (=4,90) ; veut dire que cette loi n'ajuste plus avec cette série des débits de pointe.

3.3.2. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI LOG-NORMALE

Les paramètres de la série suivant la loi de Galton sont montrés dans le tableau 10.

Tableau 10 : Estimation des paramètres de la loi Log-normale.

	Moyenne Arithmétique M (m ³ /s)	Ecart-type LogQ _p (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C _s	Coefficient. de variation C _v
Valeurs obtenues	1.87	0.59	-1.31	0.32

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul des logarithmes des débits et la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau III-B de l'annexe III.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI LOG-NORMAL

a) Test graphique

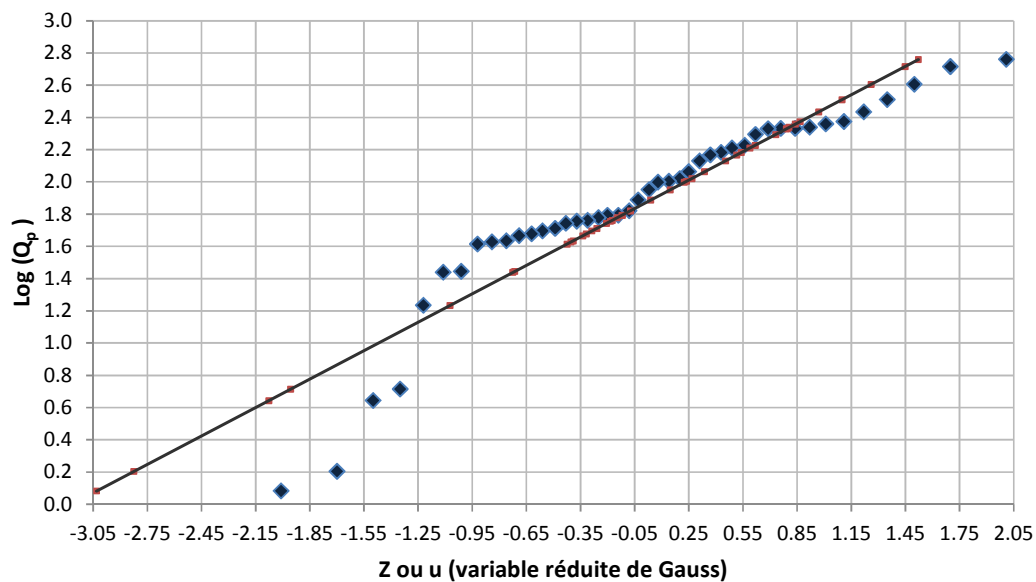


Figure 31 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi

D'après ce graphe, il ressort clairement que la loi log-normale s'ajuste mieux que la loi normale surtout aux grandes valeurs des débits de pointe.

b) Test de χ^2 :

De la même façon, on a fixé 04 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} (pour notre cas, $N_{pi} = 44/4 = 11$). Le calcul des limites de classe est passé par l'équation de Henry. Avec $\text{Log}(Q_p) = M + \sigma_{Qp} \cdot u$

➤ 1^{ère} classe : $F_u = \frac{11}{44} = 0,25$, $u_{(0,25)} = -0,67$ donc $\text{Log}(Q_p) = 1,87 - 0,59 \cdot 0,67$

Alors **$Q \leq 1,47$**

➤ 2^{ème} classe : $F_u = \frac{2 \times 11}{44} = 0,5$, $u_{(0,5)} = 0$ donc $Q = 46,88$ Alors **$1,47 \leq Q \leq 1,86$**

➤ 3^{ème} classe : $F_u = \frac{3 \times 11}{44} = 0,75$, $u_{(0,75)} = 0,67$ donc $\text{Log}(Q_p) = 1,87 + 0,59 \cdot 0,67$

Alors **$1,86 \leq Q \leq 2,26$**

➤ 4^{ème} classe $F_u = \frac{4 \times 11}{44} = 1$ Alors **$Q \geq 2,26$**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 11 : Résultats d'adéquation de la loi Log-normale par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	$P = \sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$
1	$\text{Log}(Q_p) \leq 1,47$	0,25	7	11	1.455
2	1,47 - 1,86	0,5	14	11	0.818
3	1,86 - 2,26	0,75	11	11	0
4	$\text{Log}(Q_p) \geq 2,26$	1	12	11	0.091
$\chi^2_{\text{Calculé}} =$					2.364
$\chi^2_{\text{Tabulé}} =$					3.840
ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1					

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a $\chi^2_{\text{Tabulé}} = f(\text{ddl} = 1, \text{erreur} = 5\%) = 3,84 > \chi^2_{\text{Calculé}} (=2,36)$, veut dire que la loi Log-normale ajuste mieux que la loi normale avec cette série des débits de pointe.

3.3.3. AJUSTEMENT SUIVANT LA LOI DE GUMBEL

Les paramètres qu'on peut les tirer à partir de cette série lorsqu'on applique la loi de Gumbel, sont représentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : Estimation des paramètres de la loi de Gumbel.

	Moyenne Arithmétique $\overline{Q_p}$ (m ³ /s)	Ecart-type σ_{Q_p} (m ³ /s)	Coefficient d'asymétrie C_s	Coefficient. de variation C_v
Valeurs obtenues	131.77	130.23	1.77	0.99

$$\alpha = \frac{1,2825}{\sigma_{Qp}} = \frac{1,2825}{130,23} = 0,00985$$

$$u = \overline{Q_p} - 0,45 \cdot \sigma_{Qp} = 131,77 - 0,45 \times 130,23 = 73,1682$$

$$F(Q) = e^{-e^{-\alpha(Q-u)}} = e^{-e^{-0,00985(Q_p-73,1682)}}$$

Après le classement des valeurs de la série par ordre décroissant et le calcul de la probabilité expérimentale par la formule de Weibull, on aura le tableau III-C de l'annexe III.

TESTS D'ADEQUATION DE LA LOI DE GUMBEL

c) Test graphique

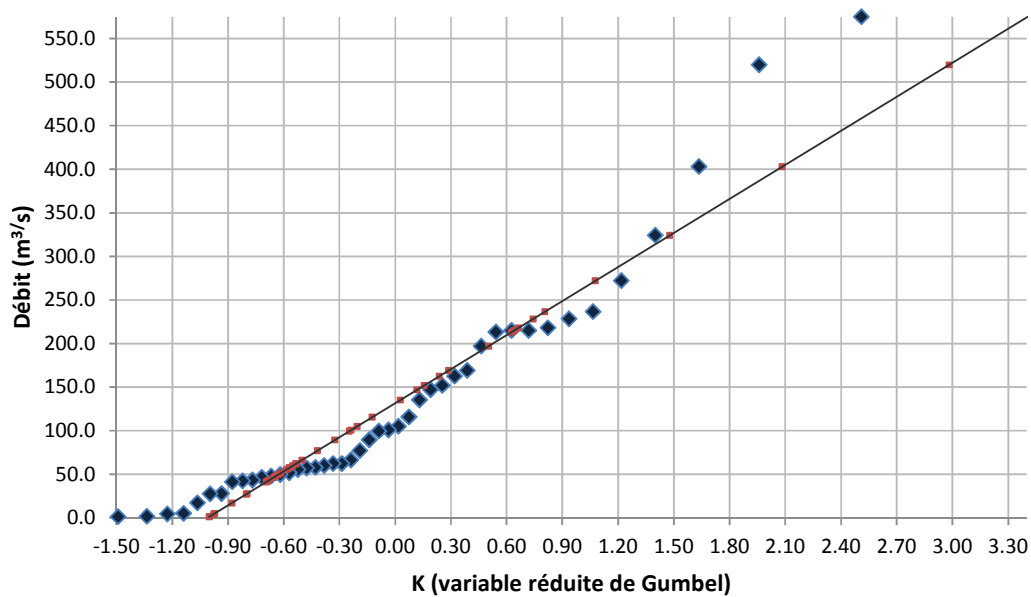


Figure 32 : Ajustement des débits de pointe suivant la loi de Gumbel.

Graphiquement, on peut dire que la loi de Gumbel s'ajuste mieux qu'avec les petites valeurs de cette série des débits.

d) Test de χ^2 :

On a fixé 03 classes pour calculer l'effectif théorique N_{pi} (pour notre cas, $N_{pi} = 44/3 = 14.667$). Le calcul des limites de classe s'effectue comme suite :

➤ 1^{ère} classe : $F_u = \frac{14,667}{44} = 0,33$, $K_{(0,33)} = -0,52$ donc $Q_p = 132,77 - 0,52 \times 130,23$

Alors **$Q \leq 63,61$**

➤ 2^{ème} classe : $F_u = \frac{2 \times 14,667}{44} = 0,66$, $K_{(0,66)} = 0,25$ donc $Q_p = 132,77 - 0,25 \times 130,23$

Alors **$63,61 \leq Q \leq 164,82$**

➤ 3^{ème} classe : $F_u = \frac{3 \times 14,667}{44} = 1$ Alors **$Q \geq 164,82$**

Les résultats qu'on a trouvés sont représentés dans le tableau 13.

Tableau 13 : Résultats d'adéquation de la loi de Gumbel par le test de χ^2 .

N°	limites de classes	$P = \sum N_{pi}/N$	Effectif observé : N_i	Effectif théorique : N_{pi}	$(N_i - N_{pi})^2 / N_{pi}$
1	$Q \leq 63,61$	0,33	20	14,667	1.939
2	63,61 - 164,82	0,66	11	14,667	0.917
3	$Q \geq 164,82$	1	13	14,667	0.189
χ^2 Calculé =					3.045
χ^2 Tabulé =					3.840
ddl = k-p-1 = 4 - 2 - 1 = 1					

D'après le tableau de distribution de χ^2 , on a χ^2 Tabulé = f(ddl = 1, erreur = 5%) = 3,84 > χ^2 Calculé (=3,045), veut dire que la loi de Gumbel peut ajuster avec cette série des débits de pointe. Néanmoins, le χ^2 Calculé de la loi de Gumbel (= 3.045) est supérieur à χ^2 Calculé de la loi Log-Normale (=2.364), ce qui rend cette dernière la loi adéquate avec cette série de débits.

3.4. CHOIX DU MODELE STATISTIQUE ADEQUAT POUR LES DEUX STATIONS ET SELECTION DE LA STATION REPRESENTATIVE

Les résultats issus des tests d'adéquation de l'ajustement des deux séries des débits de pointe enregistrées aux stations hydrométriques de Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub par les trois lois de distribution ; Normale, Log-normale et Gumbel, montrent que la loi la plus adéquate pour les deux séries est celle Log-normale. D'où les débits de pointes correspondants aux différentes périodes de retour, sont tirés de ce modèle pour les deux stations et représentés dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Estimation des débits de pointe correspondants aux différentes périodes de retour d'après les deux stations de SBA et SAB et suivant la loi de Gumbel et de Galton

T (ans)	<u>Loi de Gumbel</u>		<u>Loi Log-Normale</u>	
	<u>SBA</u>	<u>SAB</u>	<u>SBA</u>	<u>SAB</u>
10	110.56	301.67	109.65	414.65
30	153.71	416.81	197.39	884.91
50	173.41	469.38	249.72	1 175.86
100	199.99	540.28	336.84	1 717.78
1000	287.79	774.55	750.92	4 805.76

Et puisque notre sujet intéresse de la genèse des crues pour cartographier l'aléa ; c'est-à-dire le débit des crues responsables des inondations dans l'agglomération de Sidi Bel Abbès est généré beaucoup plus à l'amont qu'à l'aval de la ville. En plus que la station hydrométrique de Sidi Bel Abbès a été mentionnée dans un rapport de la DHW qu'elle présente une faible qualité de la section de mesure (peu adaptée aux débits forts). Pour toutes ces raisons, on a choisi la station hydrométrique de Sidi Ali Benyoub comme station représentative à partir de sa série de débits de pointe on va prévenir les débits correspondants aux différentes périodes de retours.

4. ETUDE HYDRAULIQUE

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

4.1. TYPOLOGIE DES MODELES

Les modèles mathématiques se différencient selon le degré de simplicité de la représentation géométrique de différentes variables de modèle en trois types :

➤ *Modèles monodimensionnels* : la géométrie est représenté par un profil en long sur lequel sont repérées les sections en travers perpendiculairement au sens d'écoulement. Les résultats fournis sont satisfaisants lorsque l'écoulement déborde peu de lit mineur et la plaine inondée ne présente pas de fortes singularités. Ces modèles fournissent les cotes d'eau en fonction du temps par la résolution des équations de Saint Venant qui sont formées par l'équation de conservation de masse, transformée en conservation de volume en tenant compte de l'incompressibilité de l'eau

$\frac{S}{t} + \frac{Q}{x} = q_L$, et l'équation de conservation de quantité de mouvement $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + J \right) = K_L q_L V$, avec : S : Surface mouillée (m²), Q : Débit (m³/s), q_L : Débit par unité de longueur (m²/s), g : accélération de la pesanteur (m/s²), Z : cote de la surface libre (m), J : pente de la ligne d'eau (m/m), K_L : coefficient tel que K_L=1 quand q_L<0 et K_L=0 quand q_L>0 et V : Vitesse moyenne dans une section transversale (m/s). [CHACHOUA 2009]

➤ *Modèles 1D à casiers* : Ils ont l'avantage de modéliser les zones de débordement en tant que réservoirs interconnectés ou reliés à l'écoulement par des lois de

vidange/remplissage. Son inconvénient est la difficulté de calage des coefficients régissant les lois de ces casiers. [CHACHOUA 2009]

➤ *Modèles bidimensionnels (2D)* : la géométrie du cours d'eau est représentée par un maillage 2D. Les modèles fournissent les cotes d'eau en fonction du temps dans chaque maille par la résolution des équations 2D de Saint Venant :

$$\begin{cases} \frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(HV) = q & \text{avec } H: \text{Hauteur d'eau (m)}, V: \text{Vecteur de vitesse (m.s}^{-1}\text{) et } q: \text{Apport (m}^3\text{.s}^{-1}\text{)} \\ \frac{\partial V}{\partial t} + (V\nabla)V + g \left[\nabla Z + \frac{V\|V\|}{k_s^2 H^3} \right] = 0 & \text{avec } Z: \text{Cote de surface libre, } k_s: \text{Coefficient de rugosité de Strickler (m}^{\frac{1}{3}}\text{.s}^{-1}\text{)} \end{cases}$$

Ces modèles sont gourmands au temps de calcul et nécessitent la connaissance fine de la géométrie, ils sont utilisés pour les petits tronçons ou dans le cas où les modèles 1D ne donnent pas des résultats satisfaisants. [CHACHOUA 2009]

4.2. CHOIX DU TYPE DE MODELE HYDRAULIQUE

Le choix du logiciel qui permet de cartographier l'aléa inondation est une étape très importante. La comparaison entre les modèles 1D et 2D a été faite par des chercheurs sur la capacité de simuler l'étendue de l'inondation d'une crue donnée à l'aide de trois modèles : un modèle 1D représenté par le **HEC-RAS** de l'US Army Corps Engineers et deux modèles 2D représentés par **Telemac 2D** développé par Electricité de France et **Lisflood-Fp**. Les résultats de comparaison montrent la capacité de modèle **HEC-RAS** (1D) comparable au modèle **Telemac** (2D) en matière de représentation de l'étendue de l'inondation. [CHACHOUA 2009]

Pour cela et afin de maîtriser un outil informatique pour modéliser l'écoulement, on a choisi le modèle (1D) HEC-RAS qu'il a une version disponible gratuite* et plus simples à manipuler. Ainsi les données nécessaires pour cette modélisation hydraulique sont les débits issus de l'étude hydrologique, la géométrie du cours d'eau dans sa traversé de la ville ainsi que la pente longitudinale et la rugosité de lit et des berges dans les différents points de calcul.

4.3. PRESENTATION DU MODELE HEC-RAS

Le modèle HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center River Analysis System) est un modèle unidimensionnel conçu par Hydrologic Engineering Centre de l'US Corp Engineers pour modéliser l'écoulement à surface libre permanent et non permanent. La première version (version 1.0) a été libérée en juillet de 1995. Depuis lors il y a eu plusieurs dégagements importants de ce progiciel, y compris des versions : 1.1 ; 1.2 ;

* Version téléchargeable gratuitement sur le site : <http://www.hec.usace.army.mil/>

2.0 ; 2.1 ; 2.2 ; 3.0, 3.1, 4.0 et maintenant la version 4.1 en janvier de 2010 qui est conçue pour exécuter les tâches suivantes:

1. Calcul des hauteurs d'eau dans un régime permanent.
2. Simulation de l'écoulement non permanent.
3. Calcul de la capacité de transport solide.
4. Exécution d'une analyse de qualité de l'eau. [US ACE, 2010]

4.3.1. BASES THEORIQUES DU LOGICIEL HEC-RAS

Les bases théoriques d'HEC-RAS sont publiées dans les brochures d'aide du logiciel. Malgré cela, on va citer les principales concernant le régime permanent. L'HEC-RAS a la capacité de détermination unidimensionnelle des lames d'eaux à partir du calcul de la variation de la hauteur d'eau entre deux sections successives par la résolution, et d'une procédure itérative, de l'équation d'énergie suivante :

$$y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + hc \dots\dots\dots(1)$$

Tel que :

y_1 et y_2 : Tirant d'eau dans chaque section, Z_1, Z_2 : Côte de fond, V_1, V_2 : Vitesse moyenne dans chaque section, α_1, α_2 : Coefficients relatifs à la répartition des vitesses dans une section, g : Accélération de la pesanteur et hc : Perte de charge totale.

