



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

Institut : Gestion des Techniques Urbain

**Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers
de la ville.**

Département : Génie Urbain

Filière : Gestion des Techniques Urbaines.

N° :

Spécialité : Risque Urbains et Résilience.

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique

Par : DERRAG IKRAM

Intitulé

**Modélisation Et Analyse des Scénarios D'inondation Dans
La Ville De M'sila En Utilisant Les Systèmes D'information
Géographique et Les Logiciels Hec-Ras
Et Hec-Hms.**

Soutenu devant le jury composé de :

	Université de M'sila	Président
HOUBIB Hanane	Université de M'sila	Rapporteur
BARKAT Zine Elabidine	Université de M'sila	Co-Rapporteur
		Examineur

Année universitaire : 2024 /2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



ملحق بالقرار رقم 1082 المؤرخ في 27 ديسمبر 2020
الذي يحدد القواعد المتعلقة بالوقاية من السرقة العلمية ومكافحتها
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي والبحث العلمي : جامعة محمد بوضياف - المسيلة

تصريح شرفي

خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أسفله:

السيد [ة]: دراق إكرام الصفة (أستاذ. باحث. طالب): طالبة
الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية رقم: 406327013 والصادرة بتاريخ: 2023-07-06
المسجل [ة] بكلية /معهد: تسيير التقنيات الحضرية قسم: الهندسة الحضرية
و المكلف [ة] بانجاز أعمال بحث [مذكرة التخرج. مذكرة ماستر. مذكرة ماجستير. أطروحة دكتوراه]
عنوانها: MODÉLISATION ET ANALYSE DES SCÉNARIOS D'INONDATION DANS LA VILLE
DE -M'SILA- EN UTILISANT LES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
ET LES LOGICIELS HEC-RAS ET HEC-HMS

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والتزامه الأكاديمية المطلوبة في انجاز
البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2025-06-10

توقيع المعني [ة]

Derrag

Remerciements

Je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour l'aide, l'assistance et le soutien dont Il m'a comblé, pour m'avoir facilité le chemin du savoir et de la connaissance, et pour m'avoir accordé la force et la patience tout au long de ce parcours scientifique.

*J'exprime ma profonde gratitude et ma sincère reconnaissance à mon encadrante, Madame **HOUBIB HANANE**, pour les efforts considérables qu'elle a déployés, ses orientations judicieuses et ses conseils précieux qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à saluer son soutien permanent, sa patience et son souci constant d'assurer le suivi de chaque étape de cette recherche, ce qui a permis à ce mémoire de voir le jour dans les meilleures conditions.*

J'adresse également mes remerciements à l'ensemble des enseignants et au personnel administratif de l'Institut de Gestion des Techniques Urbaines de M'Sila pour leur encadrement, leurs orientations et leur accompagnement tout au long de mon parcours universitaire, ce qui a contribué au développement de mes connaissances et de mes compétences.

Je remercie aussi les membres du jury pour le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour leurs remarques constructives qui ne manqueront pas d'enrichir ce travail scientifique.

Enfin, je tiens à exprimer ma reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide ou leur soutien pour la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

À moi-même, douce et bienveillante...

Je crois en toi, et je suis fière de ce que tu as accompli.

À ma mère défunte...

*Que Dieu te fasse miséricorde à la hauteur de mon amour pour toi,
et que ce succès soit une lumière qui te parvienne.*

À mon père...

Mon pilier, que Dieu te protège. Grâce à ton soutien, j'ai avancé et réussi.

*À ma chère sœur et à son fils **Diya Eddine**...*

Pour ta présence réconfortante et pour son sourire lumineux, tout mon amour et ma gratitude.

À mes chers frères...

*Par votre amour et votre soutien sincère, vous avez été une force précieuse dans mon chemin
merci du fond du cœur.*

À mes précieuses amies...

*Vous avez été la chaleur de mes jours et les compagnes fidèles de ce parcours.
Merci pour vos cœurs sincères.*

Et à tous ceux qui m'ont soutenue, de près ou de loin, par une parole ou une prière...

Merci du fond du cœur

ملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة خطر الفيضانات بمدينة المسيلة من خلال نمذجة وتحليل السيناريوهات المحتملة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبرنامجي HEC-HMS و HEC-RAS. تهدف الدراسة إلى تقييم سلوك الجريان السطحي وتحديد المناطق المعرضة للغمر، من أجل دعم اتخاذ القرار وتطوير خطط وقاية حضرية فعالة. تعتمد المنهجية على تجميع البيانات الطبوغرافية والمناخية والهيدرولوجية وتحليلها رقمياً لمحاكاة تدفقات المياه وتوقع أثارها على المدينة. وتُبرز نتائج النمذجة أهمية التكامل بين الأدوات الرقمية الحديثة في فهم ديناميات الفيضانات وتعزيز مرونة المدينة أمام المخاطر الطبيعية.

الكلمات المفتاحية: الفيضانات، نمذجة الهيدرولوجيا، نظم المعلومات الجغرافية، HEC-RAS، HEC-HMS، الجريان السطحي، مرونة المدينة، إدارة المخاطر.

Résumé

Ce mémoire porte sur la modélisation et l'analyse des scénarios d'inondation dans la ville de M'Sila en s'appuyant sur les systèmes d'information géographique (SIG), ainsi que les logiciels HEC-HMS et HEC-RAS. L'objectif est de simuler le ruissellement et la propagation des crues afin d'identifier les zones à risque et de proposer des solutions préventives adaptées. La méthodologie repose sur l'exploitation de données topographiques, hydrologiques et pluviométriques pour générer des simulations réalistes. Les résultats obtenus démontrent la pertinence de l'approche intégrée pour une gestion urbaine plus résiliente face aux inondations.

Mots-clés : inondations, modélisation hydrologique, systèmes d'information géographique, HEC-HMS, HEC-RAS, ruissellement, résilience urbaine, gestion des risques.

Abstract

This thesis focuses on the modeling and analysis of flood scenarios in the city of M'Sila using Geographic Information Systems (GIS) and the hydrologic and hydraulic software HEC-HMS and HEC-RAS. The main objective is to simulate runoff and flood propagation to identify high-risk zones and propose effective mitigation strategies. The methodology involves collecting and processing topographic, climatic, and hydrologic data to produce accurate simulations. The findings highlight the value of integrated digital tools in understanding flood dynamics and improving urban resilience to natural hazards.

Keywords: floods, hydrologic modeling, Geographic Information Systems, HEC-HMS, HEC-RAS,

TABLE DES MATIERES

Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
LISTE DES TABLEAUX	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES CARTES	XI
1. INTRODUCTION GENERALE	1
2. Problématique de l'étude	2
3. Hypothèses:	2
4. Objectifs de l'étude	2
5. Choix de sujet	3
6. Matériels et méthodes :	3
Chapitre I	5
Introduction	6
1. Classification des risques :	6
2. Genèse des crues et des inondations :	7
3. Connaissance du risque inondation :	8
4. Connaissance de l'aléa aux inondations	9
5. Vulnérabilités des enjeux exposés	11
6. Paramètres fondamentaux d'une rivière	12
7. Crues	15
8. Inondation	15
9. Évaluation d'aléa inondation	16
10. Types d'inondations	17
11. Causes des crues et des inondations	21
12. Crues et inondations	23
a. A l'échelle internationale	23
b. A l'échelle nationale	26

C. A l'échelle de la wilaya M'sila	27
Les SIG (Systèmes d'Information Géographique) :	28
Conclusion :	33
Chapitre II	34
Analyse des composants du Milieu Physique	34
1. Présentation de la zone d'étude :	35
2. Présentation de sous-bassin hydrographique du Ksob :	37
3. Les caractéristiques géométriques et morpho-métriques du sous-bassin hydrographique du K'sob	42
3.3. Paramètres morphométriques	49
3.4. Hiérarchisation de réseau Hydrographique :	50
Conclusion	55
<i>Chapitre III</i>	56
Étude climatique	56
et hydro climatique	56
1.1. Etude de régime thermique:	57
4.1. L'indice d'aridité climatique de DE MARTONNE	63
4.2. Diagramme Ombrothermique de Gaussen ($P=2T$):	63
5.1. Présentation du Réseau de Mesure	66
5.2. Analyse Détaillée des Stations Pluviométriques	66
5.3. Mdélisation Hydrologique:	78
5.3.1. La modélisation :	78
Conclusion	83
CHAPITRE IV	84
INTRODUCTION	85
1. MODÉLISATION ET SIMULATION	86
2. Étude et modélisation du risque d'inondation par le logiciel HEC-RAS:	88
3. Les zones exposées au risque d'inondation dans la ville de M'sila :	92
4. Vulnérabilité des quartiers exposés au phénomène d'inondation	96

5. Carte de vulnérabilité:	98
6. Carte du risque :Elle résulte de l'intersection entre le phénomène et la vulnérabilité des enjeux.	99
7. Analyse du risque d'inondation et renforcement de la résilience urbaine à M'Sila : une approche intégrée et multidimensionnelle	101
8. Renforcement de la résilience urbaine (mesures non structurelles)	102
Conclusion :	103
Conclusion générale	104
Liste des références bibliographiques	105

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 : <i>Définition de l'aléa</i>	10
Table 2 : <i>Dommages causés par les inondations dans les pays</i>	25
Table 3 : <i>Dommages causés par les inondations dans la wilaya de M'sila</i> ..	28
Table 4 : Calcul de l'altitude moyenne	46
Table 5 : Classification du relief selon LORSTOM	49
Table 6 : Calcul de la densité hydrographique	52
Table 7 : Récapitulatif des paramètres géométrique et morphométrique	54
Table 8 : Les caractéristiques de la station de M'sila	57
Table 9 : Les moyennes mensuelles interannuelles des températures.	58
Table 10 : Répartition pluviométrique interannuelle des précipitations	60
Table 11 : Les caractéristiques statistiques de la série pluviométrique	60
Table 12 : Les vitesses moyennes mensuelles interannuelles des vents [1981 – 2009]	62
Table 13 : les moyennes des précipitations et des températures de la station de M'sila.	64
Table 14 : Coordonnées des stations pluvio-hydrométriques et leurs codes.	66
Table 15 : Historique des crues dans la ville de M'sila.	93
Table 16 : Niveau de vulnérabilité des quartiers exposés aux inondations ...	97
Table 17 : la classification des niveaux de vulnérabilité	97
Table 18 : Matrice de risque d'inondation	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : <i>Combinaisons du risque ((https://ppri-sudest-vendee.fr, 2021)</i>	9
Figure 2 : <i>Orthogonalité de la vulnérabilité</i>	12
Figure 3 : <i>Relations topographiques entre les différents lits</i>	13
Figure 4 : <i>Inondation de Plaine.....</i>	17
Figure 5 : <i>Inondation par remontées des nappes phréatiques</i>	18
Figure 6 : <i>Inondation par crues torrentielles</i>	18
Figure 7 : <i>Inondation par ruissellement en secteur urbain</i>	19
Figure 8 : <i>Inondation par débordement au-dessus de la digue</i>	20
Figure 9 : <i>Inondation par débordement au-dessus de la digue</i>	20
Figure 10 : <i>infographie-inondation</i>	24
Figure 11 : <i>La variation de l'indce de Gravelius en fonction de la forme du bassin</i>	43
Figure 12 : <i>Courbe hypsométrique de sous-bassin versant de l'Oued K'sob</i>	45
Figure 13 : <i>les variations mensuelles des minimax, maximax et moyennes des températures de la station de M'sila.</i>	58
Figure 14 : <i>Répartition pluviométrique interannuelle des précipitations</i>	60
Figure 15 : <i>les variations mensuelles des vitesses de Vent de la station de M'sila.</i>	62
Figure 16 : <i>Diagramme Ombrothermique de Gaussen</i>	64
Figure 17 : <i>Illustration de l'étage bioclimatique de :M'sila à travers le climagramme d'Emberger.</i>	65
Figure 18 : <i>les caractéristiques empiriques de la Station BBA</i>	67
Figure 19 : <i>la repartition statistiques des PJ max - Station BBA</i>	68
Figure 20 : <i>les périodes de retours des pluies journaliers maximales - Station BBA</i>	68
Figure 21 : <i>Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus - Station BBA</i>	69

Figure 22 : les caractéristiques empiriques de la station de Bordj Ghdire	69
Figure 23 : Distribution statistique des PJ max- Station Bordj Ghdire	70
Figure 24 : les périodes de retours des PJ max de la Station de Bordj Ghdire	70
Figure 25 : Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus Station Bordj Ghdire	70
Figure 26 : les caractéristiques empiriques de la station de Medjez	71
Figure 27 : Distribution statistique des précipitations mensuelles à Medjez	72
Figure 28 : les périodes de retours des PJ max de la Station de Medjez	72
Figure 29 : Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Medjez	73
Figure 30 : les caractéristiques empiriques de la station de Medjana	73
Figure 31 : les caractéristiques empiriques de la station de Medjana	74
Figure 32 : les périodes de retours des PJ max de la Station de Medjana ...	74
Figure 33 : Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Medjana	75
Figure 34 : les caractéristiques empiriques de la station de Oued Ksob.	75
Figure 35 : la repartition statistiques des PJmax de la station de Oued Ksob.	76
Figure 36 : les periodes de retours des PJ max de la station de Oued Ksob.	76
Figure 37 : Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Ksob	77
Figure 38 : Relation Temporelle entre l'Intensité des Précipitations et la Réponse du Ruissellement de Surface"	81
Figure 39 : "L'hydrogramme des crues de Oued Ksob.	82
Figure 40 : "Analyse de l'Écoulement Non Permanent Utilisant les Équations de	82
Figure 41 : l'interface du logiciel HEC HMS.	86
Figure 42 : Interface du logiciel HEC-RAS	87
Figure 43 : Outil Outil RAS Mapper	87
Figure 44 : M'sila (EL ARGOUBE, 2021)	94

Figure 45 :M’sila (zone d’extension, 2021).....	94
Figure 46 :M’sila (siège de la wilaya, centre ville, 2021).....	95
Figure 47 :M’sila (EL KOUCHE, 2021).....	95

LISTE DES CARTES

Carte 1 : localisation de la willaya, la commune et la ville de M'sila.....	36
Carte 2 : la localisation du sous-bassin versant Oued K'sob.....	38
Carte 3 : Carte géologique du sous-bassin versant K'sob.....	40
Carte 4 :carte de couverture de sol sous-bassin versant K'sob.....	42
Carte 5 : Carte de relief de sous-bassin versant K'sob.....	44
Carte 6 :carte des pentes de sous-bassin versant K'sob.....	47
Carte 7 : Carte du réseau hydrographique de sous-bassin-versant K'sob	50
Carte 8 : Carte de cour d'eau du sous-bassin versant K'sob.....	51
Carte 9 : Carte de temperature de la commune de M'sila.....	59
Carte 10 : Carte de précipitation de la commune de M'sila.....	61
Carte 11 : Division du bassin versant en sous-bassins homogènes selon la méthode SCS Curve Number, basée sur le type de sol et occupation du sol.....	78
Carte 12 :Analyse de la Réponse Hydrologique Spatiale des Sous-bassins de Drainage Utilisant le Modèle HEC-HMS".....	80
Carte 13 : Carte d'aléa avec une période de retour 50 ans dans la ville de M'sila.....	89
Carte 14 : Carte d'aléa avec une période de retour 100 ans dans la ville de M'sila.....	90
Carte 15 : la carte de la vitesse d'eau dans l'oued ksob pendant la crue	91
Carte 16 :carte de limitation des zones exposées à l'inondation de la ville de M'sila	96
Carte 17 : carte de la vulnérabilité face aux risque d'inondation dans la ville de M'sila.....	98
Carte 18 :carte de risque.....	99

1. INTRODUCTION GENERALE

Les inondations font partie des catastrophes naturelles les plus répandues et les plus influentes au niveau mondial, car elles enregistrent chaque année de lourdes pertes humaines et matérielles dans divers pays du monde, notamment en raison des changements climatiques importants et de l'urbanisation incontrôlée. Ce phénomène a incité la communauté scientifique à développer des outils et des méthodes modernes pour comprendre les mécanismes des inondations et minimiser leurs effets, grâce à l'utilisation de modèles numériques et de systèmes d'information géographique (SIG).

Au niveau national, l'Algérie a connu des inondations dévastatrices au cours des dernières décennies, telles que les inondations de Bab-el-Oued en 2001, qui ont révélé la vulnérabilité des villes algériennes face aux risques naturels. Dans de nombreux cas, cela est dû à l'expansion de l'urbanisation dans les vallées, à l'absence de planification urbaine basée sur l'analyse des risques et au manque d'outils de surveillance, de prévision et de gestion de crise.

Dans ce contexte, la ville de M'sila est confrontée à des défis croissants en raison des inondations urbaines récurrentes, qui sont devenues une menace directe pour la population et les biens. La situation de la ville dans un climat semi-aride, associée à une croissance urbaine rapide dans les oueds, a exacerbé ce risque. Il est donc nécessaire d'adopter des approches scientifiques précises pour analyser les scénarios d'inondation potentiels et proposer des stratégies de prévention efficaces.

Cette étude vise à modéliser et à analyser les scénarios d'inondation dans la ville de M'sila, en intégrant des modèles hydrologiques (HEC-HMS), hydrauliques (HEC-RAS) et SIG. Cette intégration permet de comprendre la dynamique du ruissellement et d'identifier les zones les plus vulnérables, ce qui permet aux décideurs de soutenir des plans de prévention efficaces et une planification urbaine plus résiliente et durable.

La gestion des risques d'inondation en milieu urbain nécessite une approche holistique et intégrée, basée sur trois piliers principaux : La prévention, la prévision et la gestion de crise. Connaître les caractéristiques du phénomène d'inondation et prévoir ses trajectoires et ses zones d'impact est une condition préalable pour minimiser les pertes humaines et matérielles et améliorer la résilience de la ville face aux catastrophes naturelles. Il s'agit d'une étape essentielle pour parvenir à un développement urbain durable et sûr face à l'accélération du

changement climatique.

2. Problématique de l'étude

La gravité des phénomènes d'inondation dans les villes algériennes augmente en raison des changements climatiques et de l'étalement urbain, ce qui s'applique à la ville de M'sila, qui a connu ces dernières années plusieurs incidents d'inondation qui ont causé d'importants dégâts matériels. Malgré les nombreuses études sur les inondations en Algérie, l'utilisation de modèles numériques avancés pour analyser le comportement des flux hydrologiques et hydrauliques est encore limitée, en particulier dans les environnements urbains semi-arides.

Cette étude part de la question centrale suivante :

Comment modéliser et analyser les scénarios d'inondation dans la ville de M'sila en utilisant les SIG, HEC-HMS et HEC-RAS afin de prédire les zones menacées et de proposer des solutions préventives efficaces ?

3. Hypothèses:

Notre hypothèse pourrait se formuler de la manière suivante :

- 1-L'utilisation combinée des **SIG**, **HEC-HMS** (pour la modélisation hydrologique) et **HEC-RAS** (pour la modélisation hydraulique) permet une **prédiction précise** des zones inondables dans la ville de **M'sila**, en tenant compte des caractéristiques climatiques et urbaines spécifiques à la région.
- 2-Le croisement des données hydrologiques, hydrauliques et urbaines dans un **SIG** permet d'identifier les **points critiques** et de proposer des solutions adaptées (zones d'expansion des crues, bassins de rétention).
- 3-La prise en compte des données topographiques précises (MNT), des caractéristiques d'occupation du sol et des données pluviométriques permet d'améliorer significativement la précision des prévisions de zones inondable.

4. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est de modéliser et analyser les scénarios d'inondation dans la ville de M'sila en utilisant des outils numériques avancés tels que les Systèmes

d'Information Géographique (SIG), le modèle hydrologique HEC-HMS et le modèle hydraulique HEC-RAS. Cette modélisation vise à identifier les zones à risque, à anticiper les impacts potentiels et à proposer des solutions de prévention adaptées.

À partir de cet objectif principal, plusieurs objectifs spécifiques peuvent être formulés :

Analyser les facteurs naturels et anthropiques (climat, topographie, urbanisation) qui favorisent la survenue des inondations dans la ville de M'sila

Utiliser le modèle HEC-HMS pour simuler le ruissellement et évaluer les volumes d'écoulement générés lors d'événements pluvieux intenses.

Appliquer le modèle HEC-RAS pour simuler la propagation des crues dans les lits des oueds traversant la ville et déterminer l'étendue des zones inondées.

Intégrer les résultats de modélisation dans un environnement SIG afin de cartographier les zones vulnérables et de visualiser les différents scénarios d'inondation.

5. Choix de sujet

1. Les inondations constituent l'une des catastrophes naturelles les plus répandues causant des pertes humaines et matérielles considérables.
2. Absence de planification urbaine basée sur l'analyse des risques.
3. Manque d'outils de surveillance et de prévision.
4. Climat semi-aride avec précipitations irrégulières mais intenses.
5. Croissance urbaine rapide.
6. Analyse du comportement des flux hydrologiques et hydrauliques en milieu urbain semi-aride
7. Intégration de plusieurs outils de modélisation (SIG, HEC-HMS, HEC-RAS)

6. Matériels et méthodes :

HEC-HMS permet de simuler le ruissellement et d'évaluer les volumes d'écoulement en réponse à des événements pluvieux extrêmes, tandis que HEC-RAS sert à analyser l'écoulement dans les lits des oueds et à délimiter les zones inondables.

Les SIG assurent la cartographie des zones vulnérables et l'intégration des résultats issus des

modélisations.

Ces outils nécessitent un ensemble de données variées : des données topographiques (MNT, profils en travers), climatiques (séries pluviométriques, intensités de pluie, analyses statistiques), d'occupation du sol (cartographie urbaine, coefficients de ruissellement, infrastructures existantes), ainsi qu'hydrologiques (caractéristiques des bassins versants, débits observés, réseaux hydrographiques). L'intégration et l'analyse de ces données permettent de garantir la fiabilité des simulations hydrologiques et hydrauliques.

Chapitre I
SYNTHESE
BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

L'inondation est un phénomène naturel qui correspond à une montée des eaux. Peu gênante lorsqu'elle est modérée, elle est susceptible de présenter un risque lorsque le débit et le volume d'eau sont tels qu'ils débordent de l'endroit où ils s'écoulent normalement. On parle alors d'inondation. L'eau déborde alors dans les zones d'extension des crues respectives, en particulier celles situées dans le lit majeur des rivières et souvent très urbanisées. Il est donc important de bien différencier les notions de crue et d'inondation (Gullouh, 2017)

L'inondation est un phénomène naturel dangereux. Le risque d'inondation implique donc un processus tel qu'il se produit, ses causes, son déroulement et son évolution, ainsi que l'aléa, les enjeux et leur vulnérabilité.

1. Classification des risques :

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** guerre, terrorisme, émeutes.

Le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix-huit risques majeurs présents sur le territoire et cités par la Loi n° 24-04 du 16 Chaâbane 1445 correspondant au 26 février 2024 portant les règles de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes dans le cadre du développement durable (J.O.R.A. 2024). Il est en troisième position après les séismes et les risques géologiques dans le classement national des risques majeurs,

- Les risques sismiques

- Les risques géologiques
- Les risques d'inondations
- Les risques climatiques extrêmes
- Les risques d'incendies de forêt
- Les risques industriels et énergétiques
- Les risques spatiaux
- Les risques radiologiques et nucléaires
- Les risques affectant la santé humaine
- Les risques affectant la santé animale et végétale
- Les risques de pollution atmosphérique, marine et hydrique
- Les risques des regroupements humains importants
- Les risques de désertification
- Les risques de sécheresse
- Les risques d'érosion du littoral et d'élévation du niveau de la mer ;
- Les risques cybernétiques
- Les risques acridiens
- Les risques biotechnologiques

2. Genèse des crues et des inondations :

Sous les termes de crues et d'inondations se cache un phénomène multiforme. Les crues, terme plutôt hydrologique, désigne le dépassement d'un certain débit ou d'une certaine hauteur par un cours d'eau. Cette hauteur d'eau peut être qualifiée en fonction de sa durée de retour ; par exemple une crue décennale est une hauteur d'eau ou un débit qui a une chance sur dix de se produire chaque année.

Le terme inondation est d'acceptation plutôt topographique ou géomorphologique. Il désigne le débordement d'un cours d'eau de son lit mineur, mais aussi le remplissage d'une cuvette topographique par les eaux de ruissellement local. Ce type d'inondations pluviales se distingue par la vitesse de l'eau, le volume d'eau écoulé et la hauteur d'eau. Ces paramètres sont essentiels pour comprendre les dommages et instaurer des politiques de prévention efficaces (Yahiaoui, 2012).

3. Connaissance du risque inondation :

Le risque d'inondation reste aujourd'hui le risque le plus répandu, faisant le plus de victimes et de dégâts. Il contribue pour 58% dans le nombre des victimes des catastrophes naturelles et pour 31% dans le montant des pertes économiques. 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).

3.1 Connaissance de l'aléa et vulnérabilité

Alea :

L'aléa semble le terme le plus adéquat pour définir le phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité donnée (définition du ministère de l'environnement et de développement durable français). Cette définition révèle le caractère hasardeux du risque et le faire différencier de sa définition linguistique qui le présente comme un risque et non pas un de ses composantes. Dans notre cas où le risque est l'inondation l'aléa n'est que le phénomène naturel de crue non maîtrisable d'occurrence et d'intensité aléatoires, cette prévision est probabiliste et la détermination de l'intensité et la fréquence de crue est basé sur le traitement stochastique de l'historique des événements où la longueur de la série observée joue un rôle principal sur la validité des prévisions. Néanmoins la notion de période de retour est purement statistique et elle ne correspond qu'à l'appréciation de l'intensité du phénomène en comparaison à d'autres (Chachoua, 2010).

Vulnérabilité :

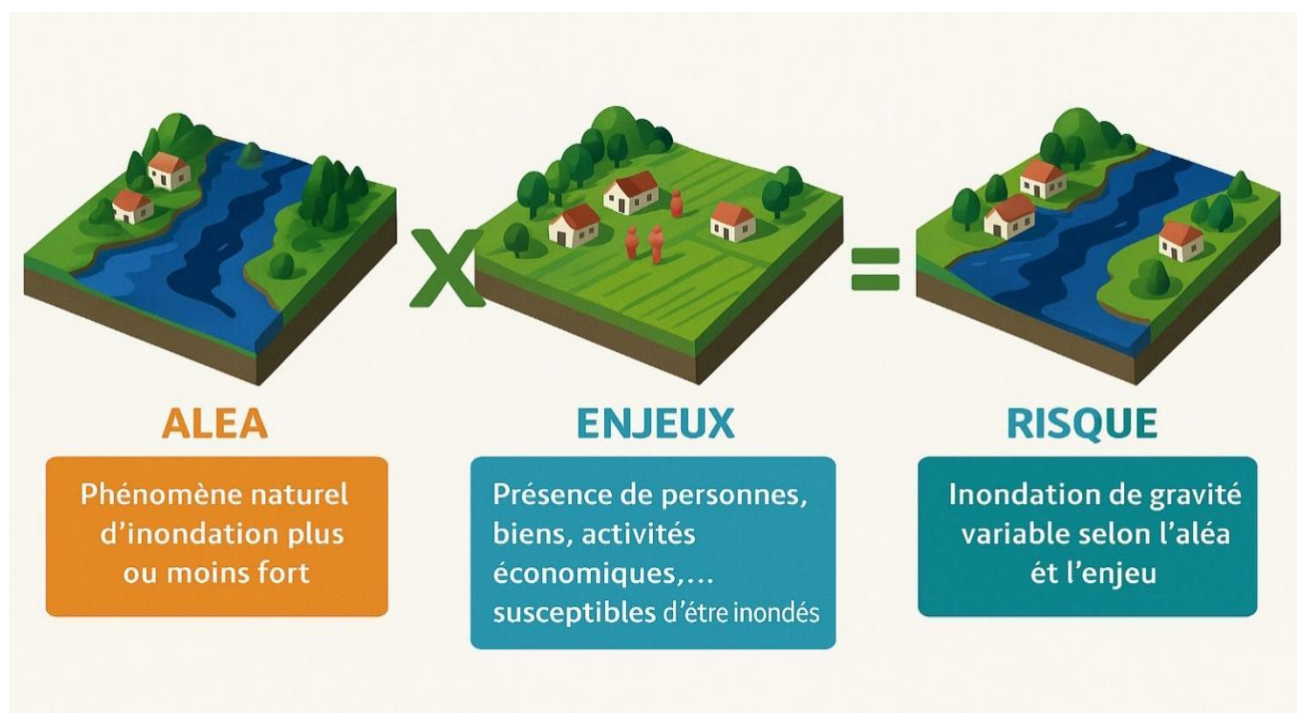
La vulnérabilité est une notion composite. Elle prend en compte divers paramètres géographique et socioéconomique. Plusieurs définitions existent dans la littérature, parmi lesquelles on choisit deux définitions officielles. La définition de MEDD (le Ministère de l'Ecologie et de Développement Durable français) « la vulnérabilité est le niveau des conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux », et celle de NOAA (National Océanique and Atmosphérique Administration) « la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas ». Les enjeux sont les éléments à risque (personne, biens, activités, patrimoine...) attribuent à la vulnérabilité une dimension complexe quantitative et qualitative.

La notion de vulnérabilité peut être résumée en quatre points :

- ♦ La perception sociale de l'aléa
- ♦ L'aléa et ses conséquences prévisibles sur les enjeux
- ♦ Les dispositions prises pour limiter l'effet de l'aléa
- ♦ Les enjeux.

Cette complexité de concepts d'aléa et de la vulnérabilité figure (1) montre que la considération de risque sommairement comme un produit de deux facteurs est limitative et pour mettre en œuvre une politique de gestion précise et scientifique, on doit décomposer ces deux facteurs en plusieurs éléments afin de déterminer ceux susceptibles d'être maîtrisés pour minimiser le risque (Chachoua, 2010).