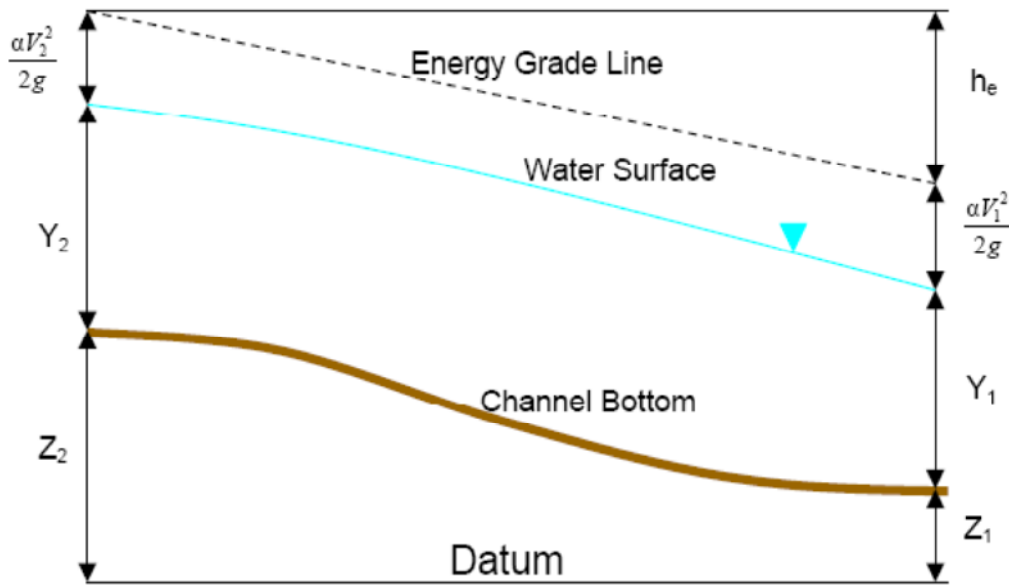


Figure 33 : Représentation des termes de l'équation d'énergie. [US ACE, 2010]

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

$$hc = L\bar{S}_f + c \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \dots\dots\dots(2)$$

Avec :

L : Distance entre deux sections, C : Coefficient de perte par expansion ou contraction, \bar{S}_f : Pente représentative de frottement entre deux sections tel que :

$$S_f = \left(\frac{Q}{K}\right)^2 \dots\dots\dots(3)$$

Avec :

Q : est le débit d'eau ; $Q = V \times A$ (Equation de continuité) d'où $V = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots(4)$

Et K : Coefficient de débit calculé comme suite :

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{\frac{2}{3}} \dots\dots\dots(5)$$

Avec :

n : Coefficient de rugosité de Manning, A : Section mouillée et R : Rayon hydraulique.

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

1. Proposer une hauteur d'eau à la section en aval (si l'écoulement est fluviale ou en amont s'il est torrentiel),
2. Sur la base de la hauteur d'eau proposée, déterminer le coefficient de débit K (équation 5) et la vitesse moyenne (équation 4),
3. Avec les valeurs obtenues du coefficient de débit et de la vitesse moyenne, calculer \bar{S}_f (équation 3) et résoudre l'équation de hc (équation 2),
4. Avec les valeurs obtenues dans les étapes 2 et 3 (la perte de charge et la vitesse moyenne), résoudre l'équation globale d'énergie (équation 1) ; c'est-à-dire, calculer la hauteur d'eau dans la deuxième section,
5. Comparer la valeur de la hauteur d'eau calculée avec celle proposée au début.
6. Répéter la procédure jusqu'à l'obtention de la précision. **[US ACE, 2010]**

4.3.2. VALIDATION DU MODELE HEC-RAS

Afin de savoir la validité du modèle HEC RAS, on fait un exemple simple à partir duquel on examine sa validité. Alors, on prend un canal rectangulaire en béton de largeur $b = 100$ m, de pente $i = 10^{-5}$ m/m, de coefficient de Strickler $K_s = 70$ et d'un débit $Q = 273$ m³/s.

Le calcul manuel d'après la formule de Manning-Strickler s'effectue comme suite : $Q = K_s S Rh^{2/3} i^{1/2}$. avec $S = b.h$ et $Rh = b.h/(b+2h)$. La résolution donne **h = 4,68 m**.

Quand on vérifie avec le logiciel HEC RAS, la première étape consiste à créer le projet. Ensuite, définir la géométrie des sections. Et enfin, entrer le débit ($Q = 273 \text{ m}^3/\text{s}$) et les conditions limites (ici, $i = 10^{-5} \text{ m/m}$). Les résultats peuvent être affichés, soit sous forme de schémas, soit sous forme de tableaux.

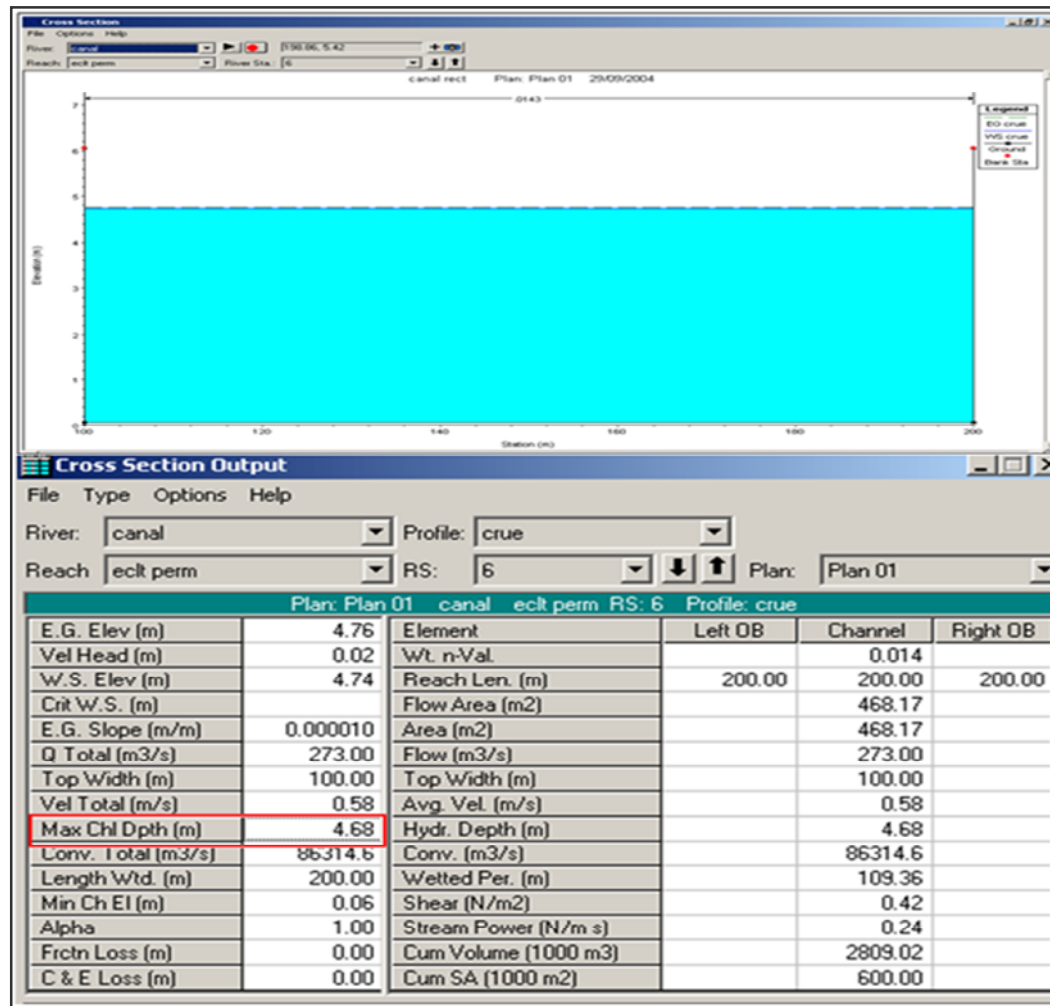


Figure 34 : Résultats de validation du logiciel HEC RAS. [TERFOUS 2011]

Comme nous le voyons dans le tableau ci-dessus : $h = 4,68 \text{ m}$. Donc le calcul manuel et le logiciel HEC-RAS donnent le même résultat pour cet exemple. Ce qui assure la validité du modèle HEC-RAS. [TERFOUS 2011]

4.3.3. ENVIRONNEMENT DE HEC-RAS

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

- ❖ **Le fichier de projet (*.prj):** c'est le fichier principale qui contient les informations descriptifs de projet et les configurations par défaut ou choisi

- ❖ **Le fichier de géométrie (*.G--)** : il comporte les informations relatives à la géométrie (schéma, sections en travers, rugosité, ouvrage...etc.).
- ❖ **Le fichier (flow) débit (*.F--)** : il stocke les données de débits, il peut comporter plusieurs profils où chaque profil regroupe de conditions particuliers de débit.
- ❖ **Le fichier Plan (*.P--)** : chacun contient des données particulières et aide l'utilisateur à simuler plusieurs scénarios avec les mêmes données.
- ❖ **Le fichier exécution (*.R--)** : il se crée automatiquement à l'exécution de chaque simulation et contient les données relatives à la simulation.
- ❖ **Le fichier (output) résultat (*.O--)** : il regroupe les résultats de la simulation. [US ACE, 2010]

Tous les fichiers HEC-RAS prennent la numérotation de 0 à 99, leurs nom est ceux définis par l'utilisateur et ne doivent pas être modifiés. Au premier démarrage de HEC-RAS la fenêtre de la Figure 35 apparaît.

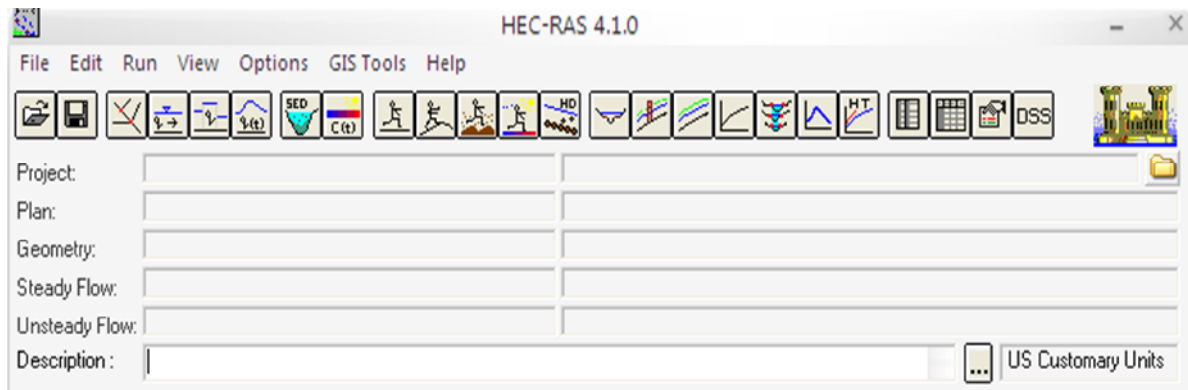


Figure 35 : Fenêtre principale du logiciel HEC-RAS.

4.3.4. PROGRAMME AUXILIAIRES DE LA FAMILLE HEC.

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

- ❖ **HEC HMS** : logiciel de modélisation hydrologiques des bassins versants.
- ❖ **HEC-DSS** : une petite application qui sert à importer les données à partir du tableur Excel, ce que facilite la manipulation des longues séries de données hydrométriques.
- ❖ **HEC-GEORAS** : cette application offre la compatibilité entre HEC-RAS et les logiciels du SIG. Elle permet l'importation des sections en travers à partir d'Arc View par exemple vers HEC-RAS, ce qu'élimine la manipulation manuelle, parfois fastidieuse, des sections en travers. Il suffit de tracer les profils en travers sur Arc View et les importer dans HEC-RAS. Au même temps, elle permet l'exportation des simulations pour les afficher dans l'Arc View reconnu par ses potentialités d'affichage 2D et 3D. [CHACHOUA 2009]

4.3.5. CONTRAINTES D'UTILISATION DU MODELES HEC-RAS

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

- ❖ La non prise en compte des échanges de masse et des échanges turbulents entre le lit mineur et le lit majeur, ces phénomènes sont responsables de pertes de charge très importantes.
- ❖ En tant que modèle 1D il s'avère moins performant quand il s'agit de grandes plaines d'inondation présentant des diffluences et de confluences multiples (caractère 2D). [CHACHOUA 2009]

4.4. ETAPES DE SIMULATION PAR HEC-RAS

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

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

4.4.1. CREATION D'UN NOUVEAU PROJET

Choisir un nom et un titre de projet ainsi que l'emplacement des fichiers.

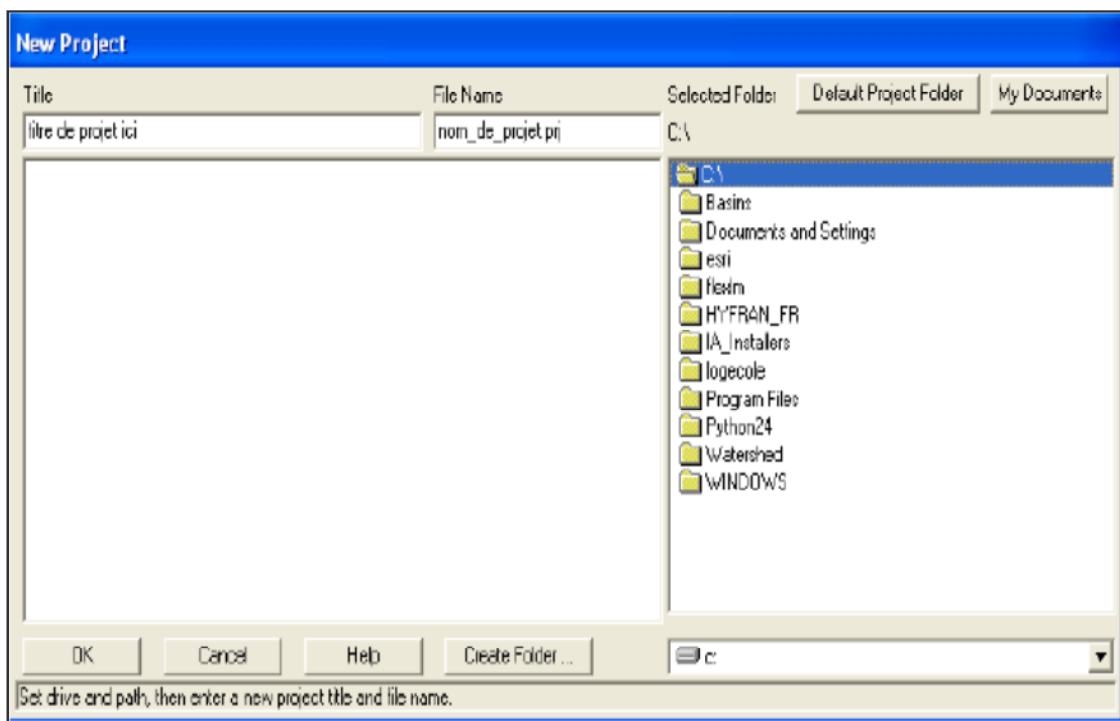


Figure 36 : Création de nouveau projet HEC-RAS.

4.4.2. PREPARATION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES POUR L'HEC RAS

La qualité de modélisation hydraulique dépend étroitement de la qualité des données topographiques, la résolution et la précision sont les deux facteurs qui régissent la qualité des données topographiques ; la résolution présente la finesse de maillage des levés sur le terrain tandis que la précision correspond à l'erreur absolue sur ces mesures. Plusieurs techniques d'acquisition peuvent être utilisées selon l'objectif envisagé par l'étude et le budget alloué. [CHACHOUA 2009]

Lorsqu'on utilise un modèle monodimensionnel pour une étude hydraulique à grande échelle, on doit fournir des données topographiques très étendues, de résolution fine et de bonne précision. Le modèle numérique de terrain MNT TIN (Terrain Irregular Network) est le meilleur fond topographique pour les modèles hydrauliques afin de bien représenter le terrain à grande échelle. Il exige un nombre beaucoup plus petit de points qu'une grille, représente le terrain extérieur avec exactitude et peut être aisément adapté à la complexité variable du terrain. Néanmoins, Il a une taille beaucoup plus volumineuse que le fichier raster. [BENMANSOUR 2009]

C'est à partir de ce modèle (MNT TIN crée dans l'Arc View) que sont extraites les données topographiques nécessaires au fonctionnement du logiciel HEC RAS. La démarche se déroulera grâce à l'HEC GeoRAS (extension sous Arc View) qui permet d'automatiser les phases d'exportation-importation entre l'Arc View et l'HEC RAS.

4.4.2.1. FORMATION DU MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN « MNT TIN »

Afin de créer un MNT TIN, on a adopté une méthode qui intègre les données topographiques de provenances différentes à savoir :

- Des courbes de niveau digitalisés à partir d'une carte topographique de la région de Sidi Bel Abbès au 1/25 000 ; cette carte est obtenue auprès de l'Institut Nationale de Cartographie et de Télédétection d'Oran (INCT) ;
- Des points cotés digitalisés de la même carte ;
- Un levé topographique du lit mineur d'Oued Mekerra dans sa traversé de la ville de Sidi Bel Abbès ; ce levé est en principe réalisé dans l'intérêt du maitre d'ouvrage représenté dans ce cas par la Direction d'Hydraulique de la Wilaya de Sidi Bel Abbès. Néanmoins, on n'a pas pu avoir cette donnée ni auprès de la DHW de Sidi Bel Abbés ni prés de bureau d'étude URBAT responsable des études hydrauliques dans la wilaya. Devant cette situation, on a découvert dans l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique d'El Harrach en Alger un mémoire de magister qui a étudié

les crues et la localisation des zones inondables dans la ville de Sidi Bel Abbès et qui a renfermé ce levé. A partir de ce mémoire, on a contacté l'étudiant possesseur qui a heureusement ce levé.

La figure suivante représente le diagramme de travail pour créer le MNT TIN.

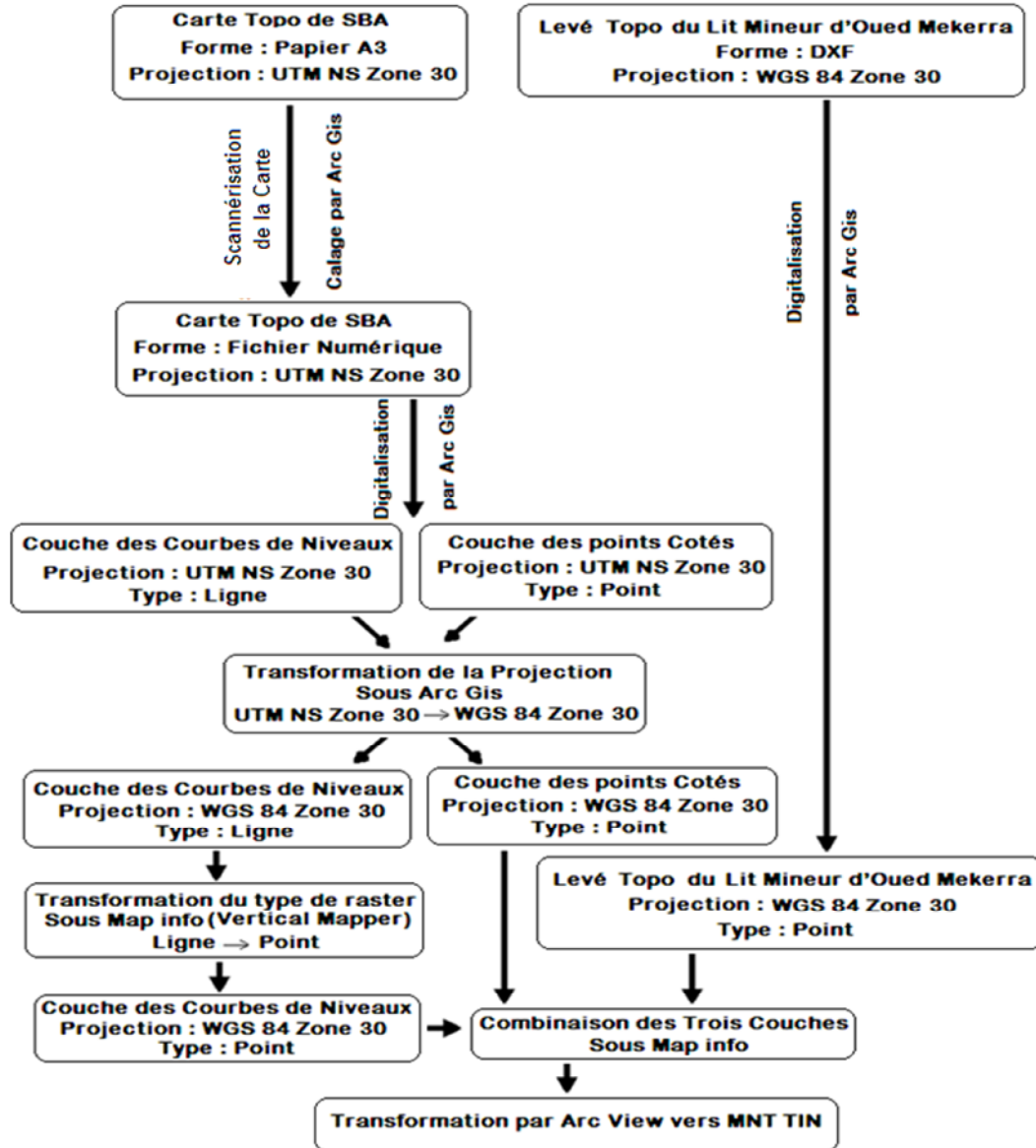


Figure 37 : Diagramme de travail pour créer le MNT TIN.

La digitalisation est effectuée grâce à l'Arc Gis puisqu'elle est facile à manipuler dans ce logiciel que les autres logiciels (Map Info et Arc View). Tandis que la transformation du type de raster (ligne - point) et la combinaison des données topographiques issues de la carte 1/25 000 et du levé topographique de l'Oued Mekerra, sont effectuées sous Map Info puisque les deux autres logiciels n'ont pas la licence pour effectuer cette opération. La figure suivante représente cette combinaison des données.

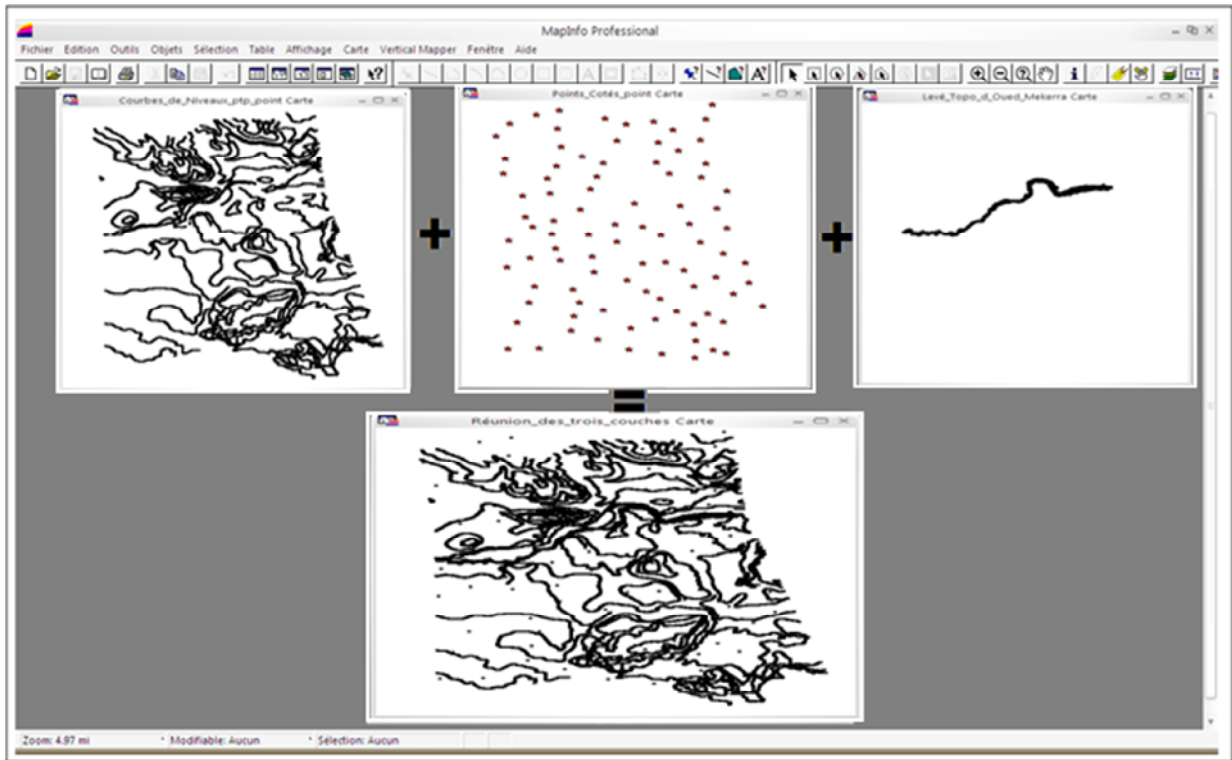


Figure 38 : Combinaison de données topographiques de résolutions différentes.

Suite à cette combinaison, l'étape suivante a été de créer le MNT TIN sous l'Arc View (Map info n'a pas la possibilité de faire cette opération et l'Arc Gis n'a pas la licence) et grâce à l'extension 3D Analyst. Le résultat est représenté dans la figure 39.

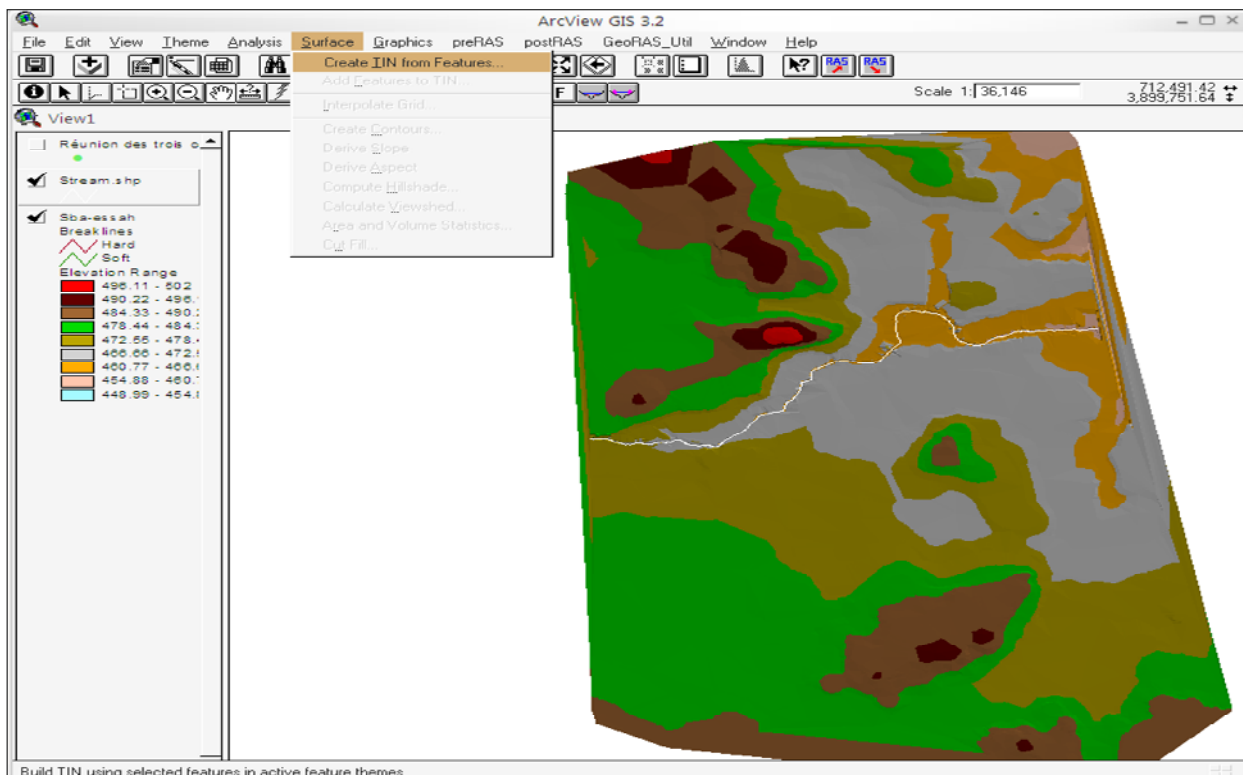


Figure 39 : Création du MNT TIN.

Une vue 3D d'Oued Mekerra est représentée d'après le MNT TIN crée.

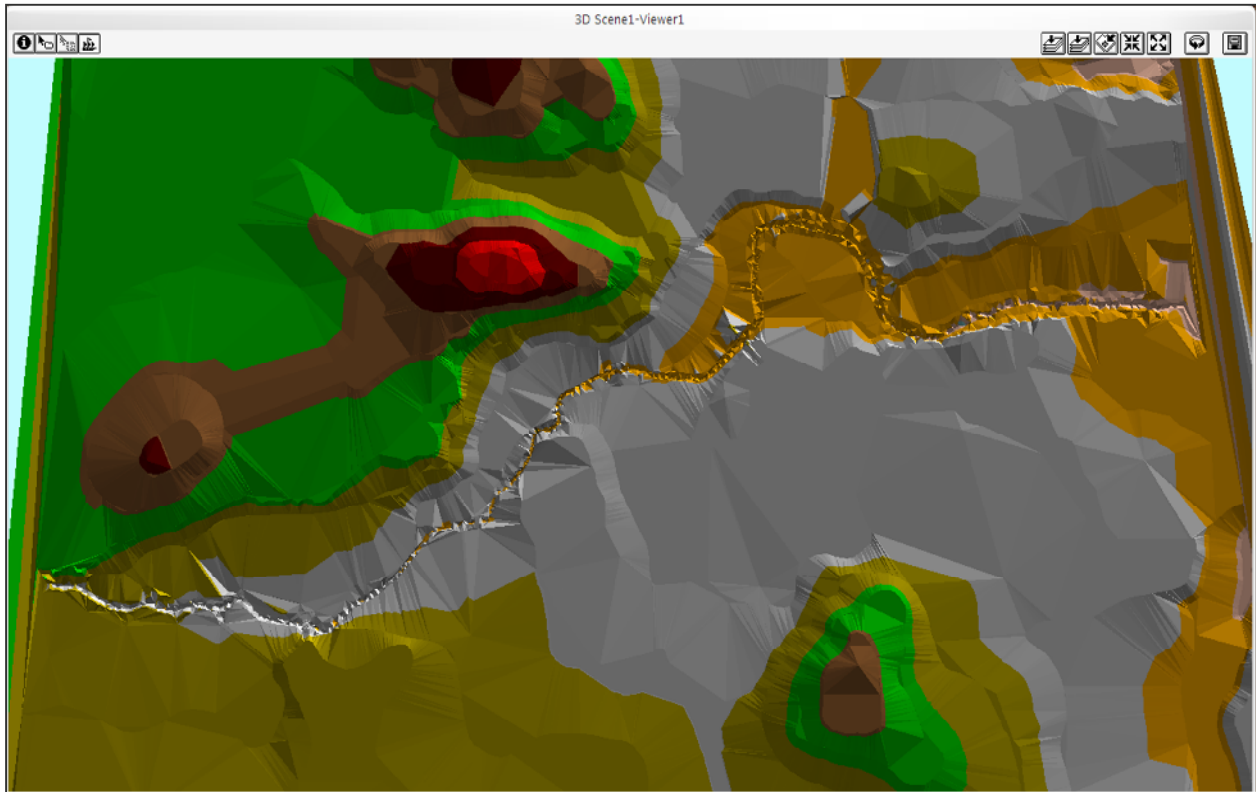


Figure 40 : Représentation 3D d'Oued Mekerra d'après le MNT TIN.

4.4.2.2. EXTRACTION DES DONNEES TOPOGRAPHIQUES POUR L'HEC RAS

Une fois le MNT TIN est créé, on peut facilement former la géométrie pour l'HEC RAS et cela se fera grâce à l'interface HEC GeoRAS qui est une prolongation de GIS d'ArcView spécifiquement conçue afin de traiter des données géospatiales pour l'usage avec le système HEC RAS. Et du fait que l'HEC GeoRAS exige un MNT représenté par un terrain irrégulier triangulé (TIN), l'ArcView, la prolongation de l'analyste 3D et l'analyse spatial sont imposées pour employer HEC-GeoRAS.

Avec la prolongation preRAS, HEC GeoRAS utilise le MNT TIN pour préparer un dossier des données géométriques évitant ainsi une étape fastidieuse de saisie manuelle. Le dossier d'importation est créé à partir d'une série des thèmes de Ras qui sont les shapefiles d'ArcView extraites du modèle numérique de terrain. Ces thèmes de Ras sont : la ligne centrale de jet (Stream Centerline), les lignes centrales de chemin d'écoulement (Main Channel Banks), les lignes de berges (Flow Path Centerlines), les profils en travers (Cross-Sectional Cut Lines), le modèle de rugosité (Land Use), le levée d'alignement (Levee Alignment), les régions inefficaces d'écoulement (Ineffective Flow Areas) et les zones de stockage (Storage Areas).

La figure suivante représente la démarche exigée par HEC GeoRas afin de former le dossier de la géométrie pour HEC RAS.

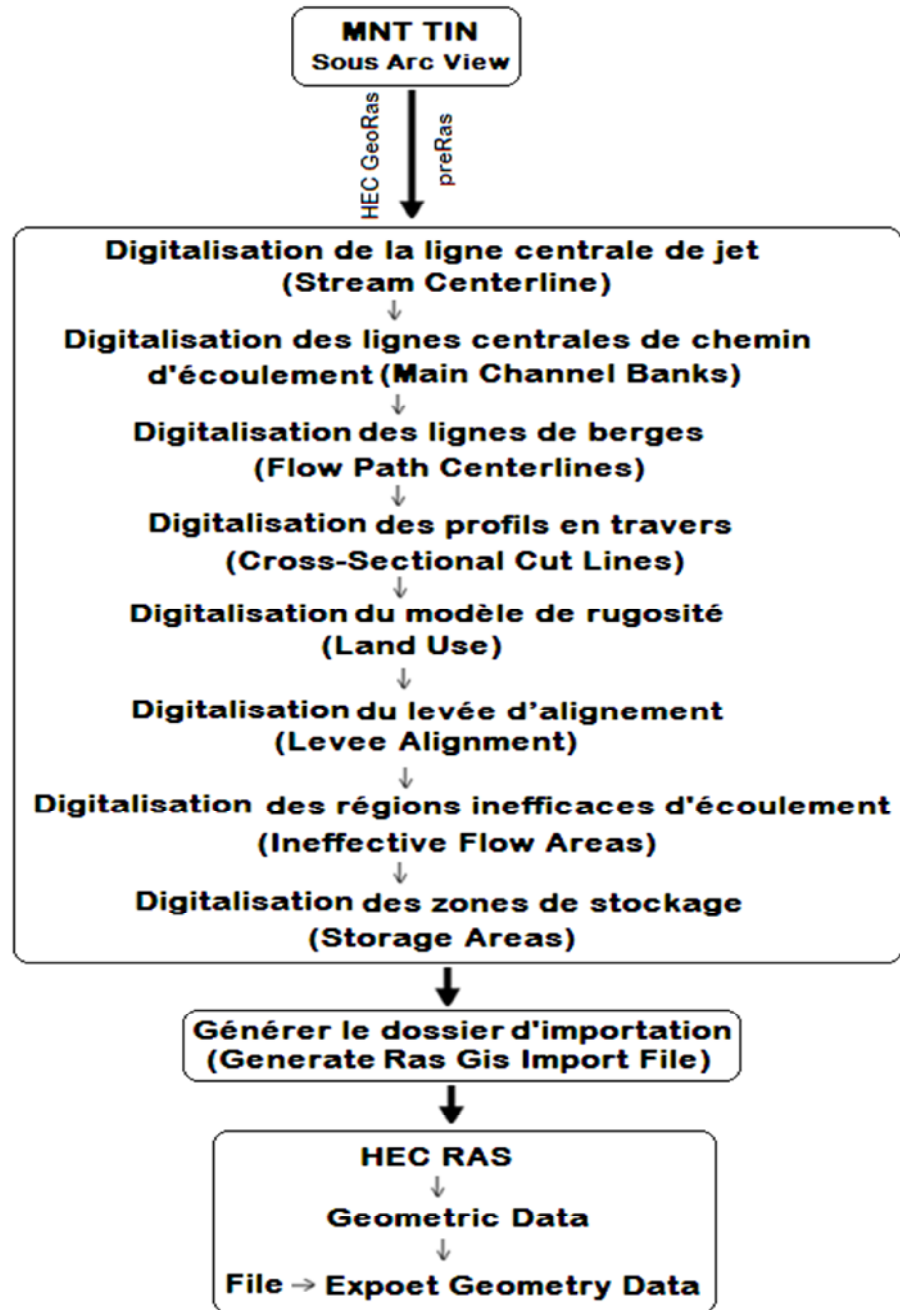


Figure 41 : Diagramme récapitulant la méthode de préparation du dossier de données topographiques pour le HEC RAS par le HEC GeoRAS.

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

- ❖ Les profils doivent être perpendiculaires à la direction de l'écoulement des eaux (ainsi les directions de flux dans le lit majeur ne sont pas toujours bien connues) ;

- ❖ Ils ne doivent pas se croiser, recouper toute la plaine d'inondation et décrire le profil en long du cours d'eau (cela n'est pas toujours facile à réaliser dans le cas d'un cours méandriforme avec une large plaine d'inondation) ;
- ❖ Ils doivent encadrer les ouvrages structurants du cours d'eau (ponts, seuils...) ;
- ❖ Ils doivent prendre en compte les modifications géomorphologiques des lits mineur et majeur tel que un élargissement, un méandre ou une contraction (en conséquence des problèmes se font lorsque les méandres sont très resserrés, il devient compliqué de tracer des profils sans que les tracés se recourent).