Figure 1 : Combinaisons du risque ((<https://ppri-sudest-vendee.fr>, 2021))



4. Connaissance de l'aléa aux inondations

L'aléa est la possibilité d'occurrence d'un phénomène ou d'un événement résultant de facteurs ou de processus qui échappent, au moins en partie, au contrôle de l'Homme. Il est défini par une probabilité qui tient compte de l'occurrence et de l'intensité du phénomène considéré et est fonction du temps et de l'espace (Dauphiné)

L'aléa fait appel à deux disciplines principales : l'hydrologie et l'hydraulique fluviale. Dans le cas des inondations, l'hydrologie est la discipline qui fournit les débits et leurs périodes de retour moyennes. L'hydraulique, quant à elle, est la discipline qui fournit les hauteurs d'eau et, accessoirement, les vitesses correspondant à ces débits. La combinaison de ces deux disciplines permet d'associer les périodes de retour aux débits et aux vitesses en différents points d'un cours d'eau (Blin)

Par conséquent, l'aléa est une représentation indépendante de l'inondation en tant que phénomène naturel, physique et incontrôlé en ce qui concerne uniquement les conséquences possibles pour l'environnement et les activités humaines. Il se réfère au comportement hydrologique du bassin versant et au fonctionnement hydraulique du réseau hydrographique.

Elle représente une carte d'un lieu où l'inondation est susceptible de se produire plus ou moins souvent et plus ou moins violemment. Elle est basée sur la combinaison des deux concepts suivants : la récurrence des crues et la submersion.

L'aléa sera calculé dans le cas de la crue centennale, à partir des résultats du modèle hydraulique de référence, en termes de hauteurs maximales atteintes par les débits de crue et en termes de vitesses.

L'aléa sera défini selon trois niveaux : faible, moyen et élevé. Leurs caractéristiques sont déterminées sur la base des hauteurs d'eau H et des vitesses V , comme le montre le tableau (1) ci-dessous :

Table 1: Définition de l'aléa

Hauteur	Vitesse		
	$V < 0,2 \text{ m/s}$	$0,2 \text{ m/s} < V < 0,5 \text{ m/s}$	$V > 0,5 \text{ m/s}$
$H < 0,5 \text{ m}$	Aléa faible	Aléa moyen	Aléa fort
$0,5 \text{ m} < H < 1 \text{ m}$	Aléa moyen	Aléa moyen	Aléa fort
$1 \text{ m} < H < 1,5 \text{ m}$	Aléa fort	Aléa fort	Aléa très fort
$H > 1,5 \text{ m}$	Aléa très fort	Aléa très fort	Aléa très fort

(HYDRETUDES., 2021).

Le danger est considéré comme élevé dans les zones inondables où les hauteurs d'eau

dépassent 1 m ou les vitesses sont élevées. Un risque moyen sera pris en considération pour des vitesses d'écoulement allant de faibles à moyennes dans les zones caractérisées comme inondables à une hauteur comprise entre 0,5 m et 1 m, ou dans les cas où les hauteurs d'eau restent inférieures à 1 m pour des vitesses moyennes. Le risque est faible dans les zones inondables où les hauteurs d'eau sont inférieures à 0,5 m et les vitesses faibles (HYDRETTDES., 2021)

5. Vulnérabilités des enjeux exposés

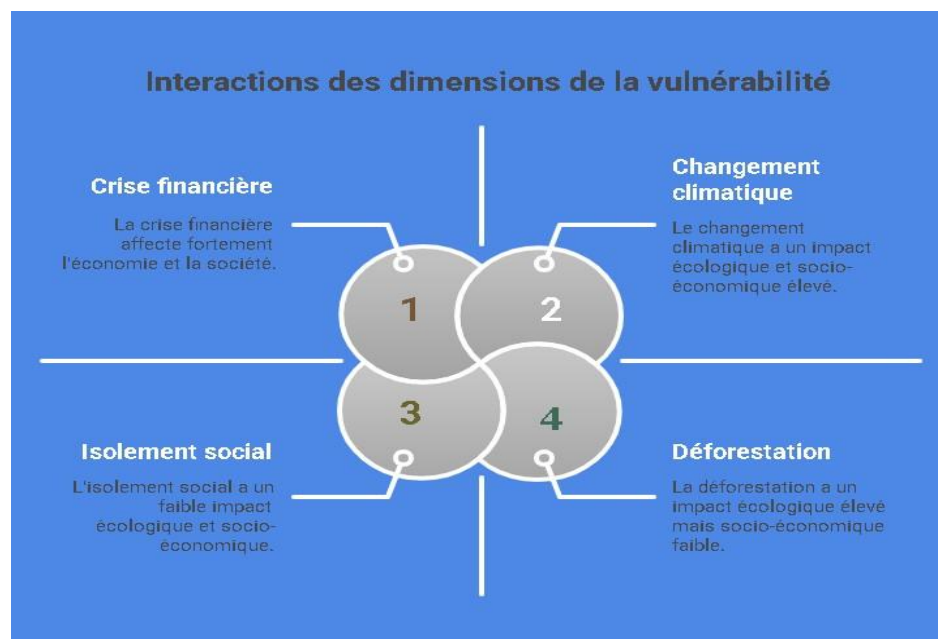
Outre les dangers, l'autre élément clé de l'analyse des risques est la vulnérabilité, en particulier dans les zones urbaines et les mégapoles. Elle est à la fois humaine, socio-économique et institutionnelle. Elle couvre l'existence ou non de mesures de protection que certains pays prennent et d'autres non. Elle remet en question la capacité de la société à être affectée par ces crises de la nature. La vulnérabilité implique une approche systémique : une réquisition est nécessaire, bien que complexe, encore plus dans le cas des villes, et encore plus pour les mégapoles. Les facteurs de vulnérabilité se multiplient, s'amplifient et se diversifient à travers la ville qui se nourrit de son fonctionnement, de son organisation spatiale et de ses dynamiques territoriales. Les aspects économiques, sociaux et organisationnels, patrimoniaux et environnementaux peuvent tous être des facteurs de vulnérabilité comme

- La densité de la population (étalement des constructions)
- Les acteurs techniques (comme le drainage sous-dimensionné, les stations d'épuration des eaux usées, etc.)
- Les facteurs sociaux et économiques (qui définissent dans une certaine mesure les modes d'occupation des sols, la ségrégation sociale et la fragmentation de l'espace)
- L'acceptation du danger (parfois au lieu du logement ou de la pauvreté comme facteur de vulnérabilité)
- Les facteurs psychologiques (ignorance du danger, manque de connaissance des risques)
- Les facteurs politiques et ceux liés au contexte historique des sociétés : facteurs institutionnels et politico-administratifs (manque de réflexion sur les programmes de planification)
- Les facteurs structurels (position précise et moment de l'impact)
- Les facteurs fonctionnels (mauvaise gestion des crises, mauvaise articulation entre la

technique et l'humain)

Cette orthogonalité de la vulnérabilité est définie par trois composantes : écologique, humaine ou sociale et économique (Fig (2) (Blin)

Figure 2: Orthogonalité de la vulnérabilité



(Blin, 2001)

Il sera commenté les concepts de base suivants pour une meilleure compréhension de l'aléa inondation : Paramètres fondamentaux d'une rivière, inondation, principaux paramètres du risque d'inondation, les types d'inondation et les causes d'inondation.

6. Paramètres fondamentaux d'une rivière

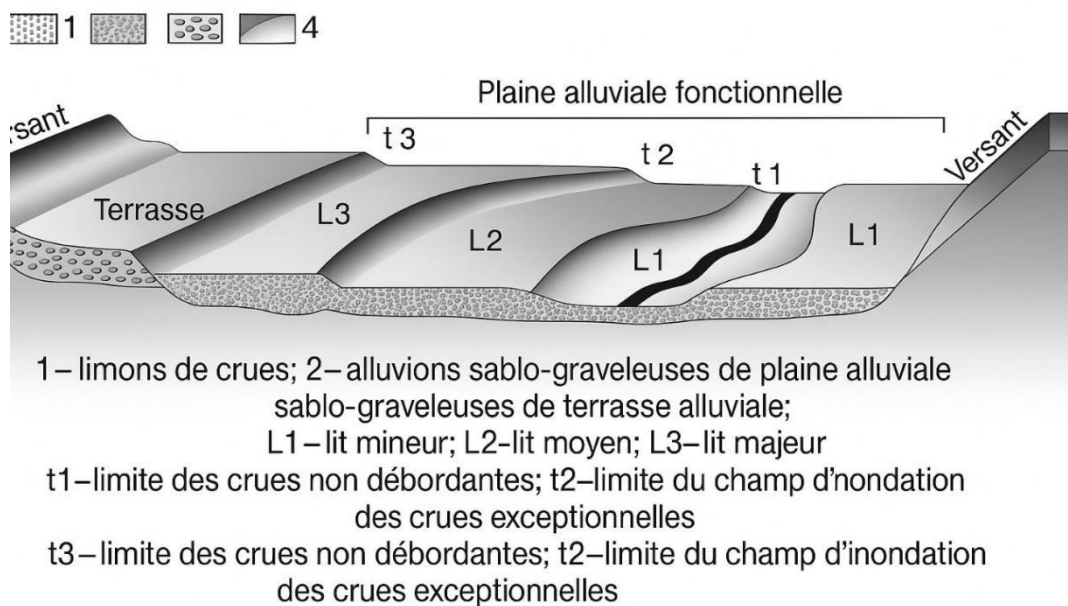
Lit d'un cours d'eau

Dans la mesure où les lits des cours d'eau sont formés par l'eau qu'ils contiennent, il est assez naturel de penser à leurs dimensions et de les relier aux régimes hydrologiques. Un cours d'eau comporte généralement trois lits : le lit mineur, le lit moyen et le lit majeur

Le lit mineur est presque toujours plein (sauf pour les oueds) (Ballais, 2005) et cette crue exceptionnelle et rare est donc accueillie par le lit majeur. Le troisième lit, généralement intermédiaire entre les deux, est représenté par le régime des crues fréquentes (avec des périodes de retour de 1 à 5 ans, parfois 10 ans). Bien identifié dans les régions à pluviométrie contrastée, comme la Méditerranée, ainsi que dans les traversées de piedmont des massifs montagneux, il n'est pas toujours facilement identifiable du lit majeur, dans le cas des cours d'eau de plaine sous des climats à pluviométrie plus régulière. En conséquence, la courbe enveloppe des crues de la rivière dans le passé devient la limite extérieure du lit majeur d'une rivière (Lambert., 2006)

Ainsi, délimiter la zone inondable d'un cours d'eau revient à délimiter les limites de son lit majeur. Ses limites extérieures sont déterminées par l'étude stéréoscopique des photos aériennes et par l'étude du terrain, en combinant la microtopographie avec la granulométrie et la couleur des dépôts.

Figure 3: Relations topographiques entre les différents lits



(Masson, 1996)

Ce lit majeur fait alors partie intégrante de la rivière, c'est s'installer dans la rivière elle-même. Cet espace (lit majeur) occupé par un fleuve lors d'une crue peut être divisé en deux zones

(Merabet, 2006):

- Zone d'écoulement, aux abords du lit mineur, qui régit l'inondation : la

baisse du débit et la vitesse de montée de l'eau vers l'aval

- Zone de stockage des eaux à faible vitesse. Ce stockage est très important car il diminue l'inondation, c'est-à-dire le débit et la vitesse de la montée des eaux en aval.

Berges et talus

La berge désigne le talus incliné qui délimite le lit mineur et le lit majeur des cours d'eau. D'autre part, la berge est l'espace géographique qui se situe entre le milieu aquatique et le milieu terrestre. Elles commencent au niveau du sommet du talus et constituent une aire plus ou moins horizontale, située sous l'influence du milieu aquatique (Merabet, 2006).

Ripisylve

Il peut s'agir d'une bande étroite d'arbres soulignant le bord du lit mineur ou d'un véritable occupant plusieurs dizaines voire centaines de mètres de part et d'autre du lit mineur. Il recouvre tout ou partie du lit majeur. Elle fait partie de l'environnement fluvial et est riche en termes de diversité floristique. Elle est composée de strates herbacées très diversifiées, souvent, et de strates arbustives et arborescentes de quelques espèces. (Degoutte, 2012)

La végétation riveraine peut jouer un rôle important dans les inondations, soit en augmentant la capacité des eaux de la plaine d'inondation, soit en créant une plaine d'inondation qui affectera ultérieurement l'inondation par les effets hydrauliques suivants :

- L'abaissement des vitesses dans le lit majeur, d'où l'action érosive du courant
- Le contrôle des inondations en aval.

Alluvions et substratum

En règle générale, les alluvions constituent le socle de la rivière. Elles sont constituées de grains fins ou grossiers déposés ou repris par le courant. Au-dessus se trouve la roche

mère, qui peut être une roche dure ou une roche plus ou moins tendre (schiste, grès, marne, etc.).

7. Crues

Une crue est définie comme la hauteur d'eau qui peut rester dans le lit mineur de la rivière. Dès que celui-ci ne suffit plus à contenir le débit, l'eau déborde et se répand dans le lit majeur, provoquant une inondation. Il est donc possible d'avoir une crue sans inondation (Veyret& et al, 2004).

L'inondation, quant à elle, implique la notion de débordement et d'envahissement d'un territoire. De nombreux géographes et hydrologues ont adopté le critère selon lequel un cours d'eau est en crue lorsque son débit est trois à cinq fois supérieur à son débit moyen. Plus concrètement, on considère qu'une rivière est en crue lorsqu'elle déborde les limites de son lit mineur. Il s'agit d'un phénomène naturel périodique qui ne devient exceptionnel que lorsque les débits deviennent considérables par rapport à son module ; on parle alors de crue critique, qui peut provoquer des inondations dans les zones riveraines. Une crue est caractérisée par son hydrogramme, qui représente les variations du débit en fonction du temps. Plus précisément, c'est la partie ascendante de ce hydrogramme qui est appelée crue, la partie descendante étant la décrue. Une crue est définie par différents critères : sa genèse, sa durée, sa fréquence, son débit de pointe et son volume

8. Inondation

L'inondation est une immersion comparative, rapide ou progressive, de la zone qui est habituellement hors d'eau et dans laquelle vivent des personnes. Ainsi, un risque d'inondation est une combinaison de deux éléments : l'eau, qui déborde du lit habituel, et les personnes qui organisent leur vie dans la zone alluviale. L'extension de l'inondation dépend directement de la hauteur de l'eau, de la vitesse du courant et de sa durée. Les paramètres comprennent : les précipitations, l'état du bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur, etc.). Ces caractéristiques naturelles peuvent être exacerbées par la présence d'activités humaines (Merabet, 2006)

9. Évaluation d'aléa inondation

a. Période de retour de crue

La notion de période de retour T est une autre façon de caractériser la fréquence d'apparition d'un phénomène à un moment donné. Statistiquement, elle est définie comme l'inverse de la probabilité de dépassement " P " de ce phénomène : $T = 1/P$

Un phénomène dont la période de retour est de cent ans (phénomène centennal) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé chaque année. Ceci est vrai sur une très longue période. Mais il peut aussi se répéter plusieurs fois sur de courtes périodes (quelques années). En d'autres termes, en vingt ans, un individu a une chance sur cinq de subir une crue centennale. La notion d'inondation est souvent associée à la notion de période de retour (décennale, centennale, millénale, etc.). Plus la période est longue, plus le débit 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 durée de submersion