La rugosité est prise homogène le long du lit mineur de l'Oued la valeur de $n = 0.025$ qui correspond à un lit en gabionnage (d'après la DHW de Sidi Bel Abbès). Et puisqu'on n'a pas un modèle bien définie dans la totalité du lit moyen et majeur, elle est tenue de nature urbain de valeur $n = 0.06$. [USACE 2002]

La figure suivante représente les principaux thèmes de Ras créés par l'HEC GeoRAS (preRas) sous l'Arc View et à l'aide de l'MNT TIN.

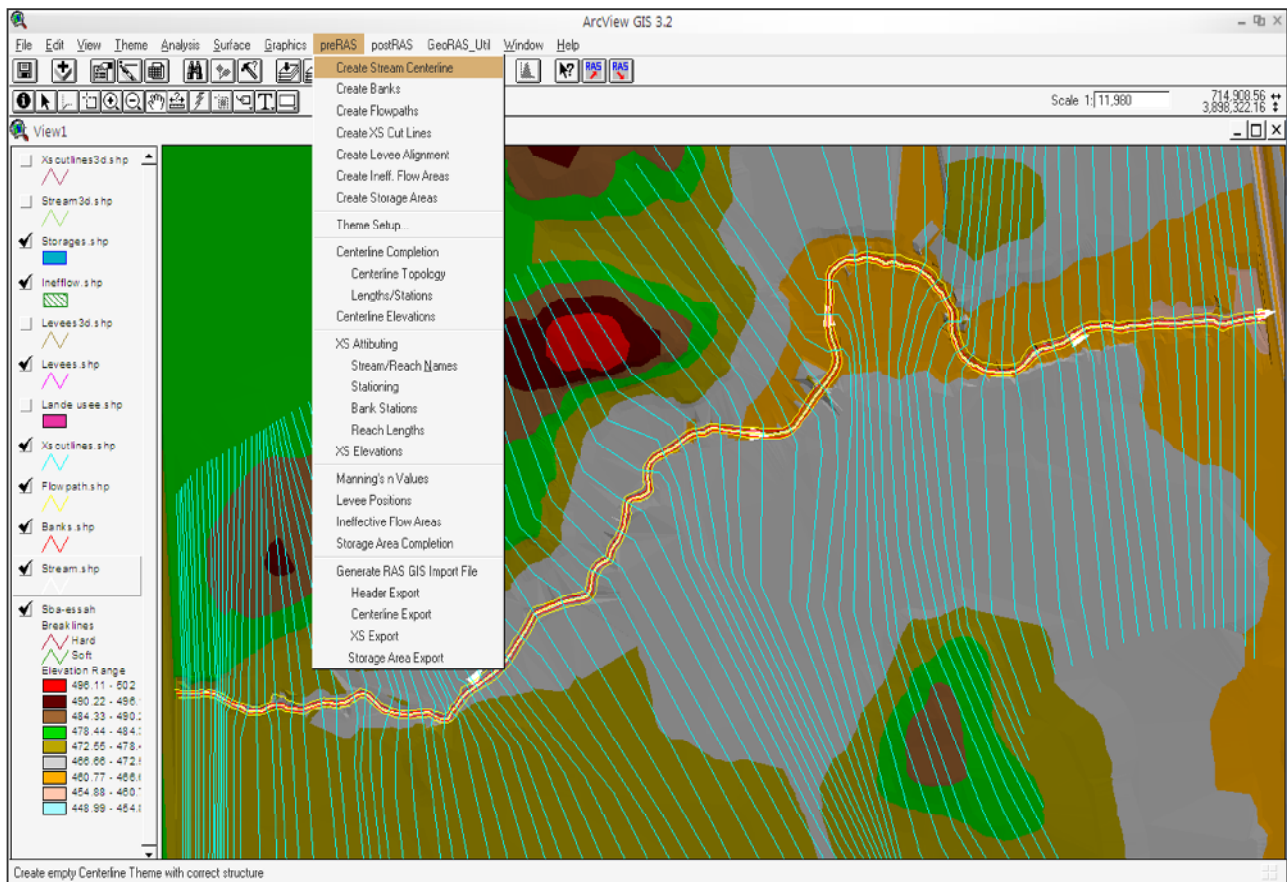


Figure 42 : Principaux thèmes de Ras créés par HEC GeoRAS (preRAS).

Une fois le dossier d'importation est prés, l'HEC RAS l'exporte grâce la commande **Geometric Data** et fait apparaître la fenêtre de la fig

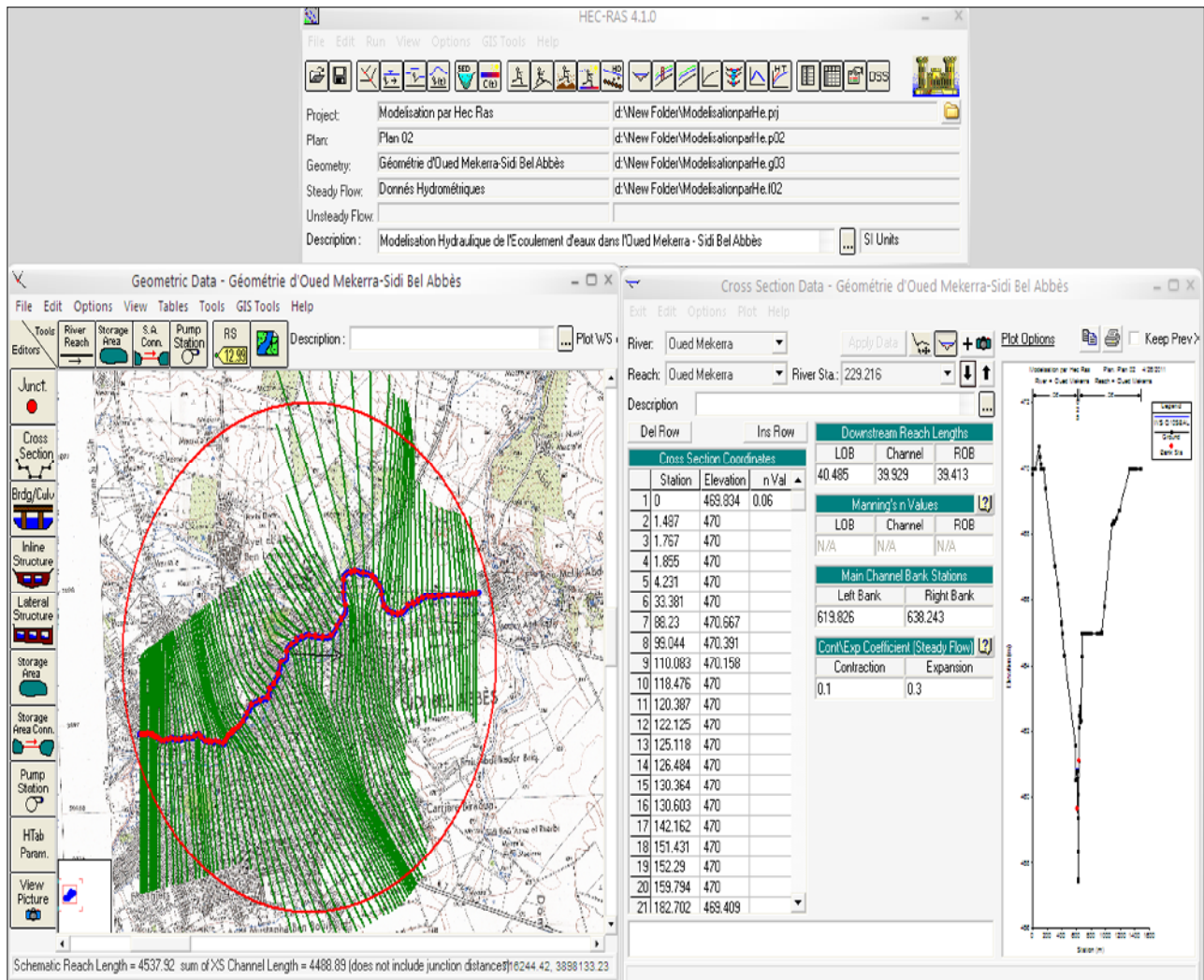


Figure 43 : La Géométrie de l'Oued Mekerra dans le logiciel HEC RAS.

4.4.3. DONNEES HYDROMETRIQUES ET CONDITIONS AUX LIMITES

Après avoir introduit la géométrie du cours d'eau, l'étape suivante est de spécifier les débits utilisés pour calculer les profils d'écoulement. Pour cela, on a engagé la simulation hydraulique en régime graduellement varié avec les cinq valeurs des débits qui sont obtenus par l'ajustement de la série des débits enregistrés à la station hydrométrique de Sidi Ali Benyoub suivant une loi Log-Normale et qui correspondents aux périodes de retours 10, 30, 50, 100 et 1000 ans.

De ce fait, dans la fenêtre principale, cliquez sur le bouton **Steady Flow Data** et utilisez les débits issus de l'étude hydrologique pour calculer les profils d'écoulement correspondants. Pour entrer ces valeurs de débits, indiquez d'abord **Number of Profiles**. Par la suite, dans le menu **Options**, allez à **Edit Profile Names** et indiquez les noms de profils appropriés (Q_{10} , Q_{30} , Q_{50} , Q_{100} et Q_{1000}).

Les valeurs des débits qui sont entrées aux cases correspondantes sont représentatives de la section amont et sont considérés valides sur tout le tronçon de la rivière. La figure 44 montre l'édition de ces données.

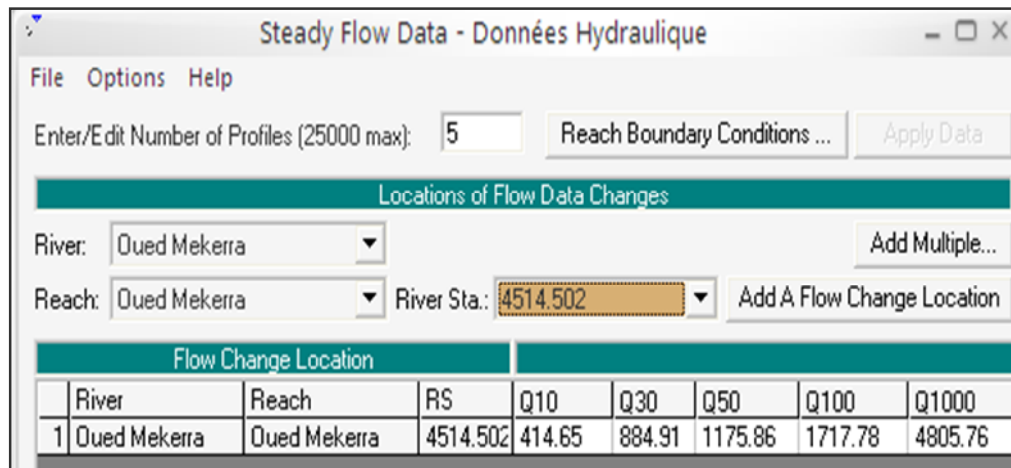


Figure 44 : Fenêtres des données hydrométriques.

En cliquant sur le bouton **Reach boundary conditions** et on définit les conditions aux limites en aval si l'écoulement est fluvial (infracritique), et en amont si l'écoulement est torrentiel (supercritique). Le HEC-RAS offre la possibilité de faire entrer comme conditions aux limites, une hauteur d'eau connue, une profondeur critique, une pente normale du point en amont ou en aval selon le régime d'écoulement ou une courbe d'estimation (différentes hauteurs d'eau et les débits correspondants).

Pour notre cas, on a introduit la valeur de 0.003 m/m comme une pente normale évaluée à la tête de la ville de Sidi Bel Abbès et obtenue auprès la DHW de Sidi Bel Abbès. La figure 45 indique ces conditions aux limites.

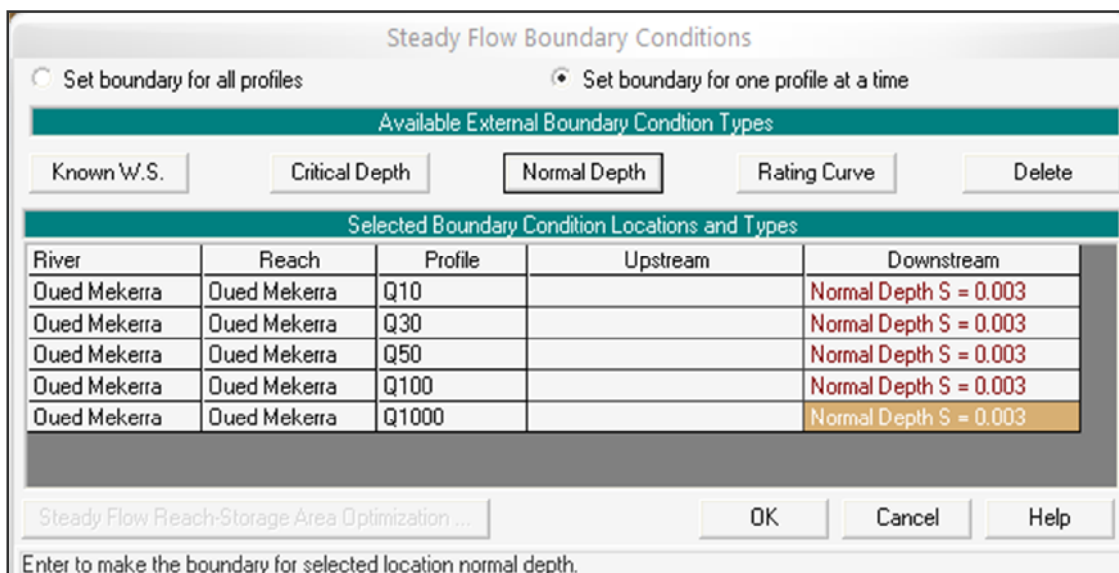


Figure 45 : Fenêtres des conditions aux limi

4.4.4. SIMULATION HYDRAULIQUE

Après avoir défini la géométrie, les données hydrométriques et les conditions aux limites nécessaires à la simulation et après avoir enregistré les fichiers correspondants, on peut passer à la simulation hydraulique en utilisant le bouton **Perform a steady flow simulation** pour le régime permanent, ou le bouton **Perform Unsteady flow simulation** pour le régime non permanent. Dans notre cas on obtient la fenêtre suivante :

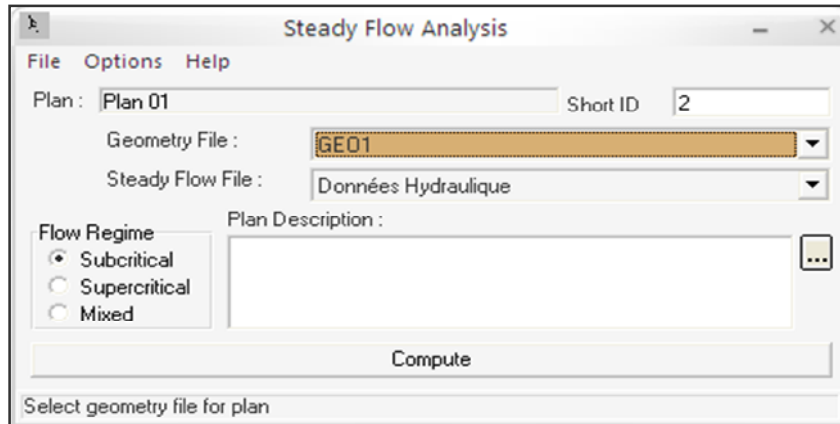


Figure 46 : Fenêtres de simulation pour le régime permanent.

Cocher le régime adéquat (fluviale pour notre cas). Puis cliquez sur la barre **compute** (calculez) ; si l'opération se déroulera normalement, la simulation s'enregistrera automatiquement, dans le cas échéant vous aurez des erreurs relatives généralement aux mauvaises manipulations ou au un choix erroné des conditions aux limites, corrigez ces erreurs et refaites le calcul. Les résultats obtenus sont affichés sous forme graphique ou sous forme de tableau détaillé, ils peuvent être exportés vers un fichier ou un périphérique d'impression. La figure 47 affiche les résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé.

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	Min Ch El (m)	W.S. Elev (m)	E.G. Elev (m)	E.G. Slope (m/m)	Vel Chnl (m/s)	Flow Area (m ²)	Top Width (m)	Froude # Chl
Dued Mekerra	4514.502	Q10SABL	414.65	470.95	473.79	473.85	0.001497	1.02	420.79	258.67	0.23
Dued Mekerra	4514.502	Q30SABL	884.91	470.95	474.54	474.65	0.002093	1.49	642.65	342.39	0.29
Dued Mekerra	4514.502	Q50SABL	1175.86	470.95	474.91	475.04	0.002240	1.68	775.92	387.74	0.30
Dued Mekerra	4514.502	Q100SABL	1717.78	470.95	475.56	475.72	0.002146	1.86	1053.11	454.26	0.31
Dued Mekerra	4514.502	Q1000SABL	4805.76	470.95	477.99	478.24	0.001893	2.44	2459.50	734.45	0.31

Figure 47 : Affichage des résultats de simulation sous forme d'un tableau détaillé.

Tandis que la figure 48 présente ces résultats sous la forme

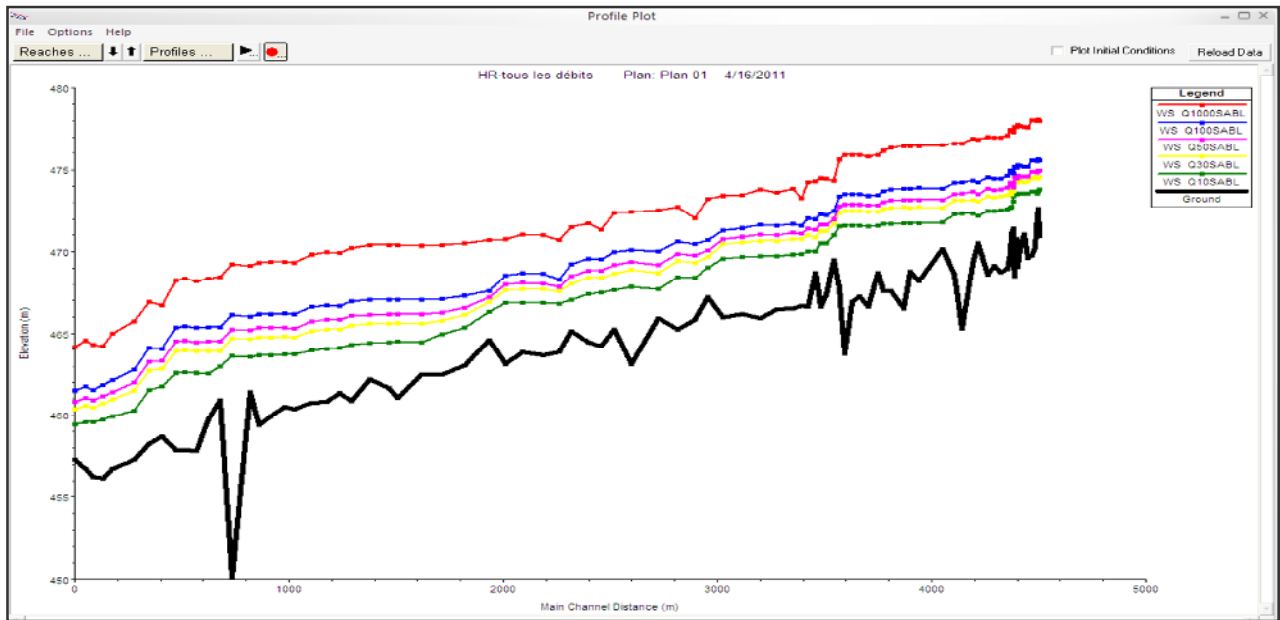


Figure 48 : Affichage des résultats de simulation sous forme graphique. Une vue 3D de ces résultats de simulation est représentée dans la figure 49.

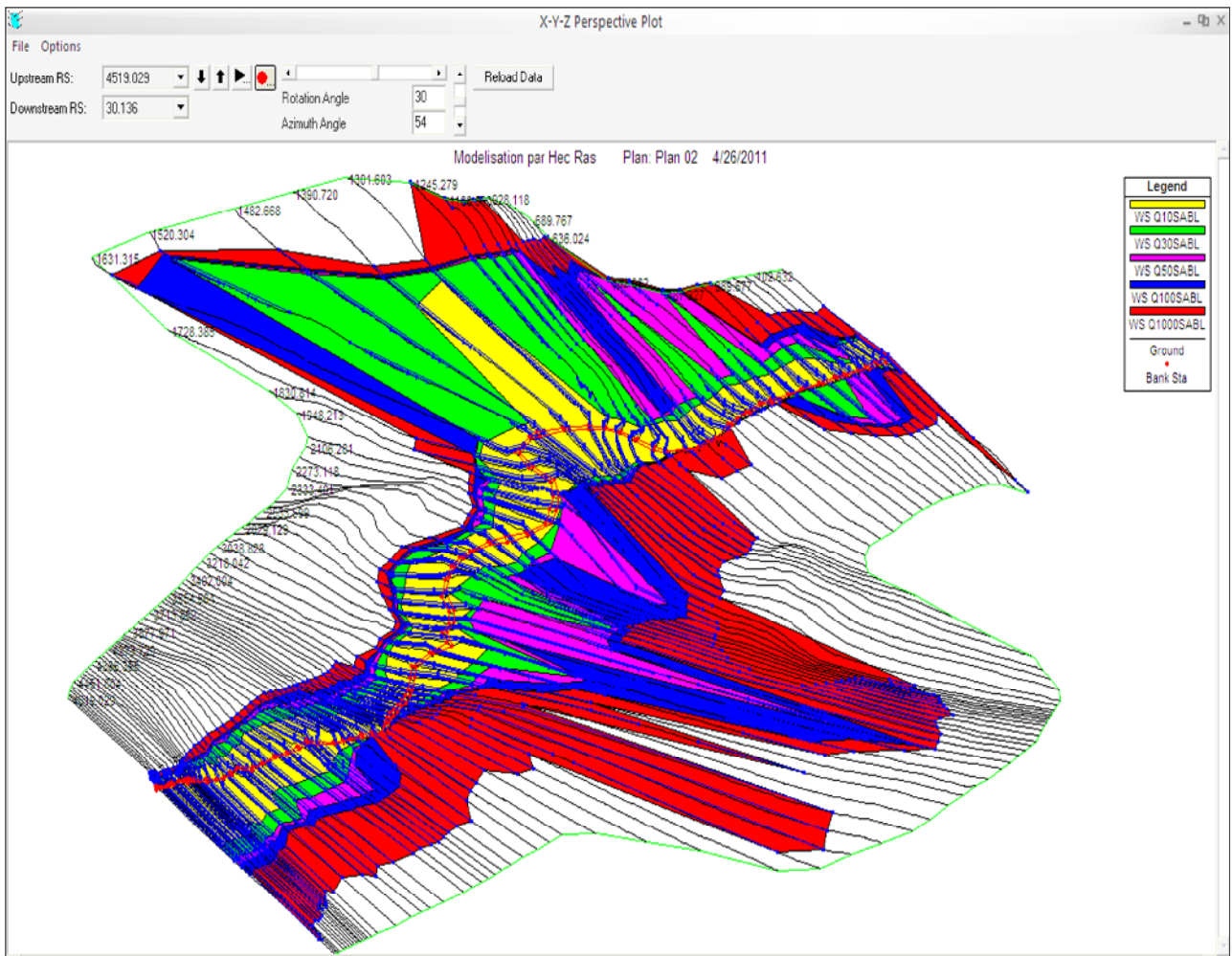


Figure 49 : Vue en 3D des résultats de simulation.

5. CARTOGRAPHIE DE L'ALEA INONDATION

Quand la simulation est effectuée, on peut, grâce à l'HEC GeoRAS (postRas), exporter les résultats de simulation vers l'Arc View afin de délimiter les zones inondables. La figure suivante représente la délimitation finale de la zone inondable après exportation du dossier de simulation.

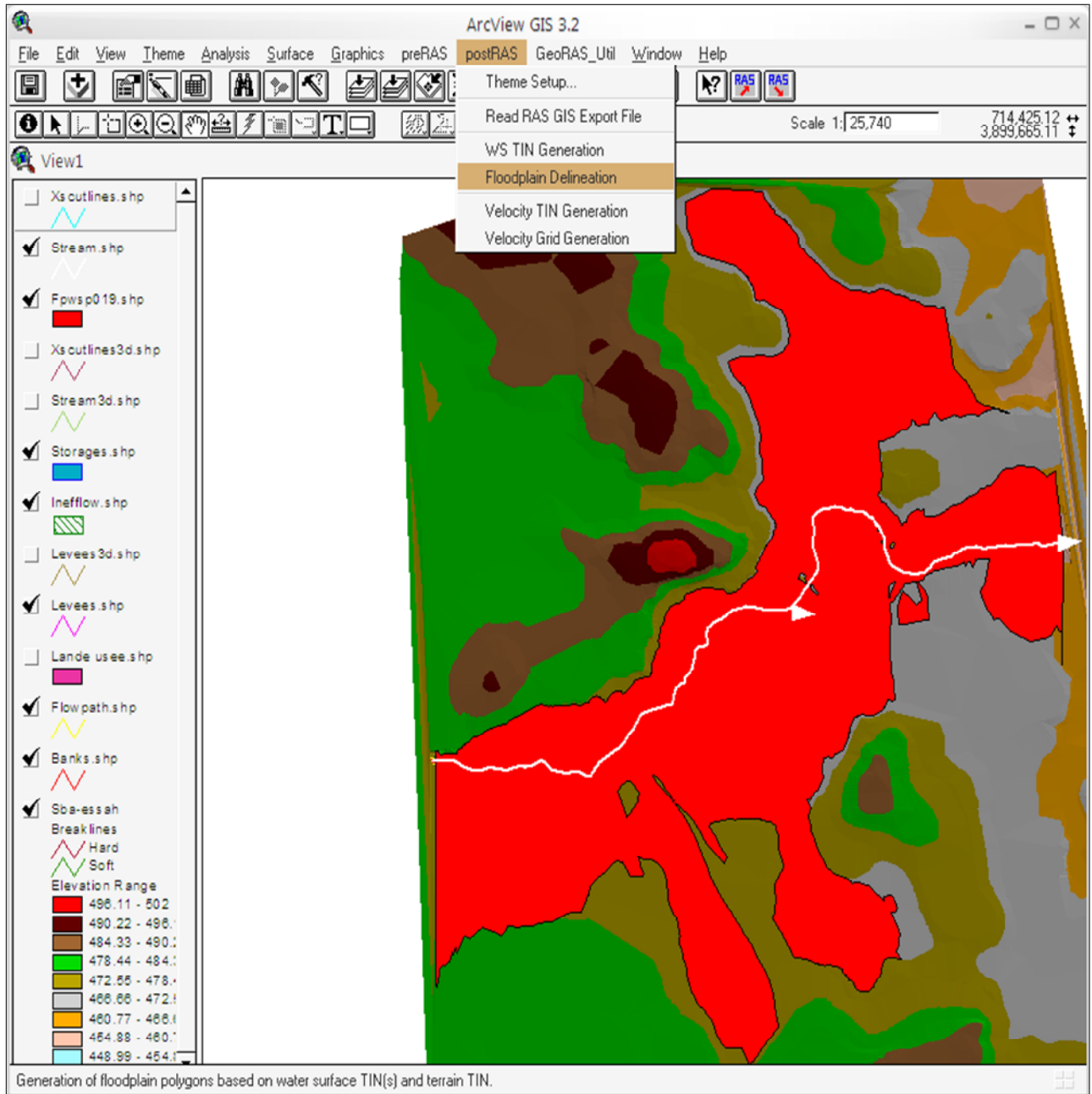


Figure 50 : Tache inondable d'après un débit de fréquence millénnale.

Une vie 3D de cette cartographie d'après un débit de fréquence millénnale est montrée dans la figure 51.

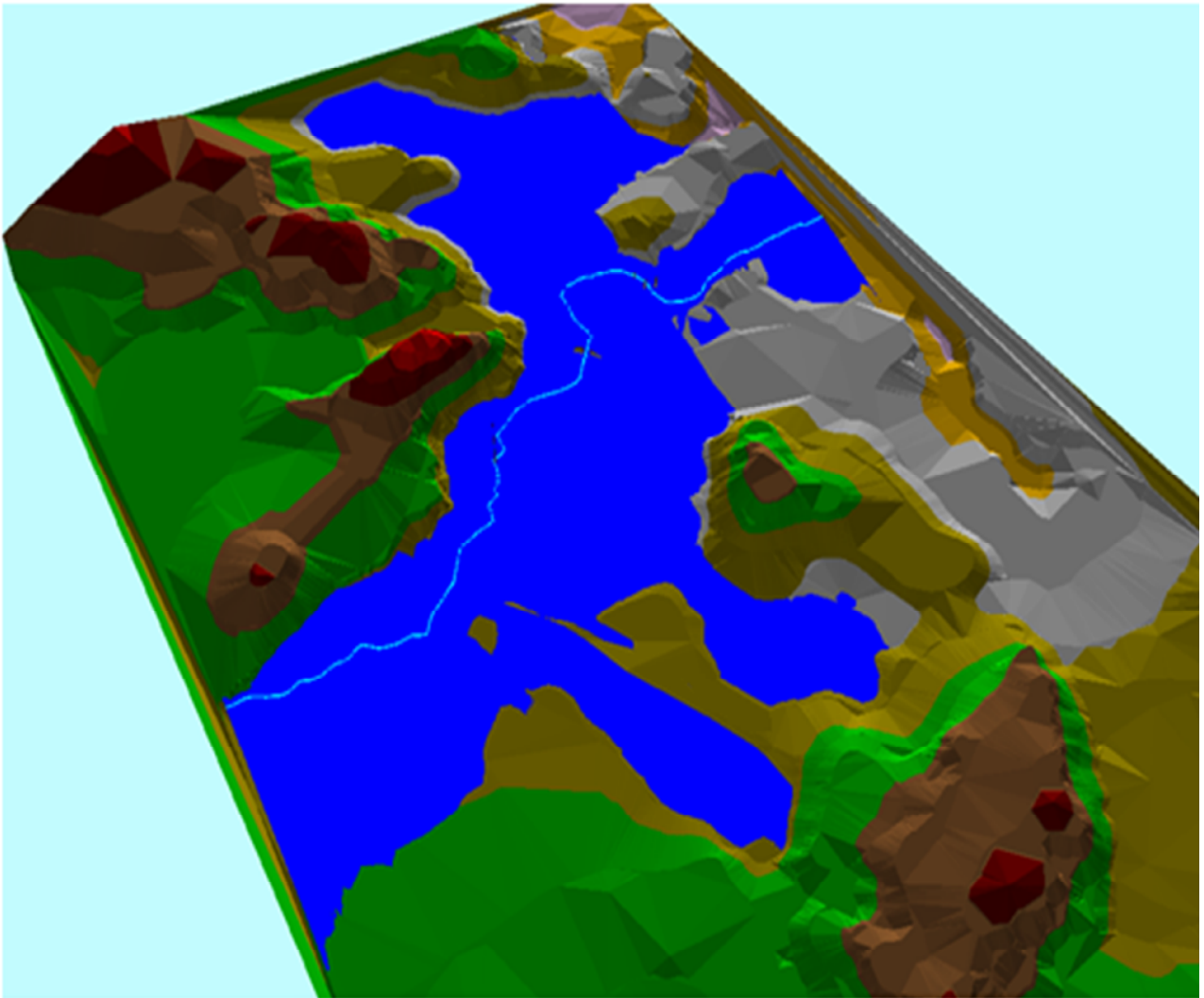


Figure 51 : Vue 3D de la tache inondable d'après un débit de fréquence millénnale.

Une fois les taches inondables sont identifiées pour les différents débits prévenus, l'Arc Gis va classifier et organiser leurs couches thématiques pour faire extraire à la fin la carte d'aléa inondation. La figure suivante représente cette carte d'aléa.

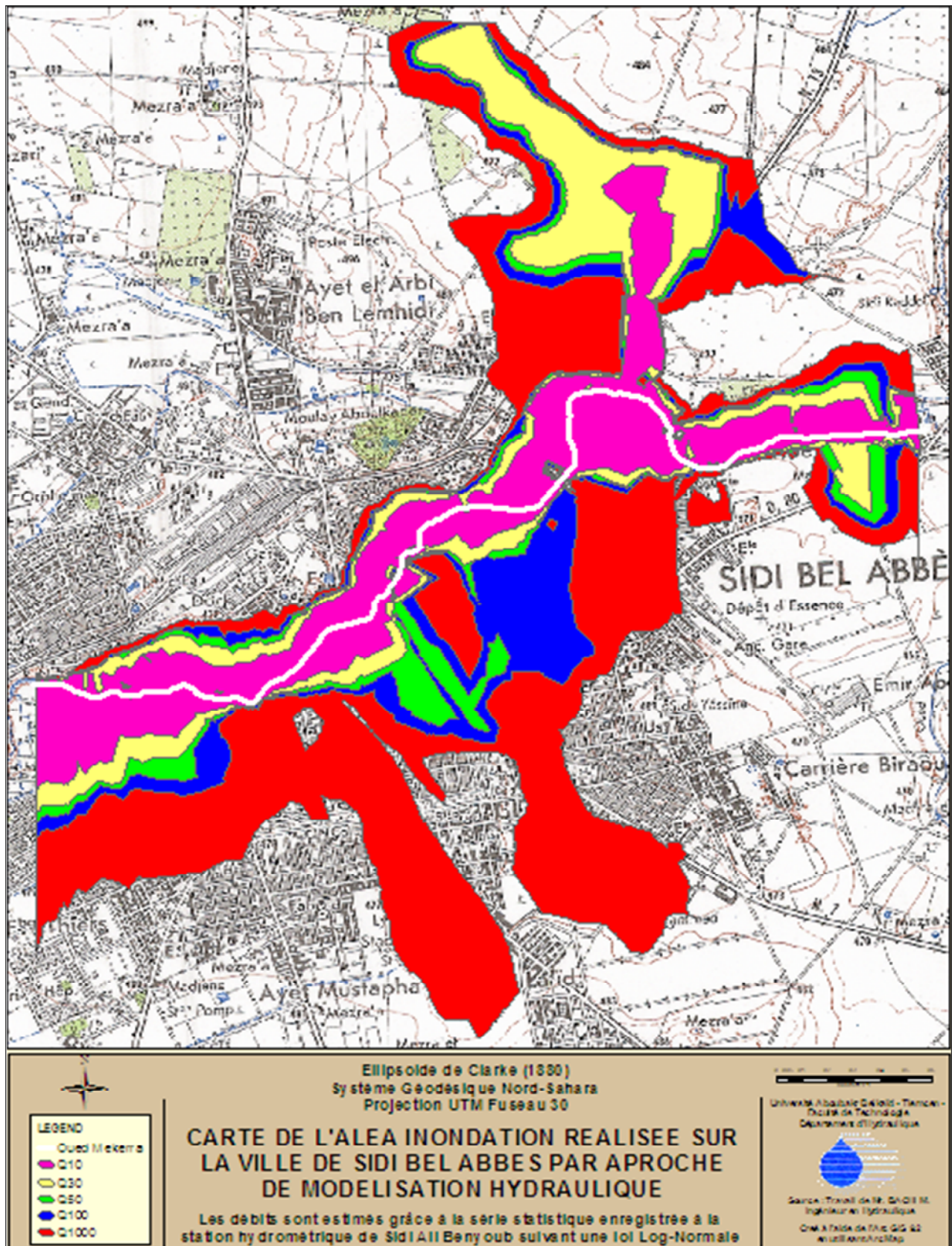


Figure 52 : Carte de l'aléa inondation de la ville de Sidi Bel Abbès obtenus par l'ajustement des débits enregistrés à la station de Sidi Ali Benyoub suivant une loi Log-Normale.

6. INTERPRETATION DES RESULTATS

Il faut signaler qu'auparavant, on avait l'intention d'effectuer la cartographie de l'aléa inondation dans la ville de Sidi Bel Abbès avant et après réalisation des aménagements de protection de la ville (canal de dérivation à l'amont de Sidi bel Abbès, aménagement d'Oued Mekerra dans sa traversé de la ville et construction du barrage écrêteur de Tabia). Néanmoins, puisqu'on a que l'information topographique (levé topographique) avant aménagement de l'Oued Mekerra, on a satisfait qu'avec la cartographie de l'aléa inondation avant aménagements de protection.