La hauteur de submersion peut avoir un impact important sur les bâtiments, en particulier lorsqu'elle dépasse le niveau de référence. Pour l'homme, une hauteur d'eau supérieure à 50 cm est généralement considérée comme dangereuse. Par

exemple, une voiture commence à flotter à partir de 30 cm d'eau (Merabet, 2006)

c. Vitesse du courant

La vitesse d'écoulement est déterminée par la pente du lit et sa rugosité, et la dangerosité de l'écoulement dépend du couple hauteur/vitesse. Par exemple, au-delà de 0,5 m/s, la vitesse du courant devient dangereuse pour l'homme, avec le risque d'être emporté par le cours d'eau ou blessé par des objets emportés à grande vitesse (Merabet, 2006)

d. Volume de matériaux transportés

Ce volume est communément appelé transport solide. Il s'agit de matériaux (argiles, limons, sables, graviers, etc.) présents dans les cours d'eau, qui peuvent être transportés soit par suspension dans l'eau, soit par déplacement le long du lit, sous l'effet des forces

du courant. Le risque d'inondation d'une rivière torrentielle est essentiellement caractérisé par une vitesse de courant élevée et un fort transport solide (Merabet, 2006)

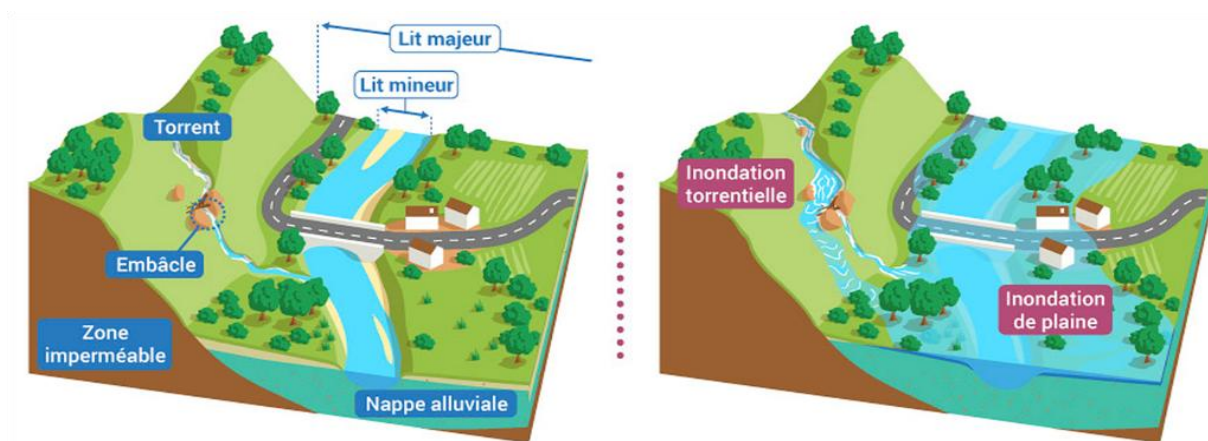
10. Types d'inondations

Selon l'événement à l'origine de la catastrophe, on peut distinguer plusieurs types d'inondations :

a. Inondation de plaine (fluviale)

Les inondations de plaine font suite à des pluies océaniques prolongées qui, en général, présentent des vitesses d'écoulement modérées, des montées d'eau lentes et affectent des surfaces peu inclinées. C'est le cas lorsque la rivière sort lentement de son lit normal et occupe le lit principal et la plaine pendant une période assez longue. Ces phénomènes sont très répandus dans les zones de plaine ou mal drainées. Sa dynamique lente peut durer plusieurs semaines.

Figure 4: Inondation de Plaine.



(Ledoux, 2006).

Elle est susceptible de provoquer des dégâts en raison de la hauteur et de la durée de submersion

b. Inondation par la remontée les eaux souterraines

Dirige l'inondation par débordement, par remontée de la nappe phréatique (Fig.5) en surface ou par intrusion d'eau à l'intérieur des différents réseaux d'assainissement (Merabet, 2006)

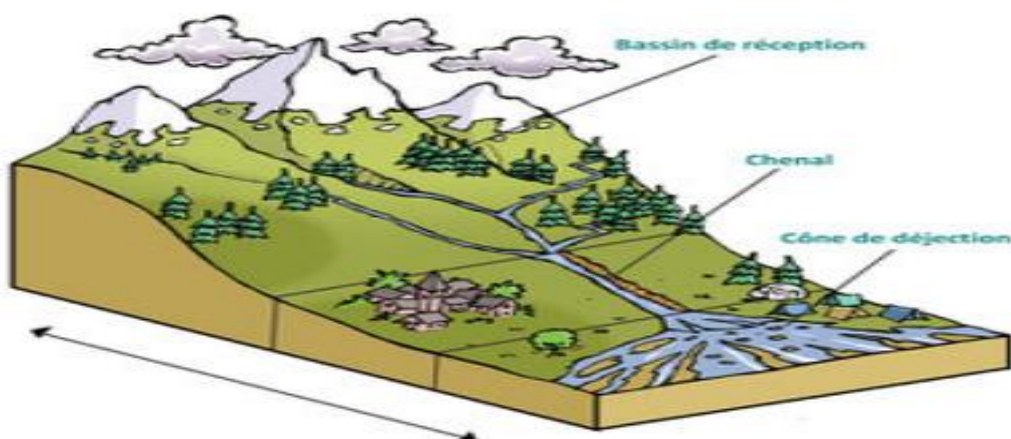
Figure 5: Inondation par remontées des nappes phréatiques

(<https://images.app.goo.gl/ftsSHNHseX2ADkVi8>)

Toute référence à la nature de l'inondation dans le marais fait généralement référence à un typhon de très fortes pluies qui immerge complètement tout ce qui se trouve sous l'eau, mais sans aucune montée des eaux sous les bâtiments (Boubchir, 2007)

C. Inondation torrentielle

Les inondations torrentielles (Fig.6) se présentent avec des caractéristiques soudaines et violentes proches de celles des événements pluvieux de courte durée et de forte intensité, comme les orages convectifs. Normalement, les crues rapides se produisent lorsque le temps de parcours de la goutte d'eau sur le point hydrologique le plus éloigné est inférieur à 12 heures (ou 24 heures selon certains auteurs) jusqu'à l'exutoire. En général, elles se caractérisent principalement par une montée rapide des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur des surfaces fortement inclinées.

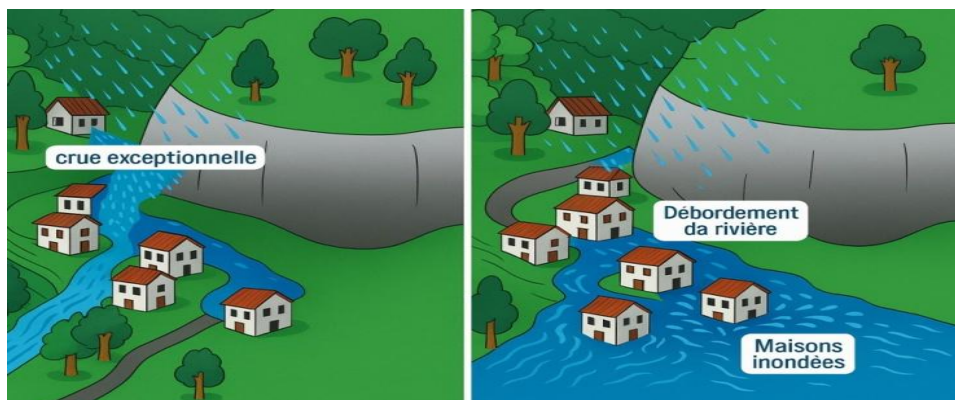
Figure 6: Inondation par crues torrentielles

Les bassins versants susceptibles d'être affectés par ces phénomènes sont ceux dont la surface est petite à moyenne et la pente moyenne forte. Les crues torrentielles sont donc celles d'un transport solide très important et d'une modification marquée des lits. Les dégâts occasionnés par ces phénomènes sont généralement liés à la vitesse du courant renforcée par les matériaux qui peuvent être transportés par les rivières générant de telles crues (Ledoux, 2006)

c. Inondations par ruissellement en milieu urbain

Un régime de fortes pluies se traduit par des pics de ruissellement en milieu urbain qui peuvent être très importants et provoquer le débordement des réseaux d'évacuation des eaux pluviales et des ouvrages hydrauliques (ponceaux, caniveaux, fossés). Les débordements se font souvent à des vitesses élevées et à des hauteurs d'eau variables. Ils peuvent entraîner des dégâts humains et matériels considérables (Fig.7).

:Figure 7 Inondation par ruissellement en secteur urbain



a. Rupture de barrages ou d'embâcles provoquant des inondations

L'inondation qui résulterait de la rupture des barrages et des embâcles dans les rivières endiguées serait un événement soudain, soit par débordement au-dessus de la digue, soit par l'occurrence de la rupture de la digue. Le phénomène peut être très soudain, et plus le site est proche de la digue, plus il est dommageable. Par conséquent, le fait de se trouver derrière un ouvrage de protection conçu pour un niveau de crue donné peut augmenter le seuil de risque en cas de rupture ou de surverse. Des secteurs normalement hors d'eau peuvent se retrouver subitement inondés. Le réservoir se remplit puis déborde pour la crue d'ampleur suffisante. Une fois ce seuil atteint, l'ouvrage n'atténue plus le débit. Cette rivière inonde alors sa plaine alluviale comme s'il n'y avait pas eu d'aménagement (Boubchir, 2007).

La végétation, y compris les arbres et les arbustes, arrachée aux berges et transportée par le courant peut s'accrocher et même bloquer les ponts. Il en résulte une exacerbation des crues en amont. Lorsque l'embâcle se rompt, la vague peut être générée et le danger d'inondation en aval accru (Fig.8).

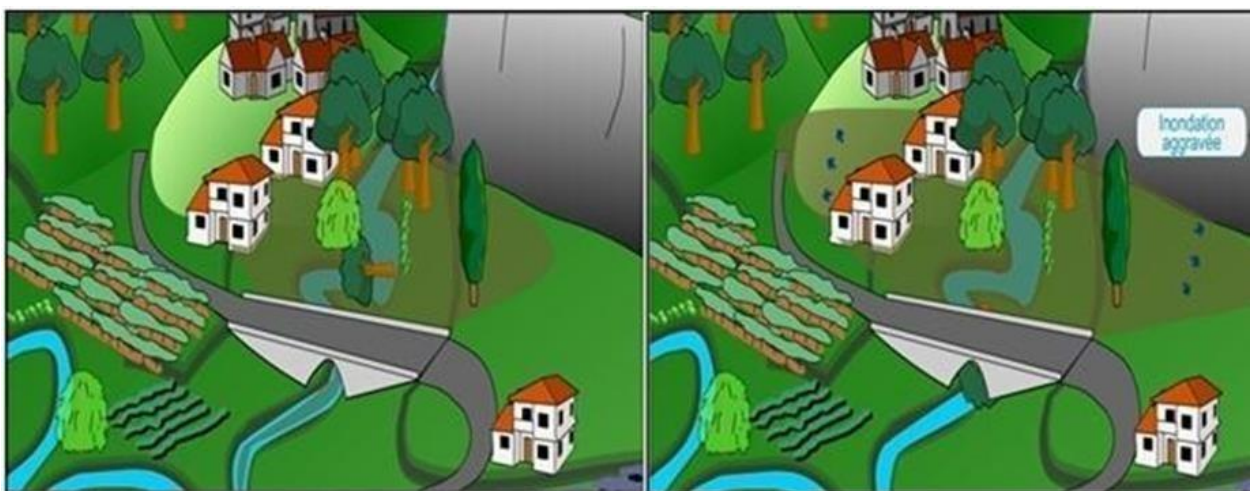
Figure 8: Inondation par débordement au-dessus de la digue



((Ledoux., 2006)).

Les structures les plus vulnérables à ce phénomène sont celles dont les piles ont une très faible hauteur de chute ou un tirant d'air sous le pont trop faible pour permettre le passage des embâcles. Seule la présence de tels embâcles augmente le risque de contournement, voire de submersion de la structure. Le résultat peut être un coup sévère, voire la destruction du pont lui-même et/ou des remblais d'accès, étant donné que les remblais routiers ne retiennent pas l'eau et ne soutiennent pas l'érosion actuelle du remblai

Figure 9: Inondation par débordement au-dessus de la digue



(Ledoux., 2006)

a. Inondation marine

La submersion marine est l'inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques, y compris de fortes dépressions et des vents marins et des coefficients de marée élevés. Elle se traduit par l'invasion d'une eau salée particulièrement agressive. Lors d'un raz-de-marée ou d'un tsunami (phényle mais dévastateur), ou lors d'une tempête (coup de mer, vents violents et précipitations), ou lors de la rupture des défenses contre la mer (dans ce cas, les risques sont concentrés dans les zones dépressionnaires du littoral)

11. Causes des crues et des inondations

a. Causes directes

La cause la plus importante des inondations est l'abondance des précipitations. Les causes des pluies abondantes peuvent être classées selon quelques types (Salomon, 1997):

- **Averses soudaines** de type orageux, lorsqu'en quelques heures, les orages produisant des pluies ont des hauteurs d'eau de 200 à 300 mm. Les intensités de pluie de 10 mm/min en Espagne en sont un exemple. Si l'on considère qu'une intensité de 1 mm/min représente un débit d'eau météorique de $16,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, il n'est pas étonnant que certains petits bassins versants puissent offrir des débits spécifiques records parfois supérieurs à $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ pendant un certain temps, avec les conséquences catastrophiques que l'on suppose ;

- **Averses prolongées**, moins violentes, car constituées de nombreuses averses consécutives séparées par des intervalles de calme, mais tout aussi dévastatrices. A titre d'exemple, la crue de la Saine en 1990 a été une véritable mangeuse d'hommes et le pays a été submergé pendant des semaines ;

- **Pluies orographiques et cycloniques** : par exemple, 1136 mm aux Philippines en 24 heures. La relation générale entre la puissance de l'inondation et les dommages qu'elle provoque est fonction du poids, de l'intensité et de la durée des précipitations dans le bassin versant, de la hauteur des quotients de ruissellement et de l'érodabilité morphologique et matérielle du bassin versant ;

- **Fonte soudaine des neiges** : ce phénomène est fréquent en Europe à la fin du printemps et au début de l'été. Au printemps, les bassins versants sont recouverts de neige. La présence d'un front chaud avec du vent et de la pluie qui arrive à la fin de l'hiver, peut provoquer un dégel brutal de la neige, générant d'importantes inondations sur le sol, dans certains cas gelés et sans végétation. Le plus souvent, cependant, l'apport de neige est combiné à des précipitations. de neige est combiné à des précipitations ;

- **Rupture de la glace des fleuves** : il s'agit de la rupture des barrages naturels de glace, que ce soit en haute montagne ou dans les pays à haute altitude (par exemple, les grands fleuves de Sibérie et du Canada). Dans ce dernier cas, le phénomène est saisonnier : chaque hiver, des températures glaciales gèlent les eaux des fleuves, d'abord en surface, puis progressivement en profondeur. D'importants embâcles se forment, empêchant progressivement tout écoulement en surface. Cependant, dans le cours supérieur des rivières, le captage est moins efficace en raison de leur position plus méridionale (et donc

relativement plus chaude), de sorte que l'eau restant à l'état liquide s'accumule dans de grands lacs temporaires. Dès l'arrivée du printemps, la combinaison des températures plus chaudes et du fantastique poussé d'eau qui s'accumule derrière les barrages de glace, conduit tôt ou tard à leur rupture. C'est alors que se produit la vaste rupture des barrages, qui emporte tout sur son passage. Ces inondations catastrophiques, heureusement très rares, ne peuvent pas être gérées une fois qu'elles ont commencé. Seule la prévention est possible, par exemple par le dynamitage préalable des embâcles dès qu'ils atteignent un certain seuil ;

■ **Accidents** : rupture accidentelle d'un barrage naturel ou artificiel. Parfois, cet accident est lui-même lié à un autre phénomène exceptionnel (glissement de terrain, fortes pluies, volcans, tremblement de terre, etc.) (Merabet, 2006)

b. Phénomènes aggravant l'aléa

Un grand nombre de facteurs autres que ceux mentionnés ci-dessus interviennent, souvent de manière aggravante, dans les dommages causés par les inondations. Il s'agit notamment de l'influence de facteurs naturels et anthropiques.

i. Influence des facteurs naturels

- **Bassin versant et sa forme** : Pour une même surface, la forme de l'hydrogramme de crue résultant d'une pluie donnée est très différente en fonction de la forme du bassin versant. Un bassin versant très allongé ne réagit pas de la même manière qu'un bassin versant compact, ce qui a conduit à l'utilisation d'un indice pour évaluer le coefficient de compacité. En principe, plus l'indice est faible, plus la concentration des eaux des affluents est rapide, et plus le risque d'inondations brutales et bien différenciées est important ;
- **Configuration du relief du lit de la rivière** : la pente a une influence directe sur la vitesse d'écoulement, et donc sur la puissance de l'inondation. Si le profil longitudinal d'une rivière peut être assimilé à une série de segments plus ou moins pentus, il exerce une influence visible sur les inondations. Le profil transversal est également important : pour un même débit de crue, un cours d'eau encaissé verra son niveau d'eau monter beaucoup plus vite qu'un cours d'eau au profil plus évasé. En revanche, ce dernier a plus de chances de déborder ;
- **Densité des cours d'eau et perméabilité du bassin versant** : la densité des cours d'eau est fonction de la nature du terrain, et moins le terrain est perméable, plus le réseau est développé et complexe. Il est facile de comprendre que plus l'imperméabilité est grande, plus l'eau météorique est disponible pour le ruissellement de surface. De ce point de vue, les rivières drainant des régions imperméables sont plus susceptibles de développer des inondations dangereuses ;

- **Facteurs biogéographiques** : la végétation joue un rôle climatique complexe, en influençant le ruissellement, en retenant une partie des précipitations, en évaporant

L'eau, etc. Depuis longtemps, on sait qu'une couverture végétale dense réduit et ralentit

Considérablement le ruissellement. D'une part, la forêt intercepte la pluie et la neige, cette dernière mettant très longtemps à fondre sous le couvert. D'autre part, elle augmente fortement l'évapotranspiration qui, dans les zones tempérées, atteint ou dépasse fréquemment 500 à 700 mm/an. On comprend que cela limite le ruissellement direct et l'alimentation en eau des cours d'eau. Dans de nombreux cas, une végétation vigoureuse, avec ses nombreuses racines enchevêtrées, constitue une excellente protection naturelle, presque totale, contre l'érosion torrentielle. A l'inverse, la destruction du couvert végétal est un facteur d'augmentation de la puissance des inondations.

ii. Influence des facteurs anthropiques

Occupation des zones riveraines : la concentration de personnes et l'accumulation de biens dans les zones inondables génèrent des risques d'inondation par l'augmentation des enjeux, l'accroissement de la vulnérabilité et l'absence de prévention-précaution ;

- L'imperméabilisation importante (conséquences du développement urbain ou agricole)
- La méfiance à l'égard des systèmes de protection (digues, seuils).

12. Crues et inondations

a. A l'échelle internationale

Le média Visual Capitalist a diffusé une infographie illustrant l'ampleur du phénomène, élaborée à partir des données d'une étude commandée par la Banque mondiale et publiée en juin 2022 dans la revue Nature. Ce visuel présente, pays par pays, la part de la population exposée aux risques d'inondation. Sans surprise, les cinq nations les plus vulnérables sont les Pays-Bas (59%), le Bangladesh (58%), le Vietnam (46%), l'Égypte (41%) et la Birmanie (40%)

Figure 10:infographie-inondation

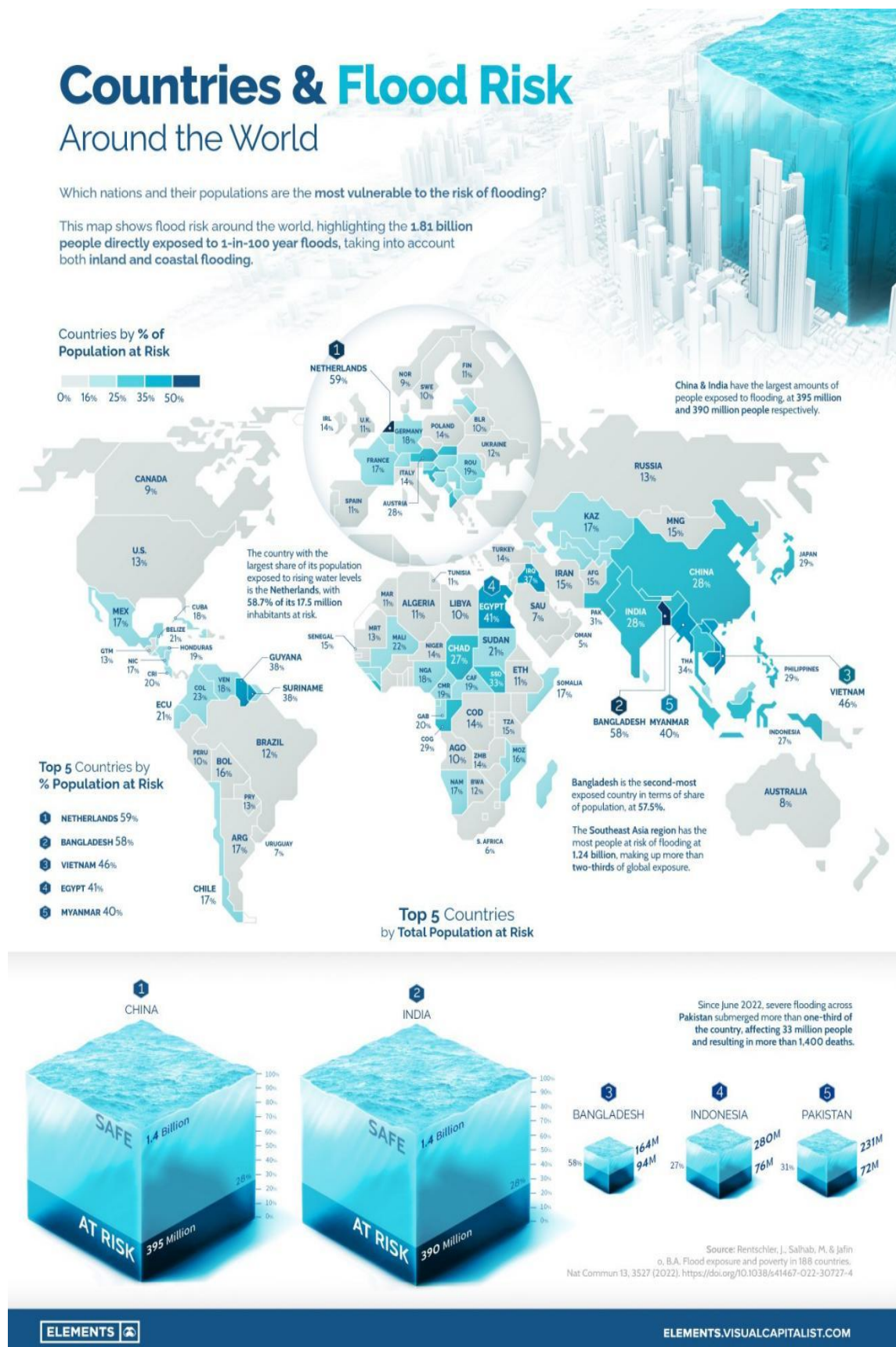


Table 2: Dommages causés par les inondations dans les pays

Année	Région/Pays	Impacts économiques (USD)	Pertes humaines	Personnes affectées	Observations
2000	Mozambique	500 millions \$	800	2 millions	Pires inondations depuis 50 ans
2002	Europe centrale	16,5 milliards \$	232	600 000	Danube, Elbe et autres fleuves débordés
2004	Asie du Sud-Est	4,5 milliards \$	2 000+	20 millions	Suite au tsunami de l'océan Indien
2005	États-Unis (Ouragan Katrina)	125 milliards \$	1 833	5 millions	80% de la Nouvelle-Orléans inondée
2007	Royaume-Uni	4 milliards £	13	55 000	Été le plus pluvieux depuis 250 ans
2008	Myanmar (Cyclone Nargis)	10 milliards \$	138 000	2,4 millions	Pire catastrophe naturelle du pays
2010	Pakistan	9,5 milliards \$	1 985	20 millions	20% du territoire submergé
2011	Thaïlande	46,5 milliards \$	815	13,6 millions	65 des 77 provinces touchées
2012	Nigeria	16,9 milliards \$	363	7 millions	Plus graves inondations depuis 40 ans
2013	Europe centrale	12,9 milliards \$	25	1,3 million	Danube et Elbe en crue historique
2014	Balkans	3,3 milliards \$	86	2,6 millions	Pires inondations depuis un siècle
2015	Inde du Sud	3 milliards \$	500+	1,8 million	Chennai particulièrement touchée
2017	Asie du Sud	3,5 milliards \$	1 200+	45 millions	Inde, Bangladesh, Népal touchés
2018	Japon	9,7 milliards \$	225	2,3 millions	Précipitations records
2019	Iran	2,5 milliards \$	76	10 millions	25 des 31 provinces touchées
2020	Chine	32 milliards \$	397	63 millions	Bassin du Yangtsé particulièrement touché
2021	Allemagne et Belgique	33 milliards \$	242	700 000	Inondations les plus meurtrières d'Europe occidentale depuis des décennies
2022	Pakistan	30 milliards \$	1 739	33 millions	Un tiers du pays sous les eaux
2023	Libye (Tempête Daniel)	1,5 milliard \$	11 300+	884 000	Rupture de barrages à Derna
2024	Brésil (Rio Grande do Sul)	5,2 milliards \$	178	2,3 millions	Plus graves inondations de l'histoire de l'État

b. A l'échelle nationale

D'après le recensement effectué par les services de protection civile, on estime qu'en moyenne, une commune sur trois pourrait très probablement être partiellement ou totalement touchée par les inondations. Les inondations restent l'une des formes de catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dommageables. Certaines inondations majeures en Algérie atteignent parfois l'échelle d'une catastrophe nationale (Guerbi&Abdelkebir, 2017).

Dans ce sens, les inondations les plus importantes en Algérie sont présentées dans la figure (11) comme une échelle de leur magnitude.

- Le 01 septembre 1980 : Violences pluvieuses localisées au rayon de 15 km de la ville d'El Eulma, avec inondation catastrophique de l'Oued Djehadi. Le bilan est de 44 morts, 50 blessés et 365 familles sinistrées
- Le 20 octobre 1993 : dans l'ouest de l'Algérie, 22 morts et 14 blessés dans l'Oued

Rhiou (W. Chlef)

- Octobre 1994 : le pays est frappé par des inondations dans plusieurs régions. Le bilan est de 60 morts et des dizaines de disparus en dix jours d'inondations ;
- Le 22 octobre 2000 : l'ouest de l'Algérie est à nouveau touché, avec plus de 24 morts ;
- Le 10 et 11 novembre 2001 : les tristement célèbres inondations de Bab El Oued à Alger, avec des pluies torrentielles causant 733 morts, 30 000 personnes sans abri et d'importants dégâts matériels ;
- Le 1^{er} octobre 2008 : des pluies torrentielles ont frappé la région de Ghardaïa avec des orages extrêmement violents, au cours desquels les rivières ont dangereusement monté. Au moins 33 personnes ont été tuées, 44 ont été blessées et près de 600 maisons ont été détruites ;
- Le 09 octobre 2008 : Dans la wilaya de Aïn Defla, des inondations soudaines ont causé 06 morts et 08 blessés parmi la population ;
- Les fortes pluies orageuses de la nuit du 12 octobre 2008 ont causé, dans les communes de Khemis Miliana et Sidi Lakhdar (w. Aïn Defla), des dégâts matériels essentiellement importants ;
- En octobre 2008, il a été rapporté que certaines parties de la wilaya de Batna (450 km au sud-est d'Alger) ont été touchées par des inondations au cours desquelles deux personnes

ont été emportées par les crues des oueds ;

- En octobre 2008, toujours les 15 et 16, plus exactement, la wilaya de Béchar, une région aride de type désertique, a été sous les eaux et a provoqué la mort d'au moins 08 personnes par noyade en plus de dégâts matériels considérables ;
- Dans la nuit du 01 octobre 2011, de violentes pluies se sont abattues sur la wilaya d'El Bayadh, faisant au moins 11 morts, détruisant près de 170 habitations, et causant des dégâts à deux ponts ;
- Le 15 septembre 2015, des pluies abondantes se sont abattues sur la ville de Tamanrasset provoquant l'inondation de l'Oued Amsel. On dénombre 13 victimes et d'importants dégâts matériels.
- 7 mars 2021 : Chlef, Sept personnes ont péri, dont deux femmes et deux enfants, lorsque trois véhicules ont été emportés par la crue d'un oued. Trois autres personnes étaient portées disparues.
- 2-3 septembre 2023 – Tlemcen et El Bayadh, Huit personnes ont perdu la vie après que leurs véhicules ont été emportés par les crues des oueds Ed-Dalia et Chadli.
- 28 février – 1^{er} mars 2024 – Nord-Est algérien

Des pluies torrentielles ont causé des inondations dans plusieurs wilayas, faisant 5 morts et 263 blessés. Soixante-six communes ont été déclarées zones sinistrées.

- 18 août 2024 – Djanet

Des pluies intenses ont provoqué des crues de l'oued Djanet, nécessitant 24 interventions de la Protection civile pour secourir des personnes encerclées par les eaux et évacuer des habitations inondées

- 15 mai 2025 Tipaza, Décès d'un enfant, routes et maisons inondées, personnes secourues

C. A l'échelle de la wilaya M'sila

Depuis 1994, la ville de M'sila a connu plusieurs épisodes d'inondations, causés principalement par le débordement de l'oued K'sob. Ces événements ont entraîné la mort de deux personnes, laissé 30 habitants sans abri et provoqué l'effondrement de six habitations.

En 2006, de nouvelles inondations ont entraîné la destruction de plusieurs maisons, affectant 36 familles sinistrées, avec des pertes importantes en terres agricoles et une déstabilisation des versants.

La ville de M'sila est classée parmi les zones à haut risque d'inondation, notamment le long de l'oued K'sob et dans la zone d'extension urbaine proposée par le PDAU, selon les rapports de l'agence URBAS de M'sila (1994 et 2015).