Encore, il faut connaitre que la source du risque inondation dans la ville de Sidi Bel Abbès provient principalement des crues de l'Oued Mekerra via le Sud-Ouest, de l'Oued Mellah via le Sud-Est et l'Oued drainant le bassin versant développé à Sidi Bel Abbès via le Nord-Est. Pour cela, la cartographie de l'aléa inondation dans la totalité de la ville de Sidi Bel Abbès nécessite la connaissance auparavant de l'hydrologie et de la topographie des Oueds cités précédemment. Et puisque l'information disponible ne concerne que l'Oued Mekerra, on a effectué que la cartographie due à cet Oued. Par conséquence, le choix des sections en travers dans la modélisation hydraulique par Hec Ras est effectué avec prudence de manière que ses sections soient touchées que la tache inondable due aux crues d'Oued Mekerra.

Également dans la modélisation par Hec Ras, on a adopté l'écoulement permanent de régime fluvial. Ce choix est bien justifié puisque l'écoulement nom permanent a besoins obligatoirement de l'hydrogramme de crue ; une donnée qui est entièrement manquante. Et puisque le levé topographique d'Oued Mekerra dans sa traversée de Sidi Bel Abbès montre que ce dernier est situé dans une zone plaine (altitude comprise entre 481 et 460 m sur une distance d'environ 4.5 km), le régime fluviale apparaît adéquat.

La cartographie de l'aléa inondation par approche de modélisation hydraulique (Figure 52) montre que la tache inondable s'agrandit, depuis la crue décennale jusqu'à la crue millénnalle, auteur des différents lits de l'Oued Mekerra dans sa traversée de Sidi Bel Abbès. A partir de la crue décennale, elle commence à occuper le lit majeur de l'Oued et pénétrer dans la partie Nord-est de la ville depuis la déviation remarquable de l'Oued à droite de Sidi Djilali. Puis, elle se glisse vers la partie Sud-Est à droite de Cheikh Ben Badis à partir de la crue trentennale. Ensuite, elle s'enfonce vers la partie Sud de la ville en parallèle avec l'attente des crues cinquantennale et centennale. Et avec l'éventualité de la crue millénnalle, elle prend la forme d'un oiseau pour dire aux décideurs qu'il faut écarter les habitations et dépeupler la ville.

7. CONCLUSIONS

La protection parfaite contre le risque inondation de toutes fréquences correspond en réalité à un cout infini. Quel que soit l'aménagement adopté pour ce fait, seulement la compréhension du fonctionnement de ce risque pour mieux le prévenir avec une gestion efficace qui assurent la protection optimum. Cette compréhension doit passer par l'identification des sites exposés à ce genre de phénomènes.

Dans ce sens, notre travail représenté par la cartographie de l'aléa inondation par approche de modélisation hydraulique dans la ville de Sidi Bel Abbès, propose aux décideurs qui ne sont pas toujours spécialistes une vision claire et simple afin de comparer les différents projets et scénarios d'aménagement susceptibles à être réalisés et fournit un document de base aux autres planificateurs. Par conséquence, il met en œuvre une méthodologie consistante et validée de gestion intégré du risque inondation.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A travers ce mémoire, on a essayé d'abord d'expliquer la notion du risque inondation en montrant qu'il est un concept binomiale combinant en plus de l'aléa (le phénomène physique), la vulnérabilité qui est les conséquences dommageables de cet aléa sur les enjeux. Par conséquent, la maîtrise de sa gestion nécessite obligatoirement la connaissance de deux notions ; d'une part la compréhension du fonctionnement de l'aléa et d'autre part la maîtrise de l'occupation du sol.

Les méthodes d'approches traditionnelles de gestion des données du risque inondation (historique, hydrogéomorphologique ...) sont devenues de plus en plus inadaptées vu les rythmes des changements des indicateurs (occupation du sol, pluviométrie, etc.). Afin de combler cette déficience, l'utilisation de l'outil informatique a révélé un horizon très ambitieux de développement des nouvelles méthodologies à travers les données que peut fournir en matière de modélisation et de cartographie de l'aléa.

Dans ce sens, on a essayé de développer une méthodologie de cartographie à partir de laquelle on enveloppe le premier volet du risque qui est l'aléa ; c'est la cartographie de l'aléa inondation par approche de modélisation hydraulique.

L'utilisation du logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS a permis de connaître bien le comportement du cours d'eau et le cas échéant de prévoir les inondations et de pouvoir anticiper les éventuels dégâts. Il a l'avantage d'être présenté sous la famille des logiciels de modélisation HEC qui ont une grande connexité entre eux. L'application HEC-GeoRAS offre la compatibilité entre le logiciel de modélisation hydraulique HEC-RAS et les logiciels de cartographie du système d'information géographique (Arc Gis, Arc View ...), elle permet d'activer le processus d'importation-exportation entre ces logiciels. L'étude sera améliorée beaucoup plus si elle utilise le logiciel de modélisation hydrologique HEC-HMS pour modéliser le débit à partir de la station de Sidi Ali Benyoub jusqu'à la tête de la ville de Sidi Bel Abbès. Surtout qu'on connaît que ce logiciel, en plus qu'il est de la même famille des logiciels utilisés précédemment, il demande le minimum des données d'entrer pour faire la modélisation hydrologique (pluviométrie et morphométrie du bassin versant).

Néanmoins malgré la performance prouvé de logiciel HEC RAS et sa convivialité, il présente la contrainte de non prise en compte des échanges de masse et des échanges turbulents entre le lit mineur et le lit majeur, ces phénomènes sont responsables de pertes de charge très importantes.

Les résultats de cette cartographie sont schématisés d'une manière simple permettant ainsi aux différents acteurs, dans un cadre de gestion du risque inondation, de les utiliser pour décider (c'est un outil d'aide à la décision).

Le problème le plus sérieux qu'on a rencontré tout au long de préparation de ce travail était l'absence des données réelles fiables et la difficulté d'accès à celles existantes, cette contrainte nous a obligé de choisir des modèles simples et de simplifier d'autres modèles, les données topographique étaient de précision modeste alors que les techniques modernes atteignent des précisions millimétrique à l'échelle altimétrique.

Enfin et dans un cadre de préparation d'autres mémoires, ce sujet sera enrichi et complété par les axes de recherche suivants :

- Validation de la cartographie en basant sur l'utilisation des images satellitaires, les photographies aériennes et l'observation de terrain ;
- Modélisation hydrologique par le logiciel HEC-HMS afin de modéliser le débit à partir de la station de Sidi Ali Benyoub jusqu'à la tête de la ville de Sidi Bel Abbès ;
- Modélisation hydraulique de l'aléa inondation par un logiciel 2D ou 3D pour comparer la précision ;
- Cartographie de la vulnérabilité des enjeux exposés (soit par approche quantitative ou qualitative) ;
- Comparaison entre la cartographie du risque inondation par approche de modélisation hydraulique, hydrogéomorphologique et historique.

Et dans un cadre Professionnel, je souhaite que je trouve l'occasion de travailler sur le même sujet dans une équipe afin de mettre en œuvre une méthodologie consistante de gestion du risque inondation.

GLOSSAIRE

Aléa :	Phénomène naturel ou anthropique d'occurrence et d'intensité donnée.
Anthropique :	relatif à l'activité humaine.
Crue :	Correspond à une augmentation temporaire du débit d'un cours d'eau, elle peut être décrite en fonction de la hauteur, le débit et la vitesse du courant. En fonction de l'importance des débits, elle peut être contenue dans son lit mineur du cours d'eau, ou déborder dans son lit moyen ou majeur.
Crue de référence :	Crue la plus forte connue ou, si cette crue est plus faible qu'une crue de fréquence centennale, cette dernière.
Courbe de tarage :	Une représentation graphique de l'évolution du débit « Q » en fonction de la hauteur « H » ; « $Q = f(H)$ ».
Enjeu :	Ensemble des personnes et des biens pouvant être affectés par un phénomène naturel ou anthropique.
Exutoire :	orifice ou conduit servant à évacuer un trop-plein d'eau.
Hydrogramme :	Une représentation graphique de l'évolution du débit en fonction du temps ; « $Q = f(t)$ ».
Jaugeage :	Ensemble des opérations destinées à mesurer le débit d'une rivière.
Limnigramme :	Une représentation graphique de l'évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps ; « $H = f(t)$ ».
Lit d'étiage :	Chenal d'écoulement correspondant statistiquement à la période de l'année où le débit d'un cours d'eau atteint son point le plus bas (basses eaux).
Pédologie :	Science qui étudie les sols, leur formation et leur évolution.
Période de retour :	Durée théorique moyenne, exprimée en année, qui sépare deux occurrences d'un phénomène donné.
Ripisylve :	Végétations bordant la rivière sur lesquelles s'écoulent les crues moyennes.
Talweg :	Ligne qui rejoint les points les plus bas d'une vallée, par opposition à la ligne de crête.
Vulnérabilité :	Exprime le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- 1) BABA-HAMED K, YOUSFI S, BOUANANI A (2008) : « Hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest Algérien) », Revue Semestrielle Scientifique et Technique, Journal de l'Eau et de l'environnement, ENSH-Blida.
- 2) BAHLOULI (2001) : « Les risques majeurs et l'aménagement du territoire », Colloque international, 15 et 16 2004- Alger.
- 3) BARROCA Bruno (2006) : « Risque et vulnérabilités territoriales : les inondations en milieu urbain », Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-La-Vallée.
- 4) BARROCA Bruno, POTTIER Nathalie, LEFORT Emilie (2005) : « Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge Aval », Septièmes Rencontres de Théo Quant, janvier 2005.
- 5) BARTHÉLÉMY Jacques (2006) : « Plan de prévention des risques d'inondation ; notice de présentation », Direction départementale de l'équipement de SEINE-ET-MARNE, Service Etude et Prospective, Pole Environnement, Préfecture de SEINE-ET-MARNE.
- 6) BENMANSOUR Nadir (2009) : « Etude de crues et localisation des zones inondables », Mémoire de Magister, Ecole Nationale Supérieure Agronomique El Harrach-Alger
- 7) BENNIS Saad (2004) : « Hydraulique et hydrologie », 2^{ème} Edition, École de technologie supérieure-Canada.
- 8) BLIN Pierrick (2001) : « Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences », Thèse de Grande de Maître-Université du Québec.
- 9) BOB Booth, ANDY Mitchel (2001):« Prise en main d'ArcGIS », ESRI, New York Street Redlands-USA.
- 10) BORSALI Amine Habib, BEKKI Abdelkader, HASNAOUI Okacha (2005) : « Aspect hydrologique des catastrophes naturelles - Inondation, glissement de terrains - Etude d'un cas Oued Mekerra (Sidi Bel Abbès) », XXIII^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil -RISQUE ET ENVIRONNEMENT.
- 11) BOUBCHIR Abdellah (2007) : « Risques d'inondation et occupation des sols dans le Thore (région de Labruguière et de Mazamet) », Mémoire de Master en Géographie et Aménagement, Institut Daniel Faucher-Université de Toulouse.
- 12) CHACHOUA Abdeldjalil (2009) : « Gestion de crue dans un bassin versant ; Etude Hydrologique, Hydraulique et Aménagement », Mémoire de Magister-Université de Tlemcen
- 13) CORNÉLIS Bernard, BILLEN Roland (2001) : « La cartographie des risques et les risques de la cartographie », in HUPET P. (ed.), Risque et systèmes complexes : Les enjeux de la communication, P.I.E.-Peter Lang, MICHEL Q. & BRUNET S.(series eds), Collection : Non-prolifération, Vol. 2, Bruxelles, pp. 207-222, ISBN : 90-5201-944-4.Communication Université de Liège
- 14) CORTES Amandine (2006) : « L'appropriation active du risque inondation : intérêts et limites de la réglementation. Etude de cas entre Seyssel et Bregnier Cordon (Haut Rhône) », Rapport de stage Ingénieur Maître-Institut de la Montagne.
- 15) DEFRANCE Bruno (2009) : « Plan de prévention des risques naturels d'inondation (PPRNi) Brévenne – Turdine », Compte-Rendu de la 1^{ère} réunion publique le 1^{er} octobre 2009 à Tarare, Chef du Service Environnement Risques et Développement durable (SERDD).
- 16) Direction Générale De La Protection Civile d'Alger : « Les inondation en Algérie », <http://www.protectioncivile.dz/pdf/rapport%20sur%20les%20inondations%20pour%20DP%20ET%20CABINE1.pdf>
- 17) HALLOUCHE Bachir (2007) : « Cartographie des zones inondables de la plaine de Sidi Bel Abbès par l'approche hydrogéomorphologique », Mémoire de Magister, Université Djilali Liabes - Sidi Bel Abbès.
- 18) HOSTACHE Renaud (2006) : « Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique », Thèse de Doctorats, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts-Montpellier.
- 19) IRIS Julien (2009) : « Contribution de la méthodologie et de la technologie géodécisionnelle pour l'aide à l'évaluation des risques naturels dans le secteur de l'assurance en France », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris.
- 20) LABORDE J.P. (2000) : « Eléments d'hydrologie de surface », Cours de l'U.M.R. 5651 "Espace" du Centre National de la Recherche Scientifique, Université de Nice - Sophia Antipolis, Edition 2000.
- 21) LEDOUX Bruno (2006) : « La gestion du risque inondation », Edition TEC et D

- 22) MAREF Noureddine (2010) : « Estimation du transport solide dans les cours d'eaux à écoulement temporaire : Etude du cas de bassin versant de l'Oued Mekerra (Sidi Bel Abbès) », Mémoire de Magister-Université de Tlemcen
- 23) MERABET Abbés (2006) : « Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations », Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes-Sidi Bel Abbés.
- 24) Ministère de L'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (2004) : « Les risques majeurs et l'aménagement du territoire », Colloque International-Alger
- 25) MUSY André (2005) : « Hydrologie générale », Cours Virtuel de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Laboratoire d'Hydrologie et Aménagements (HYDRAM)-Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE),
- 26) OUFELLA O, TOABIA B (2005) : « Contribution à la cartographie des zones vulnérables aux inondations : Application de la méthode inondabilité ; Cas de la ville de Sidi Bel Abbès », Revue Semestrielle Scientifique et Technique, Journal de l'Eau et de l'environnement-ENSH Blida.
- 27) KLIJN T (2008) : « Flash flood warning based on rainfall thresholds and soil moisture conditions », Journal of Hydrology Pages 120–1.
- 28) RACLOT Damien (2003) : « Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine », Thèse de Doctorats en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental-Université Montpellier II-France.
- 29) RAHMANI Chérif 2004 : « Les risques majeurs et l'aménagement du territoire », Colloque International, 15 et 16 2004-Alger.
- 30) RELIANT Claire, HUBERT Gilles (2004) : « Politique de prévention des risques d'inondation et expertises socio-économiques : exemple de l'Angleterre », Rapport final d'un Programme de Recherche "Risque Inondation 2", Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable-France
- 31) SALOMON Jean-Noël (1997) : « L'homme face aux crues et aux inondations », Presses Universitaire de Bordeaux, Université Michel de Montaigne - Bordeaux.
- 32) SPPPI (2004) : « Prise en compte du risque inondation dans les études de dangers des installations classées », Cahier technique N°8, DRIRE Haute-Normandie - 21, avenue de la Porte des champs - 76037 ROUEN CEDEX Tél. 02 35 52 32 00 - Fax 02 35 52 32 32.
- 33) TERFOUS A (2011) : « Cours de 1er année Magister en Hydraulique. Option : Ecoulement et Transport Solide, Notice d'utilisation du logiciel HEC RAS », INSA-Strasbourg
- 34) US Army Corps of Engineers (2010) : « HEC-RAS River Analysis System : User's Manual », Manuel d'Utilisation de HEC-RAS, Hydrologic Engineering Center.
- 35) US Army Corps of Engineers (2002) : « HEC-GeoRAS Extension for support of HEC-RAS using ArcView : User's Manual », Manuel d'Utilisation de HEC-GeoRAS, Hydrologic Engineering Center.
- 36) YAHIAOUI A, TOUAIBIA B (2009) : « Paramètres de la crue caractéristique de l'Oued Mekerra et leurs intérêts dans l'étude des inondations », Séminaire Internationale sur l'Eau et l'Environnement, ENSH Blida.
- 37) ZEROUALI Mohammed (2005) : « Création d'une base de données du réseau d'assainissement de Chetouane et réalisation de cartes numérisées à l'aide d'un SIG », Ingénieur d'Etat en Hydraulique, Université de Tlemcen.
- 38) Consulté le <http://algeriaspace.blogspot.com/2009/05/photos-ville-de-sidi-bel-abbes-algerie.html>, 15/01/20011.
- 39) Consulté le <http://www.prim.net>, 15/01/20011.

ANNEXES

**ANNEXE I : CONSTITUTION DE SERIES DE VALEURS DES DEBITS DE
POINTE**

Tableau I-A : Deux séries des débits de pointe enregistrées aux stations de Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub.

Station Hydrométrique de Sidi Bel Abbès						Station Hydrométrique de Sidi Ali Benyoub					
N°	Année	Q _p (m ³ /s)	N°	Année	Q _p (m ³ /s)	N°	Année	Q _p (m ³ /s)	N°	Année	Q _p (m ³ /s)
1	1942	18.900	25	1975	20.400	1	1949	324.000	25	1977	105.000
2	1943	80.000	26	1976	9.840	2	1950	520.000	26	1978	1.210
3	1944	35.700	27	1977	22.500	3	1951	169.000	27	1979	43.200
4	1945	56.000	28	1978	4.360	4	1952	5.180	28	1980	57.800
5	1946	25.200	29	1979	10.100	5	1953	99.400	29	1981	89.400
6	1947	45.850	30	1980	7.448	6	1954	59.900	30	1982	57.000
7	1948	70.000	31	1981	9.060	7	1955	62.200	31	1983	4.408
8	1949	30.100	32	1982	53.850	8	1956	62.200	32	1984	66.360
9	1950	110.000	33	1983	3.615	9	1957	135.300	33	1985	77.160
10	1951	21.600	34	1984	25.250	10	1958	100.800	34	1987	215.000
11	1952	9.430	35	1985	8.900	11	1959	115.500	35	1988	152.000
12	1953	100.000	36	1986	104.000	12	1960	1.600	36	1989	228.400
13	1954	15.120	37	1987	9.829	13	1961	162.600	37	1990	213.200
14	1955	15.120	338	1988	45.360	14	1966	575.000	338	1991	41.240
15	1956	15.450	39	1989	64.600	15	1967	47.600	39	1992	55.350
16	1957	47.510	40	1990	135.000	16	1968	51.500	40	1993	27.800
17	1958	21.600	41	1991	39.500	17	1969	272.000	41	1994	236.600
18	1959	17.550	42	1992	70.340	18	1970	147.000	42	1995	197.100
19	1960	3.696	43	1993	70.340	19	1971	215.000	43	1996	218.000
20	1961	50.000	44	1994	215.000	20	1972	49.600	44	1997	403.000
21	1968	7.450	45	1995	154.500	21	1973	17.140	/	/	/
22	1969	12.560	46	1996	113.800	22	1974	46.440	/	/	/
23	1970	9.700	47	1997	170.000	23	1975	27.440	/	/	/
24	1974	17.100	/	/	/	24	1976	42.400	/	/	/

Source : Agence du Bassin Hydrographique d'Oranie Chott Chergui (ABHO)

**ANNEXE II : AJUSTEMENT DE LA SERIE DES DEBITS DE POINTE
ENREGISTRÉE A LA STATION DE SIDI BEL ABBES**

Tableau II-A : Ajustement suivant la loi Normale.