Ce phénomène s'est répété à plusieurs reprises : entre 1994 et 2025, plus de vingt cas d'inondations ont été enregistrés, causant d'importants dégâts humains et matériels, en particulier sur les habitations et les infrastructures urbaines

Les inondations les plus importantes de M'sila seront présentées dans le tableau suivant :

Table 3: Dommages causés par les inondations dans la wilaya de M'sila

Années	Pertes humaines	Dégâts matériels	Conséquences majeures
1982	2 morts	6 maisons effondrées	30 personnes sans-abri, première catastrophe majeure
1994	blessés	Destructions importantes	Quartiers entiers inondés, évacuations massives
2006	-	Destructions massives	36 familles sinistrées, terres agricoles perdues
2012	1 mort	Habitations détruites	Paralysie du centre-ville, routes coupées
2019	Plusieurs blessés	Infrastructure endommagée	Écoles et hôpitaux touchés, coupures d'électricité
2023	-	Dégâts considérables	Nouveaux quartiers inondés, commerces détruits

Les SIG (Systèmes d'Information Géographique) :

Sont des outils informatiques qui permettent de collecter, stocker, analyser et visualiser des données géographiques ou spatiales.

Un SIG combine une base de données avec des cartes numériques pour créer des représentations interactives du territoire. Il associe des informations descriptives (attributs) à des objets géographiques localisés dans l'espace.

Composants principaux:

Données spatiales : Points, lignes, polygones représentant des éléments géographiques (routes, bâtiments, parcelles, cours d'eau)

Données attributaires : Informations descriptives liées aux objets spatiaux (population, surface, type de végétation)

Logiciels : Applications permettant la manipulation et l'analyse (ArcGIS, QGIS, MapInfo)

Matériel : Ordinateurs, GPS, scanners, imprimantes

Les SIG permettent de réaliser des analyses spatiales complexes comme le calcul de distances, la superposition de couches thématiques, la modélisation de phénomènes géographiques, ou encore la création de zones tampons autour d'objets.

Applications courantes:

Aménagement du territoire : Planification urbaine, zonage

Environnement : Gestion des ressources naturelles, études d'impact

Transport : Optimisation d'itinéraires, gestion de réseaux

Agriculture : Agriculture de précision, gestion parcellaire

Sécurité publique : Gestion des risques, intervention d'urgence

Les SIG sont devenus indispensables dans de nombreux domaines grâce à leur capacité à révéler des relations spatiales invisibles et à faciliter la prise de décision basée sur l'analyse territoriale.

Les logiciels HEC-RAS et HEC-HMS : sont deux outils de modélisation hydrologique développés par le Hydrologic Engineering Center (HEC) du Corps des Ingénieurs de l'Armée américaine.

HEC-RAS (River Analysis System)

HEC-RAS est un logiciel de modélisation hydraulique unidimensionnelle pour l'analyse des écoulements dans les cours d'eau.

Fonctionnalités principales :

Calcul des profils de surface libre en régime permanent et transitoire

Modélisation des écoulements graduellement variés

Analyse du transport sédimentaire

Simulation de la propagation des crues

Calcul des zones inondables

Applications typiques :

Cartographie des zones d'aléa inondation

Dimensionnement d'ouvrages hydrauliques (ponts, barrages)

Études d'impact des aménagements sur les écoulements

Gestion des risques d'inondation

HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)

HEC-HMS est un logiciel de modélisation hydrologique qui simule la transformation pluie-débit sur un bassin versant.

Fonctionnalités principales :

Modélisation des processus hydrologiques (infiltration, ruissellement, évapotranspiration)

Intégration de différentes méthodes (SCS, Green-Ampt, etc.)

Propagation des hydrogrammes dans le réseau hydrographique

Simulation en continu ou événementielle

Applications typiques :

Prévision des crues

Dimensionnement des ouvrages de protection

Gestion des ressources en eau

Études d'impact climatique

Complémentarité

Ces deux logiciels sont souvent utilisés conjointement : HEC-HMS pour calculer les débits entrants dans le système, et HEC-RAS pour analyser la propagation de ces débits dans les cours d'eau et déterminer les niveaux d'eau correspondants.

Le SCS (Soil Conservation Service)

Le SCS est une méthode hydrologique développée par le Service de Conservation des Sols américain (maintenant appelé NRCS - Natural Resources Conservation Service) pour calculer le ruissellement de surface à partir des précipitations.

Principe fondamental

La méthode SCS estime quelle portion de la pluie va ruisseler versus s'infiltrer dans le sol, basée sur une équation simple :

$$Q = (P - I_a)^2 / (P - I_a + S)$$

Où :

- Q = ruissellement (mm)
- P = précipitation totale (mm)
- I_a = pertes initiales (mm)
- S = rétention potentielle maximale du sol (mm)

Le Curve Number (CN)

Le cœur de la méthode est le numéro de courbe (CN), une valeur entre 0 et 100 qui caractérise

le potentiel de ruissellement :

- CN proche de 0 = sol très perméable (peu de ruissellement)
- CN proche de 100 = surface imperméable (ruissellement maximal)

Le CN dépend de :

- Type de sol (groupes A, B, C, D selon la perméabilité)
- Occupation du sol (forêt, prairie, urban, etc.)
- Conditions d'humidité antécédentes

Avantages

- Méthode simple et rapide
- Largement validée et standardisée
- Bien adaptée aux SIG
- Tables de CN disponibles pour différents contextes
- Utilisable avec des données limitées

Cette méthode reste un outil de référence en hydrologie urbaine et rurale pour l'évaluation des débits de crue et la gestion des eaux pluviales.

Conclusion :

Cette partie du travail a été consacrée aux théories, nous avons essayé de décortiquer les éléments et les concepts de bases nécessaires à la compréhension des notions générales dans notre recherche. Nous avons abordé certains termes tels que les risques, la préparation, la vulnérabilité, l'innovation, la crise... etc.

À travers cette étude théorique, nous avons pu établir les fondements conceptuels nécessaires pour notre sujet de recherche, ce qui contribue à construire une compréhension globale et intégrée de la problématique posée.

Chapitre II

Analyse des composants du Milieu Physique

- 1 Présentation de la zone d'étude**
- 2 Présentation du cadre physique du sous-bassin
hydrographique du Ksob**
- 3 Caractérisation géométrique et
morphométrique du sous-bassin
hydrographique du Ksob**
- 4 Conclusion**

INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre vise à analyser le milieu physique afin de déterminer les éléments déterminants qui influencent les aptitudes naturelles et les limitations environnementales du territoire du bassin versant.

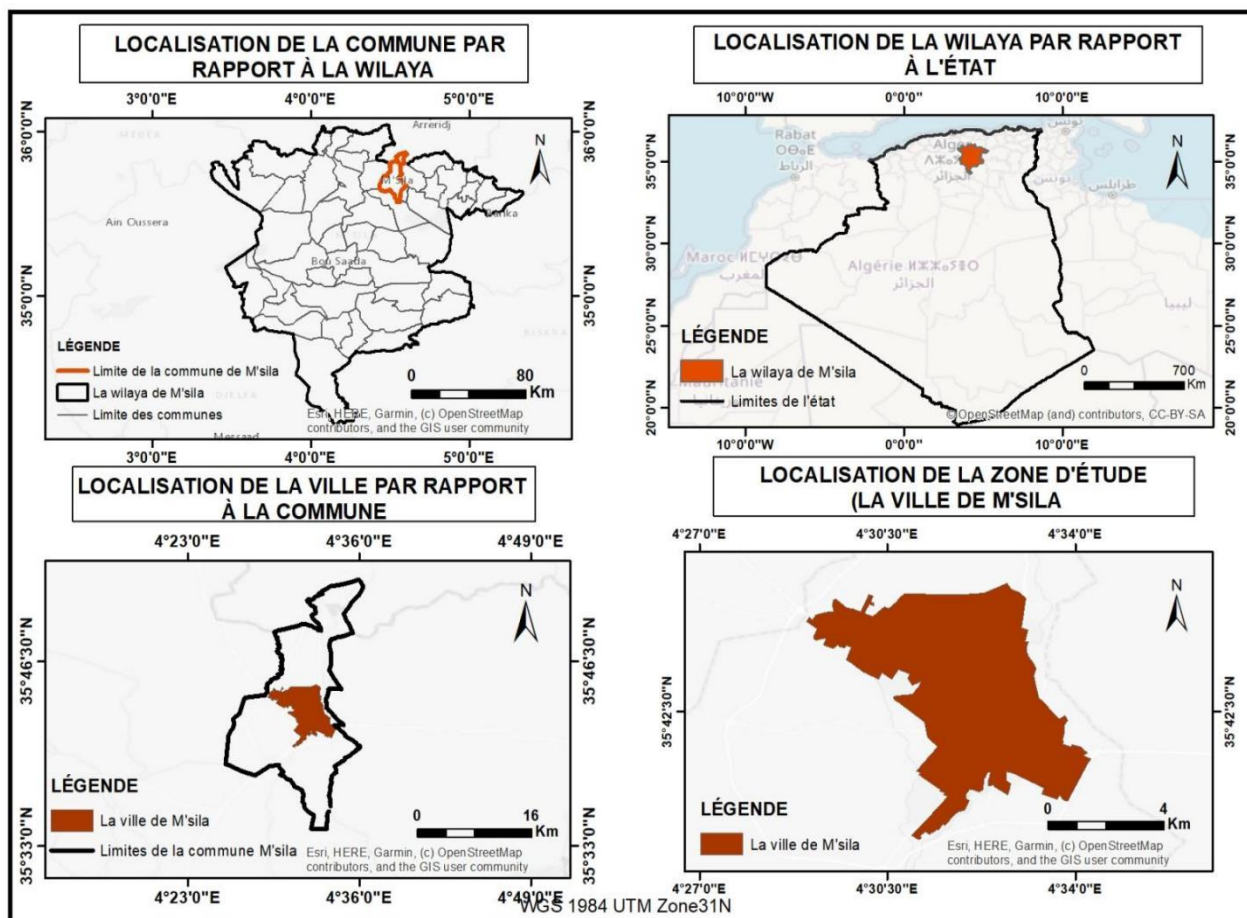
1. Présentation de la zone d'étude :**1.1. Localisation de la zone d'étude :**

La ville de M'sila est située au Sud-Est de la capitale Alger à une distance de 256 kilomètres, et occupe une position stratégique dans la partie Nord-Est de la wilaya. La commune de M'sila s'étend sur une superficie totale de 252 kilomètres carrés, ce qui en fait une commune de taille moyenne dans la région. La ville appartient géographiquement à la plaine hodnaïenne qui s'inscrit dans le cadre géographique du bassin versant n° 05 du Hodna, ce qui lui confère des caractéristiques climatiques et hydrologiques particulières.

La position astronomique de la ville de M'sila est déterminée par les coordonnées géographiques précises de 35° 42' 20" de latitude Nord et 4° 32' 30" de longitude Est, ce qui la situe dans une position intermédiaire entre les régions septentrionales et méridionales du pays.

Du point de vue administratif, les limites de la commune de M'sila sont clairement définies. Elle est délimitée au Nord par la commune d'El Euch relevant de la wilaya de Bordj Bou Arreridj, à l'Est par la commune de M'tarfa, à l'Ouest par la commune d'Ouled Mansour, au Sud par la commune d'Ouled Madhi, tandis qu'elle est bordée au Sud-Est par la commune d'El Souamaa.

La ville de M'sila se positionne dans un cadre topographique diversifié et complexe, où elle est entourée de formations montagneuses différentes. Elle est délimitée au Nord par les monts du Hodna qui constituent une barrière naturelle importante, tandis qu'au Sud et au Sud-Ouest apparaissent les premiers chaînons de l'Atlas saharien. Du côté oriental, les deux chaînes montagneuses se rencontrent dans la région des monts de Belezma aux coordonnées géométriques 4° 45' Est et 5° 45' Est. Cette position géographique remarquable fait de la ville de M'sila un point de convergence vital entre différentes régions naturelles, lui conférant une importance stratégique aux niveaux régional et national

Carte 1 : localisation de la wilaya, la commune et la ville de M'sila

1.2. Aperçu générale sur le bassin versant du Hodna :

Le bassin versant du Hodna, avec une superficie de drainage de 26 000 km², constitue le cinquième bassin hydrographique d'Algérie par sa taille. Il s'agit d'un bassin endoréique situé à environ 150 km au Sud de la côte méditerranéenne (Golfe de Béjaïa). La topographie du bassin présente des altitudes variables : les sommets diminuent d'Est en Ouest, oscillant entre 1900 et 1000 m au Nord, tandis qu'au Sud, seuls quelques reliefs de l'Atlas saharien atteignent 1200 m d'altitude.

La position géographique de ce bassin, encadré par deux ensembles montagneux au Nord et au Sud, lui confère une configuration endoréique organisée autour d'une dépression quasi-plane située à 400 m d'altitude. Au centre de cette région s'étend le lac salé asséché appelé "Chott El Hodna" (1150 km²), qui constitue l'exutoire naturel recevant l'ensemble des écoulements en eau et en sédiments du bassin.

Selon l'Agence nationale des ressources hydriques (ANRH), le bassin versant du Hodna peut être subdivisé en 23 sous-bassins, le 24^{ème} élément central étant le Chott El Hodna lui-même. Cependant, ces sous-bassins peuvent être regroupés en **8 sous-bassins hydrographiques** principaux, caractérisés par le même talweg principal ou les mêmes exutoires.

2. Présentation de sous-bassin hydrographique du Ksob :

Le bassin versant de l'oued K'sob constitue une unité hydrographique secondaire (N°09) rattachée au bassin principal de la Hodna (N°05), selon la classification de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH). Pour approfondir les caractéristiques de ce bassin, il s'étend sur une superficie de 1 717,41 km² avec un périmètre de 282,825 km. Ces paramètres ont été déterminés par des méthodes de numérisation et d'analyse spatiale via le logiciel ArcGIS 10.8 garantissant ainsi la précision des résultats.

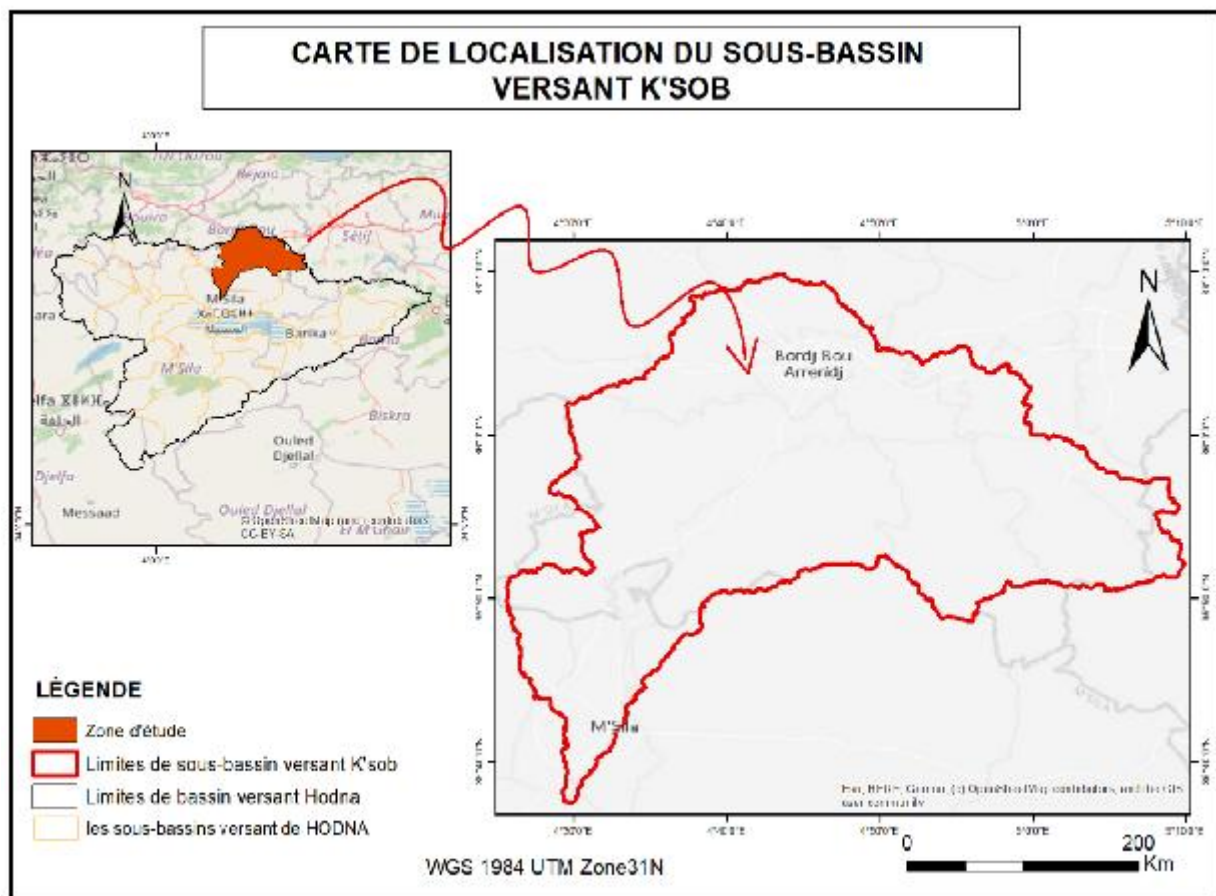
D'un point de vue géographique, ce système hydrographique est situé entre 4°30' et 5°17' de longitude Est et 35°45' à 36°9' de latitude Nord. Ses limites naturelles s'articulent autour de trois axes principaux : au Nord et Nord-Ouest par la chaîne des Bibans, au Sud et Sud-Ouest par les monts de la Hodna, tandis que les hautes plaines de Sétif bordent sa partie orientale.

En ce qui concerne ses caractéristiques morpho structurales, ce bassin versant présente deux unités principales distinctes. Premièrement, les zones montagneuses se subdivisant elles-mêmes en deux ensembles : au Sud, la chaîne de la Hodna (orientation Est-Ouest) avec des sommets imposants comme le djebel Maâdid (1 819 m) ; au Nord, les Bibans (orientation Sud-Ouest/Nord-Est) incluant le djebel Moutan. Deuxièmement, les plaines intérieures représentées par les hautes plaines de Bordj Bou Arreridj formant une zone transitionnelle entre ces reliefs contrastés.

D'un point de vue géologique, l'analyse de la structure de ce bassin révèle une complexité notable, avec une diversité de formations sédimentaires comprenant calcaires, grès, schistes, formations marno-calcaires et dolomitiques, ainsi que des dépôts triasiques qui ajoutent une dimension historique importante.

Dans le cadre de l'étude morphométrique exhaustive de ce système hydrographique, l'accent a été mis sur plusieurs axes majeurs : les paramètres dimensionnels de base (superficie, périmètre), les caractéristiques de forme (coefficient de compacité), l'organisation du réseau hydrographique (densité de drainage, ordre des cours d'eau), sans négliger les paramètres de pente (moyenne du bassin et du cours principal).

Carte 2 : la localisation du sous-bassin versant Oued K'sob



2.1. Aperçu général sur la géologie du Ksob :

La géologie joue un rôle fondamental dans le contrôle à la fois de l'écoulement des eaux souterraines et du ruissellement des eaux de surface. Dans le cadre des études hydrologiques, l'analyse géologique d'un bassin versant revêt une importance particulière, car elle vise principalement à déterminer le degré de perméabilité des formations lithologiques.

Cette perméabilité influence directement la rapidité de formation des crues, le volume des écoulements, ainsi que l'aggravation du phénomène d'inondation. Les **caractéristiques lithologiques** (nature des roches) et la **structure tectonique** constituent ainsi les principaux facteurs géologiques à analyser dans ce contexte.

2.2. Description litho stratigraphique du bassin versant :

L'analyse des formations géologiques du bassin versant de Oued Ksob, révèle une superposition de couches sédimentaires allant du **Crétacé** (le plus ancien) au **Quaternaire** (le plus récent). Cette succession témoigne de l'évolution géodynamique de la région en lien avec les grands événements géologiques ayant affecté le domaine de l'Atlas saharien. L'ordre de présentation suivant respecte la chronologie géologique.

Le Crétacé:

Les formations crétacées constituent les couches rocheuses les plus anciennes de la région. Le Crétacé supérieur occupe une large extension dans le sous-bassin de l'oued Ksob, tandis que le Crétacé inférieur est principalement formé de roches sédimentaires carbonatées, interstratifiées avec des bancs sableux.

Ces formations présentent des variations importantes en termes d'épaisseur et de faciès. Les affleurements se concentrent dans les zones centrales et sur les flancs des anticlinaux, notamment dans les parties Nord et Sud de la chaîne des monts du Hodna.

Le Tertiaire (Néogène):

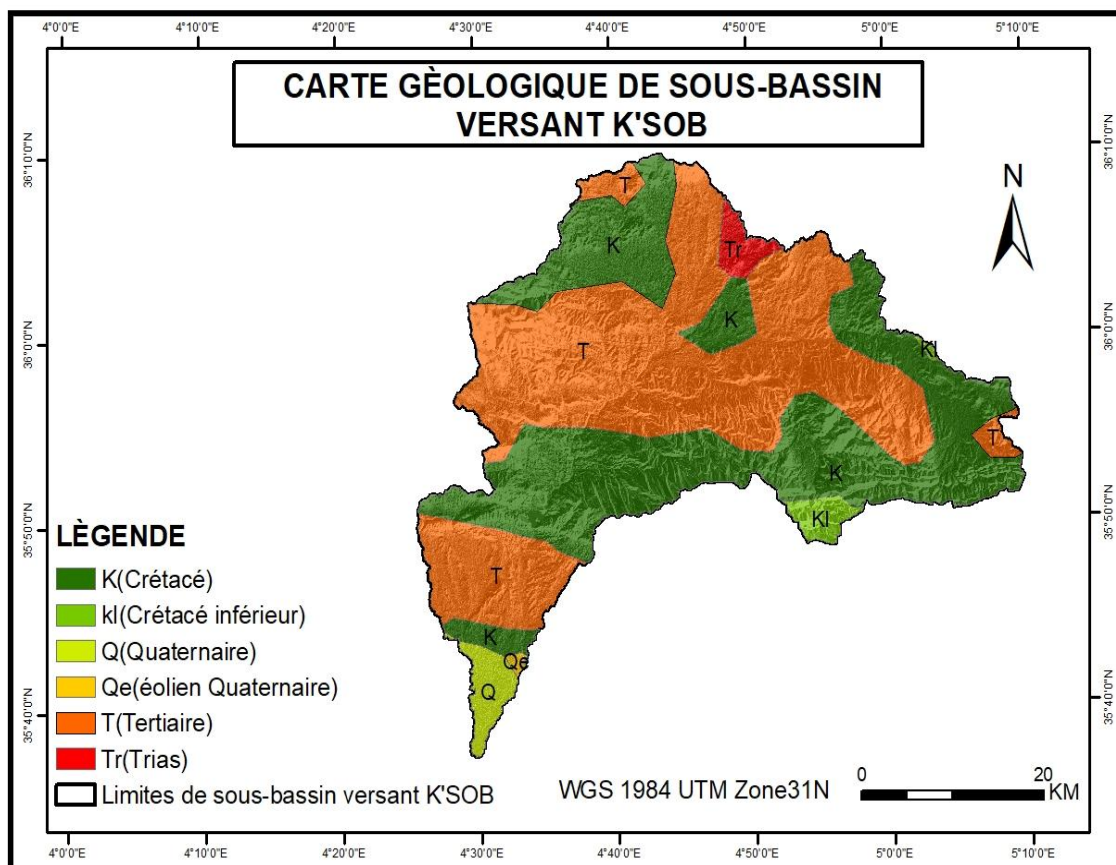
Les formations continentales néogènes apparaissent nettement dans la région, où elles se déposent en discordance sur les séries crétacées, conséquence des épisodes d'érosion liés à la surrection de l'Atlas saharien. Ces formations sont bien développées à l'est et au nord de la ville de Boussaâda, ainsi que dans la partie occidentale du Chott El Hodna. Elles se caractérisent par une grande variété de roches sédimentaires: conglomérats, galets, sables, grès et marnes.

Le Quaternaire:

Les dépôts quaternaires recouvrent de vastes surfaces du bassin versant, notamment au niveau de la dépression de Medjana, des zones de Ras El Oued et de Bordj Ghdir, ainsi que dans la plaine du Hodna. Ces formations, d'origine alluviale ou lacustre, se composent de matériaux meubles variés tels que les graviers, les sables calcaires et les argiles. Les dépôts quaternaires récents forment des nappes de graviers et de sables locaux, couvrant environ 29 % de la

superficie du sous-bassin étudié, en particulier le long des lits des oueds principaux comme l'oued Ksob.

Carte 3: Carte géologique du sous-bassin versant K'sob



2.3. Caractéristiques lithologiques et taux de perméabilité :

Roches à faible perméabilité :

Les roches à faible perméabilité comprennent divers types de roches argileuses et calcaires comme les marnes, les marno-calcaires et les sols argileux. Ces formations sont bien visibles dans les couches marno-calcaires du Turonien et du Miocène, ainsi que dans certains recouvrements quaternaires comme les sols forestiers.

Ces roches se caractérisent par un faible taux d'infiltration, ne dépassant pas 10% des précipitations, et pouvant atteindre 12-23% dans certains types de sols à texture moyenne.

Roches à perméabilité moyenne

Cette catégorie inclut une variété de roches calcaires et dolomitiques, notamment les calcaires du Cénomanien supérieur, les formations dolomitiques et les marnes du Miocène. Ces roches présentent une densité élevée et une forte cohésion, avec quelques cavités rares contenant des minéraux ferrugineux pouvant localement augmenter leur capacité à transmettre l'eau.

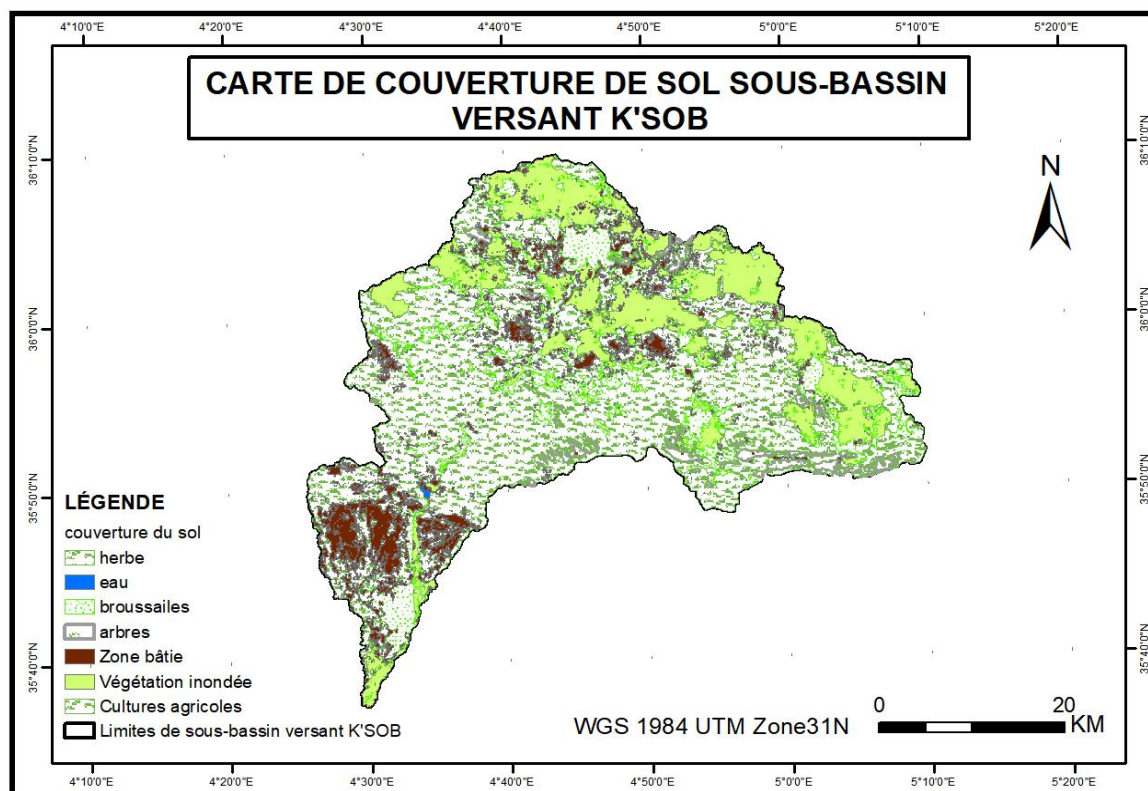
Roches à haute perméabilité

Ce groupe représente les formations les plus perméables de la région, comprenant principalement les conglomérats et les brèches du Miocène marin, caractérisés par d'importants vides entre leurs éléments grossiers cimentés par une matrice calcaire fine. Il inclut également les grès calcaires très vacuolaires et les dépôts quaternaires peu consolidés, composés d'un mélange de débris calcaires et dolomitiques de tailles variées, associés à des couches de limon sableux et de graviers verts. Ces formations sont particulièrement concentrées dans la région de Ain Hadjel et ses environs.

2.4. Le couvert végétal :

Le bassin versant de Ksob, présente une couverture végétale caractérisée par une grande diversité écologique, intégrant à la fois des composantes naturelles et anthropiques. On y trouve principalement des formations arborées denses et des zones broussailleuses, qui assurent des fonctions écologiques essentielles telles que la stabilisation des sols et la régulation du ruissellement superficiel. Ce contexte naturel est complété par la présence de plans d'eau permanents et saisonniers, qui structurent le système hydrologique local, ainsi que par des zones de végétation inondée, témoignant de la possible existence de zones humides ou de secteurs inondables saisonniers.

En parallèle, l'activité humaine se manifeste clairement par l'expansion des zones urbanisées et l'extension des surfaces agricoles, exerçant une pression anthropique croissante sur les ressources naturelles. Les données disponibles suggèrent une dégradation progressive de la couverture végétale sous l'effet de ces pressions, entraînant des modifications notables des propriétés hydrologiques du bassin versant.

Carte 4:carte de couverture de sol sous-bassin versant K'sob

3. Les caractéristiques géométriques et morpho-métriques du sous-bassin hydrographique du K'sob

Le bassin versant en une section d'un cours d'eau est défini comme la surface drainée par ce cours d'eau et ses affluents en amont de la section. Tout écoulement prenant naissance à l'intérieur de cette surface doit donc traverser la section considérée, appelée exutoire, pour poursuivre son trajet vers l'aval, Selon la nature des terrains nous devons utiliser des caractéristiques morphométriques dans le but de condenser en un certain nombre de paramètres chiffrés, la fonction $h = f(x, y)$ à l'intérieur du bassin versant (h altitude, x et y coordonnées d'un point du bassin versant). Dans notre étude nous allons définir les caractéristiques du sous-bassin hydrographique Ksob

3.1. Les caractéristiques de géométries

3.1.1. La surface et le périmètre :

La surface du bassin versant peut-être mesurée par des techniques de digitalisation et limitation.