Rang (R°)	Q _{pi} classés (m ³ /s) [1]	Probabilité P de dépassement		Prob. P de non dépassement		Z ou u (variable réduite théorique) [4] = $U_i = \frac{Q_{pi} - \bar{Q}_p}{\sigma_{Q_p}}$	Z ou u (variable réduite Expérimentale) [7] = [3] et à partir de la table
		P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérimentale [2]	P(Q>Q _i) ; Loi Normale (théorique) [6] = 1 - [5]	P(Q<Q _i) ; théorique (5) = [4] et à partir de la table	P(Q<Q _i) ; Expérimentale [3] = 1 - [2]		
1	215.000	0.0208	0.0003	0.9997	0.9792	3.44	2.04
2	170.000	0.0417	0.0059	0.9941	0.9583	2.52	1.73
3	154.500	0.0625	0.0139	0.9861	0.9375	2.20	1.53
4	135.000	0.0833	0.0351	0.9649	0.9167	1.81	1.38
5	113.800	0.1042	0.0853	0.9147	0.8958	1.37	1.26
6	110.000	0.1250	0.0987	0.9013	0.8750	1.29	1.15
7	104.000	0.1458	0.1210	0.8790	0.8542	1.17	1.05
8	100.000	0.1667	0.1379	0.8621	0.8333	1.09	0.97
9	80.000	0.1875	0.2483	0.7517	0.8125	0.68	0.89
10	70.340	0.2083	0.3156	0.6844	0.7917	0.48	0.81
11	70.340	0.2292	0.3156	0.6844	0.7708	0.48	0.74
12	70.000	0.2500	0.3192	0.6808	0.7500	0.47	0.67
13	64.600	0.2708	0.3594	0.6406	0.7292	0.36	0.61
14	56.000	0.2917	0.4247	0.5753	0.7083	0.19	0.55
15	53.850	0.3125	0.4443	0.5557	0.6875	0.14	0.49
16	50.000	0.3333	0.4761	0.5239	0.6667	0.06	0.43
17	47.510	0.3542	0.4960	0.5040	0.6458	0.01	0.37
18	45.850	0.3750	0.5080	0.4920	0.6250	- 0.02	0.32
19	45.360	0.3958	0.5120	0.4880	0.6042	- 0.03	0.26
20	39.500	0.4167	0.5596	0.4404	0.5833	- 0.15	0.21
21	35.700	0.4375	0.5910	0.4090	0.5625	- 0.23	0.16
22	30.100	0.4583	0.6331	0.3669	0.5417	- 0.34	0.10
23	25.250	0.4792	0.6700	0.3300	0.5208	- 0.44	0.05
24	25.200	0.5000	0.6700	0.3300	0.5000	- 0.44	0.00
25	22.500	0.5208	0.6915	0.3085	0.4792	- 0.50	- 0.05
26	21.600	0.5417	0.6985	0.3015	0.4583	- 0.52	- 0.10
27	21.600	0.5625	0.6985	0.3015	0.4375	- 0.52	- 0.16
28	20.400	0.5833	0.7054	0.2946	0.4167	- 0.54	- 0.21
29	18.900	0.6042	0.7157	0.2843	0.3958	- 0.57	- 0.26
30	17.550	0.6250	0.7257	0.2743	0.3750	- 0.60	- 0.32
31	17.100	0.6458	0.7290	0.2710	0.3542	- 0.61	- 0.37
32	15.450	0.6667	0.7389	0.2611	0.3333	- 0.64	- 0.43
33	15.120	0.6875	0.7422	0.2578	0.3125		
34	15.120	0.7083	0.7422	0.2578	0.2917		

35	12.560	0.7292	0.7580	0.2420	0.2708	- 0.70	- 0.61
36	10.100	0.7500	0.7734	0.2266	0.2500	- 0.75	- 0.67
37	9.840	0.7708	0.7764	0.2236	0.2292	- 0.76	- 0.74
38	9.829	0.7917	0.7764	0.2236	0.2083	- 0.76	- 0.81
39	9.700	0.8125	0.7764	0.2236	0.1875	- 0.76	- 0.89
40	9.430	0.8333	0.7794	0.2206	0.1667	- 0.77	- 0.97
41	9.060	0.8542	0.7794	0.2206	0.1458	- 0.77	- 1.05
42	8.900	0.8750	0.7823	0.2177	0.1250	- 0.78	- 1.15
43	7.450	0.8958	0.7910	0.2090	0.1042	- 0.81	- 1.26
44	7.448	0.9167	0.7910	0.2090	0.0833	- 0.81	- 1.38
45	4.360	0.9375	0.8078	0.1922	0.0625	- 0.87	- 1.53
46	3.696	0.9583	0.8106	0.1894	0.0417	- 0.88	- 1.73
47	3.615	0.9792	0.8133	0.1867	0.0208	- 0.89	- 2.04

Tableau II-B : Ajustement suivant la loi Log-normale.

R° (Rang)	Q _i (classés) en m ³ /s [1]	Log(Q _i) (classés) [2]	Probabilité P de dépassement	Prob. P de non dépassement	Z ou u (variable réduite théorique) [5] : $U = \frac{\log(Q_p) - M}{\sigma_{Q_p}}$	Z ou u (variable réduite Expérimentale) [6] = [4] et à partir de la table
			P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérimentale [3]	P(Q<Q _i) ; Expérimentale [4] = 1 - [3]		
1	215.000	2.332	0.0208	0.9792	1.91	2.04
2	170.000	2.230	0.0417	0.9583	1.69	1.73
3	154.500	2.189	0.0625	0.9375	1.60	1.53
4	135.000	2.130	0.0833	0.9167	1.47	1.38
5	113.800	2.056	0.1042	0.8958	1.31	1.26
6	110.000	2.041	0.1250	0.8750	1.28	1.15
7	104.000	2.017	0.1458	0.8542	1.23	1.05
8	100.000	2.000	0.1667	0.8333	1.19	0.97
9	80.000	1.903	0.1875	0.8125	0.99	0.89
10	70.340	1.847	0.2083	0.7917	0.86	0.81
11	70.340	1.847	0.2292	0.7708	0.86	0.74
12	70.000	1.845	0.2500	0.7500	0.86	0.67
13	64.600	1.810	0.2708	0.7292	0.79	0.61
14	56.000	1.748	0.2917	0.7083	0.65	0.55
15	53.850	1.731	0.3125	0.6875	0.61	0.49
16	50.000	1.699	0.3333	0.6667	0.55	0.43
17	47.510	1.677	0.3542	0.6458	0.50	0.37
18	45.850	1.661	0.3750	0.6250	0.46	0.32
19	45.360	1.657	0.3958	0.6042	0.45	0.26
20	39.500	1.597	0.4167	0.5833	0.32	0.21
21	35.700	1.553	0.4375	0.5625	0.23	0.16
22	30.100	1.479	0.4583	0.5417		

23	25.250	1.402	0.4792	0.5208	-0.09	0.05
24	25.200	1.401	0.5000	0.5000	-0.10	0.00
25	22.500	1.352	0.5208	0.4792	-0.20	-0.05
26	21.600	1.334	0.5417	0.4583	-0.24	-0.10
27	21.600	1.334	0.5625	0.4375	-0.24	-0.16
28	20.400	1.310	0.5833	0.4167	-0.29	-0.21
29	18.900	1.276	0.6042	0.3958	-0.36	-0.26
30	17.550	1.244	0.6250	0.3750	-0.43	-0.32
31	17.100	1.233	0.6458	0.3542	-0.46	-0.37
32	15.450	1.189	0.6667	0.3333	-0.55	-0.43
33	15.120	1.180	0.6875	0.3125	-0.57	-0.49
34	15.120	1.180	0.7083	0.2917	-0.57	-0.55
35	12.560	1.099	0.7292	0.2708	-0.75	-0.61
36	10.100	1.004	0.7500	0.2500	-0.95	-0.67
37	9.840	0.993	0.7708	0.2292	-0.98	-0.74
38	9.829	0.993	0.7917	0.2083	-0.98	-0.81
39	9.700	0.987	0.8125	0.1875	-0.99	-0.89
40	9.430	0.975	0.8333	0.1667	-1.02	-0.97
41	9.060	0.957	0.8542	0.1458	-1.05	-1.05
42	8.900	0.949	0.8750	0.1250	-1.07	-1.15
43	7.450	0.872	0.8958	0.1042	-1.24	-1.26
44	7.448	0.872	0.9167	0.0833	-1.24	-1.38
45	4.360	0.639	0.9375	0.0625	-1.74	-1.53
46	3.696	0.568	0.9583	0.0417	-1.89	-1.73
47	3.615	0.558	0.9792	0.0208	-1.91	-2.04

Tableau II-C : Ajustement suivant la loi de Gumbel.

R	Q _i (classés) en m ³ /s [1]	Probabilité P de dépassement		Probabilité P de non dépassement		T (période de retour Théorique en ans) [7] = 1/ [6]	T (période de retour Expérím.) [4] = 1/ [2]	K (variable réduite théorique) [8] = f [7]	K (variable réduite Expérím.) [9] = f [4]
		P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérím. [2]	P(Q>Q _i) ; Théorique [6] = 1 - [5]	P(Q<Q _i) ; Expérím. [3] = 1 - [2]	P(Q<Q _i) ; Théorique [5] = équa. (1), (2) et (3)				
1	215.000	0.0208	0.0068	0.9792	0.9932	148	48	3.44	2.56
2	170.000	0.0417	0.0219	0.9583	0.9781	46	24	2.52	2.01
3	154.500	0.0625	0.0327	0.9375	0.9673	31	16	2.20	1.69
4	135.000	0.0833	0.0539	0.9167	0.9461	19	12	1.81	1.45
5	113.800	0.1042	0.0922	0.8958	0.9078	11	10	1.37	1.27
6	110.000	0.1250	0.1014	0.8750	0.8986	10	8	1.29	1.12
7	104.000	0.1458	0.1177	0.8542	0.8823	8	7	1.17	0.99
8	100.000	0.1667	0.1298	0.8333	0.8702	8	6	1.09	0.88
9	80.000	0.1875	0.2096	0.8125	0.7904	5	5	0.68	0.78
10	70.340	0.2083	0.2615	0.7917	0.7385	4	5	0.48	0.68
11	70.340	0.2292	0.2615	0.7708	0.7385	4	4		

12	70.000	0.2500	0.2635	0.7500	0.7365	4	4	0.47	0.52
13	64.600	0.2708	0.2971	0.7292	0.7029	3	4	0.36	0.45
14	56.000	0.2917	0.3571	0.7083	0.6429	3	3	0.19	0.38
15	53.850	0.3125	0.3734	0.6875	0.6266	3	3	0.14	0.32
16	50.000	0.3333	0.4039	0.6667	0.5961	2	3	0.06	0.25
17	47.510	0.3542	0.4243	0.6458	0.5757	2	3	0.01	0.20
18	45.850	0.3750	0.4383	0.6250	0.5617	2	3	-0.02	0.14
19	45.360	0.3958	0.4425	0.6042	0.5575	2	3	-0.03	0.08
20	39.500	0.4167	0.4942	0.5833	0.5058	2	2	-0.15	0.03
21	35.700	0.4375	0.5291	0.5625	0.4709	2	2	-0.23	-0.02
22	30.100	0.4583	0.5821	0.5417	0.4179	2	2	-0.34	-0.07
23	25.250	0.4792	0.6288	0.5208	0.3712	2	2	-0.44	-0.12
24	25.200	0.5000	0.6293	0.5000	0.3707	2	2	-0.44	-0.16
25	22.500	0.5208	0.6554	0.4792	0.3446	2	2	-0.50	-0.21
26	21.600	0.5417	0.6641	0.4583	0.3359	2	2	-0.52	-0.26
27	21.600	0.5625	0.6641	0.4375	0.3359	2	2	-0.52	-0.30
28	20.400	0.5833	0.6756	0.4167	0.3244	1	2	-0.54	-0.35
29	18.900	0.6042	0.6900	0.3958	0.3100	1	2	-0.57	-0.39
30	17.550	0.6250	0.7028	0.3750	0.2972	1	2	-0.60	-0.43
31	17.100	0.6458	0.7071	0.3542	0.2929	1	2	-0.61	-0.48
32	15.450	0.6667	0.7226	0.3333	0.2774	1	2	-0.64	-0.52
33	15.120	0.6875	0.7257	0.3125	0.2743	1	1	-0.65	-0.57
34	15.120	0.7083	0.7257	0.2917	0.2743	1	1	-0.65	-0.61
35	12.560	0.7292	0.7493	0.2708	0.2507	1	1	-0.70	-0.66
36	10.100	0.7500	0.7714	0.2500	0.2286	1	1	-0.75	-0.70
37	9.840	0.7708	0.7737	0.2292	0.2263	1	1	-0.76	-0.75
38	9.829	0.7917	0.7738	0.2083	0.2262	1	1	-0.76	-0.80
39	9.700	0.8125	0.7749	0.1875	0.2251	1	1	-0.76	-0.85
40	9.430	0.8333	0.7773	0.1667	0.2227	1	1	-0.77	-0.90
41	9.060	0.8542	0.7805	0.1458	0.2195	1	1	-0.77	-0.96
42	8.900	0.8750	0.7819	0.1250	0.2181	1	1	-0.78	-1.02
43	7.450	0.8958	0.7945	0.1042	0.2055	1	1	-0.81	-1.09
44	7.448	0.9167	0.7945	0.0833	0.2055	1	1	-0.81	-1.16
45	4.360	0.9375	0.8202	0.0625	0.1798	1	1	-0.87	-1.25
46	3.696	0.9583	0.8256	0.0417	0.1744	1	1	-0.88	-1.35
47	3.615	0.9792	0.8262	0.0208	0.1738	1	1	-0.89	-1.51

**ANNEXE III : AJUSTEMENT DE LA SERIE DES DEBITS DE POINTE
ENREGISTRÉE A LA STATION DE SIDI ALI BENYOUB**

Tableau III-A : Ajustement suivant la loi Normale.

Rang (R°)	Q _{pi} classés (m ³ /s) [1]	Probabilité P de dépassement		Prob. P de non dépassement		Z ou u (variable réduite théorique) [4] = $U_i = \frac{Q_{pi} - \bar{Q}_p}{\sigma_{Q_p}}$	Z ou u (variable réduite Expérimentale) [7] = [3] et à partir de la table
		P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérimentale [2]	P(Q>Q _i) ; Loi Normale (théorique) [6] = 1 - [5]	P(Q<Q _i) ; théorique (5) = [4] et à partir de la table	P(Q<Q _i) ; Expérimentale [3] = 1 - [2]		
1	575.000	0.0222	0.0003	0.9997	0.9778	3.40	2.01
2	520.000	0.0444	0.0014	0.9986	0.9556	2.98	1.70
3	403.000	0.0667	0.0188	0.9812	0.9333	2.08	1.50
4	324.000	0.0889	0.0694	0.9306	0.9111	1.48	1.35
5	272.000	0.1111	0.1401	0.8599	0.8889	1.08	1.22
6	236.600	0.1333	0.2119	0.7881	0.8667	0.80	1.11
7	228.400	0.1556	0.2296	0.7704	0.8444	0.74	1.01
8	218.000	0.1778	0.2546	0.7454	0.8222	0.66	0.92
9	215.000	0.2000	0.2611	0.7389	0.8000	0.64	0.84
10	215.000	0.2222	0.2611	0.7389	0.7778	0.64	0.76
11	213.200	0.2444	0.2643	0.7357	0.7556	0.63	0.69
12	197.100	0.2667	0.3085	0.6915	0.7333	0.50	0.62
13	169.000	0.2889	0.3859	0.6141	0.7111	0.29	0.56
14	162.600	0.3111	0.4052	0.5948	0.6889	0.24	0.49
15	152.000	0.3333	0.4364	0.5636	0.6667	0.16	0.43
16	147.000	0.3556	0.4522	0.5478	0.6444	0.12	0.37
17	135.300	0.3778	0.4880	0.5120	0.6222	0.03	0.31
18	115.500	0.4000	0.5478	0.4522	0.6000	-0.12	0.25
19	105.000	0.4222	0.5832	0.4168	0.5778	-0.21	0.20
20	100.800	0.4444	0.5948	0.4052	0.5556	-0.24	0.14
21	99.400	0.4667	0.5987	0.4013	0.5333	-0.25	0.08
22	89.400	0.4889	0.6293	0.3707	0.5111	-0.33	0.03
23	77.160	0.5111	0.6628	0.3372	0.4889	-0.42	-0.03
24	66.360	0.5333	0.6915	0.3085	0.4667	-0.50	-0.08
25	62.200	0.5556	0.7019	0.2981	0.4444	-0.53	-0.14
26	62.200	0.5778	0.7019	0.2981	0.4222	-0.53	-0.20
27	59.900	0.6000	0.7088	0.2912	0.4000	-0.55	-0.25
28	57.800	0.6222	0.7157	0.2843	0.3778	-0.57	-0.31
29	57.000	0.6444	0.7157	0.2843	0.3556	-0.57	-0.37
30	55.350	0.6667	0.7224	0.2776	0.3333	-0.59	-0.43
31	51.500	0.6889	0.7324	0.2676	0.3111	-0.62	-0.49
32	49.600	0.7111	0.7357	0.2643	0.2889	-0.63	-0.56
33	47.600	0.7333	0.7422	0.2578	0.2667		
34	46.440	0.7556	0.7454	0.2546	0.2444		

35	43.200	0.7778	0.7517	0.2483	0.2222	-0.68	-0.76
36	42.400	0.8000	0.7549	0.2451	0.2000	-0.69	-0.84
37	41.240	0.8222	0.7580	0.2420	0.1778	-0.70	-0.92
38	27.800	0.8444	0.7881	0.2119	0.1556	-0.80	-1.01
39	27.440	0.8667	0.7881	0.2119	0.1333	-0.80	-1.11
40	17.140	0.8889	0.8106	0.1894	0.1111	-0.88	-1.22
41	5.180	0.9111	0.8340	0.1660	0.0889	-0.97	-1.35
42	4.408	0.9333	0.8365	0.1635	0.0667	-0.98	-1.50
43	1.600	0.9556	0.8413	0.1587	0.0444	-1.00	-1.70
44	1.210	0.9778	0.8413	0.1587	0.0222	-1.00	-2.01

Tableau III-B : Ajustement suivant la loi Log-normale.

R° (Rang)	Q _i (classés) en m ³ /s [1]	Log(Q _i) (classés) [2]	Probabilité P de dépassement	Prob. P de non dépassement	Z ou u (variable réduite théorique) [5] : $U = \frac{(\log(Q_p) - M)}{\sigma_{Q_p}}$	Z ou u (variable réduite Expérimentale) [6] = [4] et à partir de la table
			P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérimentale [3]	P(Q<Q _i) ; Expérimentale [4] = 1 - [3]		
1	575.000	2.760	0.0222	0.9778	1.52	2.01
2	520.000	2.716	0.0444	0.9556	1.45	1.70
3	403.000	2.605	0.0667	0.9333	1.26	1.50
4	324.000	2.511	0.0889	0.9111	1.10	1.35
5	272.000	2.435	0.1111	0.8889	0.97	1.22
6	236.600	2.374	0.1333	0.8667	0.87	1.11
7	228.400	2.359	0.1556	0.8444	0.84	1.01
8	218.000	2.338	0.1778	0.8222	0.81	0.92
9	215.000	2.332	0.2000	0.8000	0.79	0.84
10	215.000	2.332	0.2222	0.7778	0.79	0.76
11	213.200	2.329	0.2444	0.7556	0.79	0.69
12	197.100	2.295	0.2667	0.7333	0.73	0.62
13	169.000	2.228	0.2889	0.7111	0.62	0.56
14	162.600	2.211	0.3111	0.6889	0.59	0.49
15	152.000	2.182	0.3333	0.6667	0.54	0.43
16	147.000	2.167	0.3556	0.6444	0.51	0.37
17	135.300	2.131	0.3778	0.6222	0.45	0.31
18	115.500	2.063	0.4000	0.6000	0.34	0.25
19	105.000	2.021	0.4222	0.5778	0.27	0.20
20	100.800	2.003	0.4444	0.5556	0.24	0.14
21	99.400	1.997	0.4667	0.5333	0.22	0.08
22	89.400	1.951	0.4889	0.5111	0.15	0.03
23	77.160	1.887	0.5111	0.4889	0.04	-0.03
24	66.360	1.822	0.5333	0.4667	-0.07	-0.08
25	62.200	1.794	0.5556	0.4444		

26	62.200	1.794	0.5778	0.4222	-0.12	-0.20
27	59.900	1.777	0.6000	0.4000	-0.15	-0.25
28	57.800	1.762	0.6222	0.3778	-0.18	-0.31
29	57.000	1.756	0.6444	0.3556	-0.19	-0.37
30	55.350	1.743	0.6667	0.3333	-0.21	-0.43
31	51.500	1.712	0.6889	0.3111	-0.26	-0.49
32	49.600	1.695	0.7111	0.2889	-0.29	-0.56
33	47.600	1.678	0.7333	0.2667	-0.32	-0.62
34	46.440	1.667	0.7556	0.2444	-0.34	-0.69
35	43.200	1.635	0.7778	0.2222	-0.39	-0.76
36	42.400	1.627	0.8000	0.2000	-0.40	-0.84
37	41.240	1.615	0.8222	0.1778	-0.43	-0.92
38	27.800	1.444	0.8444	0.1556	-0.72	-1.01
39	27.440	1.438	0.8667	0.1333	-0.73	-1.11
40	17.140	1.234	0.8889	0.1111	-1.07	-1.22
41	5.180	0.714	0.9111	0.0889	-1.96	-1.35
42	4.408	0.644	0.9333	0.0667	-2.08	-1.50
43	1.600	0.204	0.9556	0.0444	-2.83	-1.70
44	1.210	0.083	0.9778	0.0222	-3.03	-2.01

Tableau III-C : Ajustement suivant la loi de Gumbel.

R	Q _i (classés) en m ³ /s [1]	Probabilité P de dépassement		Probabilité P de non dépassement		T (période de retour Théorique en ans) [7] = 1/ [6]	T (période de retour Expérim.) [4] = 1/ [2]	K (variable réduite théorique) [8] = f [7]	K (variable réduite Expérim.) [9] = f [4]
		P(Q>Q _i) = (R/(N+1)) ; Expérim. [2]	P(Q>Q _i) ; Théorique [6] = 1 - [5]	P(Q<Q _i) ; Expérim. [3] = 1 - [2]	P(Q<Q _i) ; Théorique [5] = équa. (1), (2) et (3)				
1	575.000	0.0222	0.0071	0.9929	0.9778	141	45	3.40	2.51
2	520.000	0.0444	0.0122	0.9878	0.9556	82	23	2.98	1.96
3	403.000	0.0667	0.0381	0.9619	0.9333	26	15	2.08	1.63
4	324.000	0.0889	0.0811	0.9189	0.9111	12	11	1.48	1.40
5	272.000	0.1111	0.1316	0.8684	0.8889	8	9	1.08	1.22
6	236.600	0.1333	0.1813	0.8187	0.8667	6	8	0.80	1.07
7	228.400	0.1556	0.1949	0.8051	0.8444	5	6	0.74	0.94
8	218.000	0.1778	0.2135	0.7865	0.8222	5	6	0.66	0.82
9	215.000	0.2000	0.2192	0.7808	0.8000	5	5	0.64	0.72
10	215.000	0.2222	0.2192	0.7808	0.7778	5	5	0.64	0.63
11	213.200	0.2444	0.2226	0.7774	0.7556	4	4	0.63	0.54
12	197.100	0.2667	0.2555	0.7445	0.7333	4	4	0.50	0.46
13	169.000	0.2889	0.3224	0.6776	0.7111	3	3	0.29	0.39
14	162.600	0.3111	0.3393	0.6607	0.6889	3	3	0.24	0.32
15	152.000	0.3333	0.3688	0.6312	0.6667	3	3	0.16	0.25
16	147.000	0.3556	0.3833	0.6167	0.6444	3	3		
17	135.300	0.3778	0.4186	0.5814	0.6222	2	3		

18	115.500	0.4000	0.4827	0.5173	0.6000	2	3	-0.12	0.07
19	105.000	0.4222	0.5185	0.4815	0.5778	2	2	-0.21	0.02
20	100.800	0.4444	0.5332	0.4668	0.5556	2	2	-0.24	-0.04
21	99.400	0.4667	0.5381	0.4619	0.5333	2	2	-0.25	-0.09
22	89.400	0.4889	0.5736	0.4264	0.5111	2	2	-0.33	-0.14
23	77.160	0.5111	0.6177	0.3823	0.4889	2	2	-0.42	-0.19
24	66.360	0.5333	0.6568	0.3432	0.4667	2	2	-0.50	-0.24
25	62.200	0.5556	0.6718	0.3282	0.4444	1	2	-0.53	-0.29
26	62.200	0.5778	0.6718	0.3282	0.4222	1	2	-0.53	-0.33
27	59.900	0.6000	0.6800	0.3200	0.4000	1	2	-0.55	-0.38
28	57.800	0.6222	0.6876	0.3124	0.3778	1	2	-0.57	-0.43
29	57.000	0.6444	0.6904	0.3096	0.3556	1	2	-0.57	-0.48
30	55.350	0.6667	0.6963	0.3037	0.3333	1	2	-0.59	-0.52
31	51.500	0.6889	0.7100	0.2900	0.3111	1	1	-0.62	-0.57
32	49.600	0.7111	0.7167	0.2833	0.2889	1	1	-0.63	-0.62
33	47.600	0.7333	0.7237	0.2763	0.2667	1	1	-0.65	-0.67
34	46.440	0.7556	0.7278	0.2722	0.2444	1	1	-0.66	-0.72
35	43.200	0.7778	0.7390	0.2610	0.2222	1	1	-0.68	-0.77
36	42.400	0.8000	0.7418	0.2582	0.2000	1	1	-0.69	-0.82
37	41.240	0.8222	0.7458	0.2542	0.1778	1	1	-0.70	-0.88
38	27.800	0.8444	0.7905	0.2095	0.1556	1	1	-0.80	-0.93
39	27.440	0.8667	0.7917	0.2083	0.1333	1	1	-0.80	-1.00
40	17.140	0.8889	0.8238	0.1762	0.1111	1	1	-0.88	-1.06
41	5.180	0.9111	0.8582	0.1418	0.0889	1	1	-0.97	-1.14
42	4.408	0.9333	0.8603	0.1397	0.0667	1	1	-0.98	-1.23
43	1.600	0.9556	0.8678	0.1322	0.0444	1	1	-1.00	-1.34
44	1.210	0.9778	0.8688	0.1312	0.0222	1	1	-1.00	-1.49

ANNEXE IV : TABLEAUX EN STATISTIQUES APPLIQUEE A L'HYDROLOGIE**Tableau IV-A :** Tableau de Gauss qui donne la fréquence au non-dépassement de u ;
 $F(u) = \text{Prob}(U < u)$

u	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0	0,5000	0,5040	0,5080	0,5120	0,5160	0,5199	0,5239	0,5279	0,5319	0,5359
0,1	0,5398	0,5438	0,5478	0,5517	0,5557	0,5596	0,5636	0,5675	0,5714	0,5753
0,2	0,5793	0,5832	0,5871	0,5910	0,5948	0,5987	0,6026	0,6064	0,6103	0,6141
0,3	0,6179	0,6217	0,6255	0,6293	0,6331	0,6368	0,6406	0,6443	0,6480	0,6517
0,4	0,6554	0,6591	0,6628	0,6664	0,6700	0,6736	0,6772	0,6808	0,6844	0,6879
0,5	0,6915	0,6950	0,6985	0,7019	0,7054	0,7088	0,7123	0,7157	0,7190	0,7224
0,6	0,7257	0,7290	0,7324	0,7357	0,7389	0,7422	0,7454	0,7486	0,7517	0,7549
0,7	0,7580	0,7611	0,7642	0,7673	0,7704	0,7734	0,7764	0,7794	0,7823	0,7852
0,8	0,7881	0,7910	0,7939	0,7967	0,7995	0,8023	0,8051	0,8078	0,8106	0,8133
0,9	0,8159	0,8186	0,8212	0,8238	0,8264	0,8289	0,8315	0,8340	0,8365	0,8389
1	0,8413	0,8438	0,8461	0,8483	0,8508	0,8531	0,8554	0,8577	0,8599	0,8621
1,1	0,8643	0,8665	0,8686	0,8708	0,8729	0,8749	0,8770	0,8790	0,8810	0,8830
1,2	0,8849	0,8869	0,8888	0,8907	0,8925	0,8944	0,8962	0,8980	0,8997	0,9013
1,3	0,9032	0,9049	0,9066	0,9082	0,9099	0,9115	0,9131	0,9147	0,9162	0,9177
1,4	0,9192	0,9207	0,9222	0,9236	0,9251	0,9265	0,9279	0,9292	0,9306	0,9319
1,5	0,9332	0,9345	0,9357	0,9370	0,9382	0,9394	0,9406	0,9418	0,9429	0,9441
1,6	0,9452	0,9463	0,9474	0,9484	0,9495	0,9505	0,9515	0,9525	0,9535	0,9545
1,7	0,9554	0,9564	0,9573	0,9582	0,9591	0,9599	0,9608	0,9616	0,9625	0,9633
1,8	0,9641	0,9649	0,9656	0,9662	0,9671	0,9678	0,9686	0,9693	0,9699	0,9706
1,9	0,9713	0,9719	0,9726	0,9732	0,9738	0,9744	0,9750	0,9756	0,9761	0,9767
2	0,9772	0,9779	0,9783	0,9788	0,9793	0,9798	0,9803	0,9808	0,9812	0,9817
2,1	0,9821	0,9826	0,9830	0,9834	0,9838	0,9842	0,9846	0,9850	0,9854	0,9857
2,2	0,9861	0,9864	0,9868	0,9871	0,9875	0,9878	0,9881	0,9884	0,9887	0,9890
2,3	0,9893	0,9896	0,9898	0,9901	0,9904	0,9906	0,9909	0,9911	0,9913	0,9916
2,4	0,9918	0,9920	0,9922	0,9925	0,9927	0,9929	0,9931	0,9932	0,9934	0,9936
2,5	0,9938	0,9940	0,9941	0,9943	0,9945	0,9946	0,9948	0,9949	0,9951	0,9952
2,6	0,9953	0,9955	0,9956	0,9957	0,9959	0,9960	0,9961	0,9962	0,9963	0,9964
2,7	0,9965	0,9966	0,9967	0,9968	0,9969	0,9970	0,9971	0,9972	0,9973	0,9974
2,8	0,9974	0,9975	0,9976	0,9977	0,9977	0,9978	0,9979	0,9979	0,9980	0,9981
2,9	0,9981	0,9982	0,9982	0,9983	0,9984	0,9984	0,9985	0,9985	0,9986	0,9986
3	0,9987	0,9987	0,9987	0,9988	0,9988	0,9989	0,9989	0,9989	0,9990	0,9990
3,1	0,9990	0,9991	0,9991	0,9991	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9993	0,9993
3,2	0,9993	0,9993	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9994	0,9995	0,9995	0,9995
3,3	0,9995	0,9995	0,9995	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9996	0,9997
3,4	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9997	0,9998

Le tableau correspond aux valeurs de u positive, si u est négatif, la probabilité au non-dépassement est le complément à 1 de $F(|u|)$.

Tableau IV-B : Tableau de distribution de χ^2 qui donne la valeur de χ^2 Tabulé en fonction de l'erreur et du nombre de degrés de liberté.

v/P	0,010	0,025	0,050	0,100	0,250	0,500	0,750	0,900	0,950	0,975	0,990
1	0,0002	0,0010	0,0039	0,0158	0,102	0,455	1,32	2,71	3,84	5,02	6,63
2	0,0201	0,0506	0,103	0,211	0,575	1,39	2,77	4,61	5,99	7,38	9,21
3	0,115	0,216	0,352	0,584	1,21	2,37	4,11	6,25	7,81	9,35	11,3
4	0,297	0,484	0,711	1,06	1,92	3,36	5,39	7,78	9,49	11,1	13,3
5	0,554	0,831	1,15	1,61	2,67	4,35	6,63	9,24	11,1	12,8	15,1
6	0,872	1,24	1,64	2,20	3,45	5,35	7,84	10,6	12,6	14,4	16,8
7	1,24	1,69	2,17	2,83	4,25	6,35	9,04	12,0	14,1	16,0	18,5
8	1,65	2,18	2,73	3,49	5,07	7,34	10,2	13,4	15,5	17,5	20,1
9	2,09	2,70	3,33	4,17	5,90	8,34	11,4	14,7	16,9	19,0	21,7
10	2,56	3,25	3,94	4,87	6,74	9,34	12,5	16,0	18,3	20,5	23,2
11	3,05	3,82	4,57	5,58	7,58	10,3	13,7	17,3	19,7	21,9	24,7
12	3,57	4,40	5,23	6,30	8,44	11,3	14,8	18,5	21,0	23,3	26,2
13	4,11	5,01	5,89	7,04	9,30	12,3	16,0	19,8	22,4	24,7	27,7
14	4,66	5,63	6,57	7,79	10,2	13,3	17,1	21,1	23,7	26,1	29,1
15	5,23	6,26	7,26	8,55	11,0	14,3	18,2	22,3	25,0	27,5	30,6
16	5,81	6,91	7,96	9,31	11,9	15,3	19,4	23,5	26,3	28,8	32,0
17	6,41	7,56	8,67	10,1	12,8	16,3	20,5	24,8	27,6	30,2	33,4
18	7,01	8,23	9,39	10,9	13,7	17,3	21,6	26,0	28,9	31,5	34,8
19	7,63	8,91	10,1	11,7	14,6	18,3	22,7	27,2	30,1	32,9	36,2
20	8,26	9,59	10,9	12,4	15,5	19,3	23,8	28,4	31,4	34,2	37,6
21	8,90	10,3	11,6	13,2	16,3	20,3	24,9	29,6	32,7	35,5	38,9
22	9,54	11,0	12,3	14,0	17,2	21,3	26,0	30,8	33,9	36,8	40,3
23	10,2	11,7	13,1	14,8	18,1	22,3	27,1	32,0	35,2	38,1	41,6
24	10,9	12,4	13,8	15,7	19,0	23,3	28,2	33,2	36,4	39,4	43,0
25	11,5	13,1	14,6	16,5	19,9	24,3	29,3	34,4	37,7	40,6	44,3
26	12,2	13,8	15,4	17,3	20,8	25,3	30,4	35,6	38,9	41,9	45,6
27	12,9	14,6	16,2	18,1	21,7	26,3	31,5	36,7	40,1	43,2	47,0
28	13,6	15,3	16,9	18,9	22,7	27,3	32,6	37,9	41,3	44,5	48,3
29	14,3	16,0	17,7	19,8	23,6	28,3	33,7	39,1	42,6	45,7	49,6
30	15,0	16,8	18,5	20,6	24,5	29,3	34,8	40,3	43,8	47,0	50,9
40	22,2	24,4	26,5	29,1	33,7	39,3	45,6	51,8	55,8	59,3	63,7
50	29,7	32,4	34,8	37,7	42,9	49,3	56,3	63,2	67,5	71,4	76,2
60	37,5	40,5	43,2	46,5	52,3	59,3	67,0	74,4	79,1	83,3	88,4
70	45,4	48,8	51,7	55,3	61,7	69,3	77,6	85,5	90,5	95	100
80	53,5	57,2	60,4	64,3	71,1	79,3	88,1	96,6	102	107	112
90	61,8	65,6	69,1	73,3	80,6	89,3	98,6	108	113	118	124
100	70,1	74,2	77,9	82,4	90,1	99,3	109	118	124	130	136