La surface du sous-bassin Ksob : $A = 1717,41 \text{ km}^2$.

Le périmètre du sous-bassin Ksob : $P = 282,825 \text{ km}$

3.1.2. Indice de forme ou indice de compacité

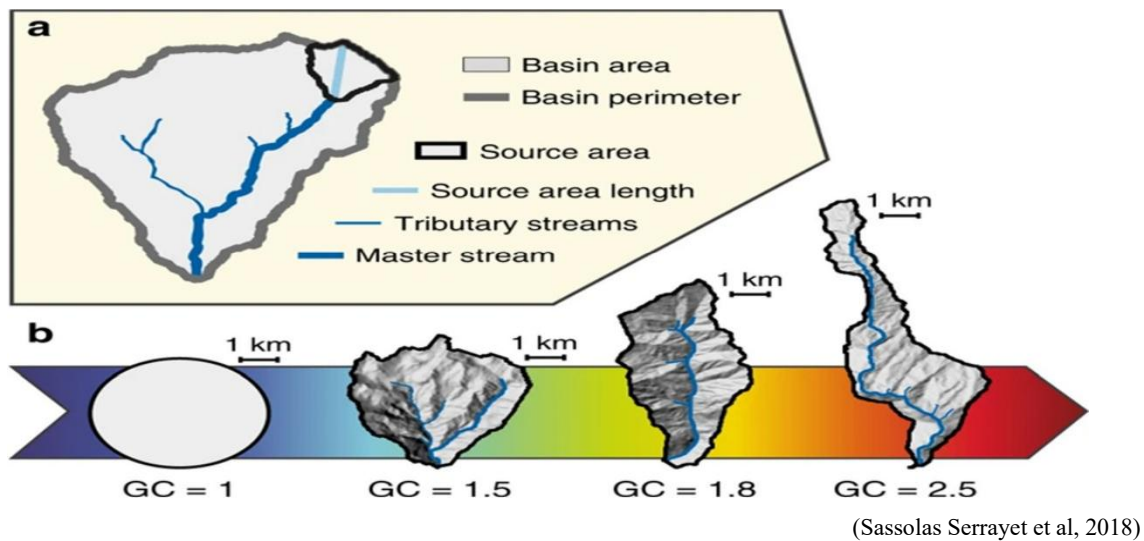
Gravelius :

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

$$K_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$$

Cet indice est proche de 1 pour un bassin versant de forme quasiment circulaire et supérieure à 1 lorsque le bassin est de forme allongée.

Figure 11: La variation de l'indice de Gravelius en fonction de la forme du bassin



Le coefficient de Gravelius estimé pour le bassin de l'Oued K'sob, indique une forme très allongée avec un $K_c = 1.91$,

Cette forme induit de faibles débits de pointe de crue et un temps de concentration lent.

3.1.3. Le rectangle équivalent de Gravelius :

Cette notion a été introduite pour pouvoir comparer des bassins

$$L = \frac{K_c \times \sqrt{A}}{1,12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

$$l = \frac{K_c \times \sqrt{A}}{1,12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_c} \right)^2} \right)$$

entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

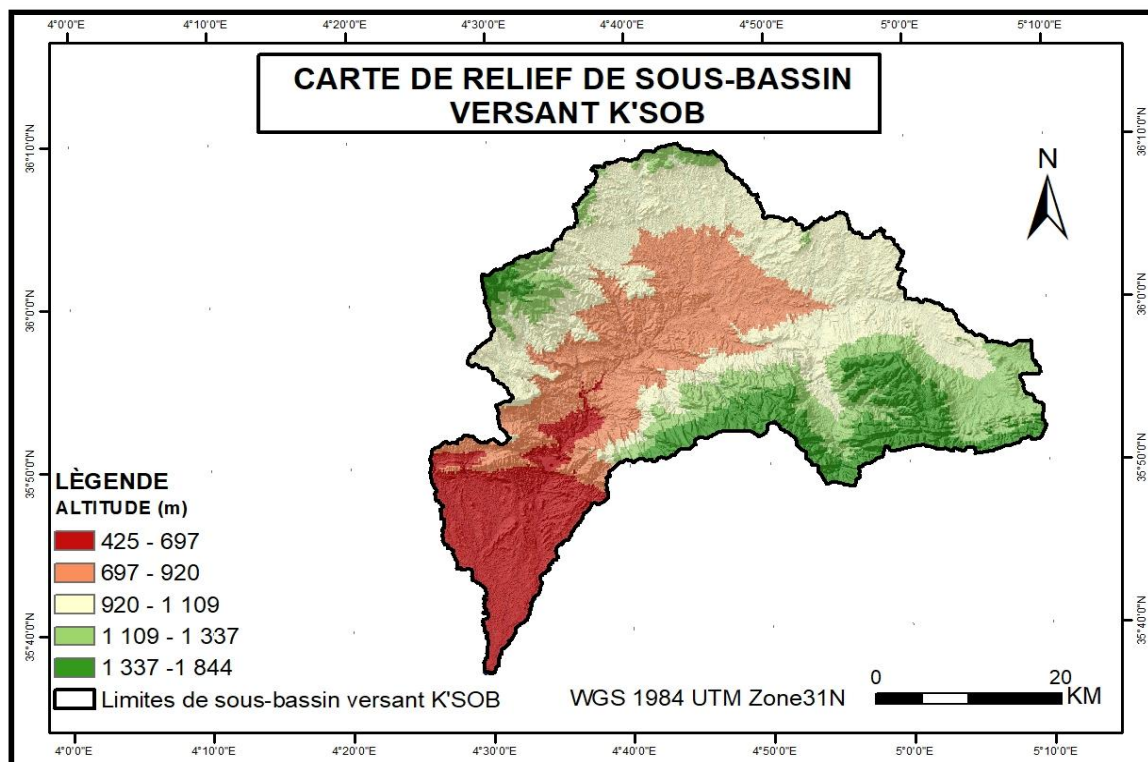
Soit L et I la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant.

Donc $L = 129.9\text{Km}$ et $I = 13.35\text{Km}$

3.2. Etude Orographique :

Le relief joue un rôle central dans l'organisation de l'écoulement des eaux au sein des bassins versants. Il influence directement plusieurs facteurs hydrométéorologiques, tels que la répartition des précipitations et les températures, qui varient en fonction de l'altitude. De plus, la pente du terrain détermine en grande partie la vitesse d'écoulement des eaux de surface, ce qui affecte le comportement hydrologique du bassin, notamment lors des épisodes pluvieux ou des crues.

Carte 5: Carte de relief de sous-bassin versant K'sob

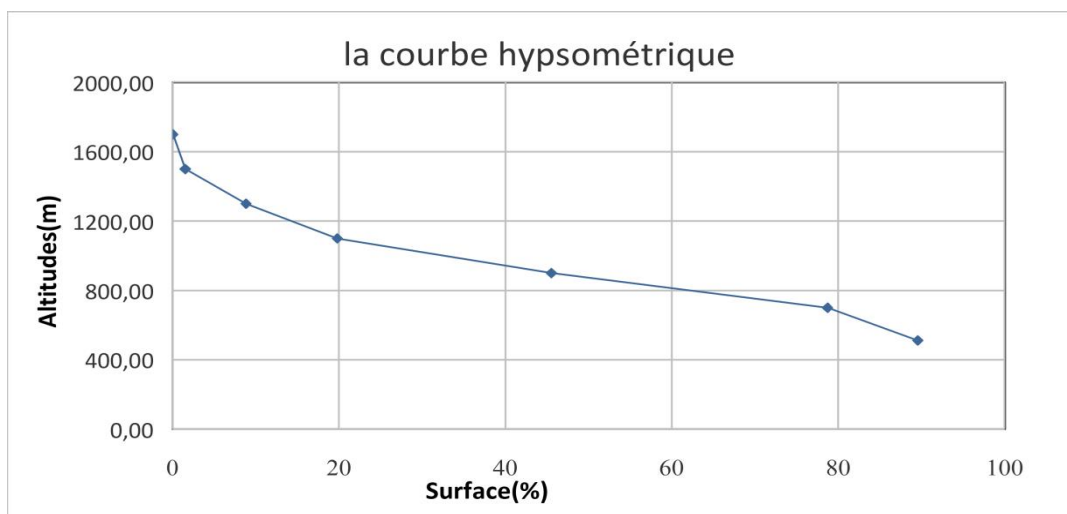


3.2.1. La courbe hypsométrique :

Parmi les outils utilisés pour analyser l'effet du relief, la courbe hypsométrique constitue un indicateur pertinent. Elle met en évidence la relation entre la superficie et l'altitude à l'intérieur du bassin, et permet de mieux comprendre la répartition du relief. Les variations altimétriques contribuent de manière significative à définir le schéma général de l'écoulement, faisant ainsi des caractéristiques topographiques un élément fondamental dans l'étude de la dynamique des bassins versants.

La courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued Ksob présente une forme globalement concave, ce qui traduit un état de maturité géomorphologique du bassin. Cette configuration indique que la majeure partie de la surface se situe à des altitudes moyennes à basses, ce qui peut engendrer un écoulement de surface relativement lent et une réponse hydrologique moins brutale lors des épisodes pluvieux.

Figure 12 : Courbe hypsométrique de sous-bassin versant de l'Oued K'sob



3.2.2. Les altitudes caractéristiques :

L'Altitude maximale d'un bassin versant représente la plus haute altitude au-dessus du niveau de la mer. Tandis que l'altitude minimale considère comme le point le plus bas, généralement l'exutoire.

L'altitude maximale $H_{max} = 1844$ m.

L'Altitude Minimale $H_{min} = 425$ m.

L'altitude moyenne :

L'altitude moyenne se déduit directement de la courbe hypsométrique ou de la lecture d'une carte topographique. On peut la définir comme suit :

Avec :

$$H_{moy} = \frac{\sum(A_i \times H_i)}{A}$$

Hmoy : altitude moyenne du bassin [m]

Ai : aire comprise entre deux courbes de niveau [km²]

hi : altitude moyenne entre deux courbes de niveau [m]

A : superficie totale du bassin versant [km²].

Table 4: Calcul de l'altitude moyenne

Altitudes (m)	Hi(m)	Ai(Km ²)	(Hi*Ai)
422-600	511	179,01	91474
600-800	700	186,14	130299
800-1000	900	570,32	513287
1000-1200	1100	441,61	485768
1200-1400	1300	188,61	245196
1400-1600	1500	125,36	188038
1600-1800	1700	25,35	43102
1800-1867	1833,5	1,01	1861
Somme		1717,42	1699024

H_{moy} du sous-bassin versant Ksob est : 989.28m

L'altitude médiane :

L'altitude médiane correspond à l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin, sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne, dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin concerné présente une pente régulière. **H₅₀ % = 973 m**

3.2.3. L'indice global de pente :

L'indice global de pente est un paramètre morphométrique qui permet de caractériser la déclivité générale d'un bassin versant à partir de sa courbe hypsométrique. Il se base sur la différence d'altitude entre les fractiles 5 % ($H_5\%$) et 95 % ($H_{95}\%$) de cette courbe, et est exprimé en mètres par kilomètre (m/km).

a. Dénivelée simple (D)

La dénivelée simple est définie comme la différence entre les altitudes $H_5\%$ et $H_{95}\%$:

$$D = H_5\% - H_{95}\%$$

À partir des données altimétriques du bassin, les valeurs suivantes ont été estimées par interpolation linéaire : $H_5\% = 1505$ m et $H_{95}\% = 507$ m. Donc : $D = 998$ m

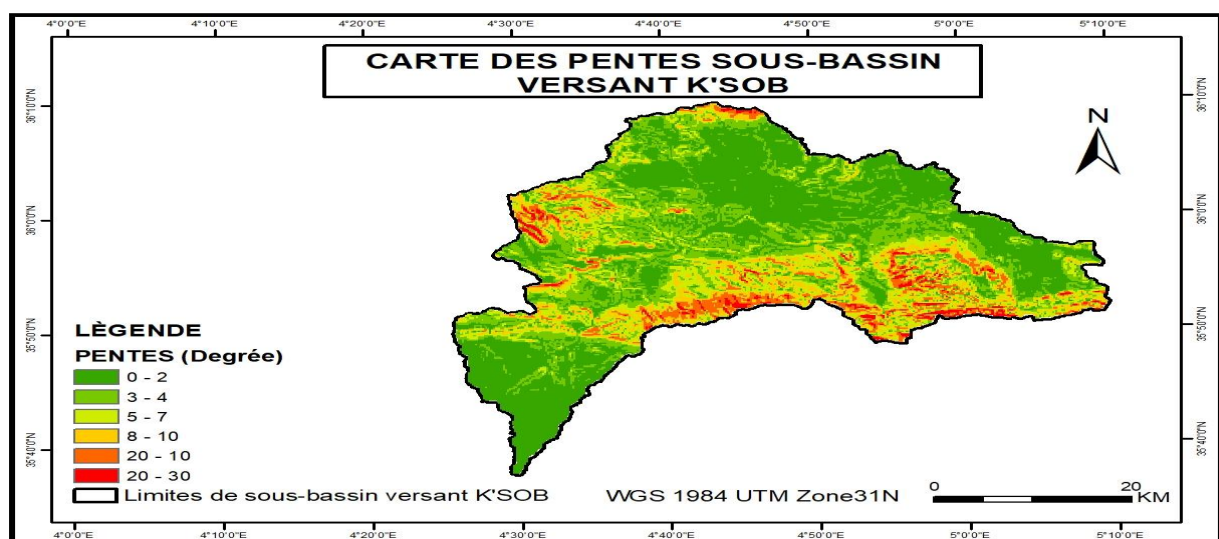
b. Calcul de l'indice global de pente (I_g)

L'indice global de pente est ensuite obtenu par le rapport entre la dénivelée simple D et la longueur du rectangle équivalent L, représentative de la longueur du bassin versant. La

formule est la suivante : $I_g = \frac{D}{L}$

Alors : I_g du sous-bassin versant K'sob est: 7.80m

Carte 6:carte des pentes de sous-bassin versant K'sob



Cette carte indique que le sous-bassin versant de l'Oued Ksob est caractérisé par une prédominance de faibles pentes, notamment dans les zones centrales et méridionales, ce qui favorise l'infiltration de l'eau et un écoulement lent. En revanche, des zones à fortes pentes, localisées principalement au Nord-Ouest et au Sud-est, induisent un écoulement de surface plus rapide. Cela reflète une dynamique hydrologique contrastée au sein du bassin.

3.2.4. La pente moyenne d'un cours d'eau

La pente moyenne d'un cours d'eau constitue un facteur clé dans la détermination de la vitesse d'écoulement vers l'exutoire, influençant directement le temps de concentration et le débit maximal. Une pente accentuée entraîne un ruissellement plus rapide, tandis qu'une pente faible favorise l'infiltration d'une partie importante de l'eau dans le sol.

Cette pente est généralement calculée en divisant la différence d'altitude entre la source et l'exutoire par la longueur totale du cours d'eau, à partir de son profil longitudinal.

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

ΔH : dénivellation maximale de la rivière [m]

$$P_{moy} = \frac{\Delta H_{max}}{L}$$

L : longueur du cours d'eau principal [km].

$P_{moy}=23,12$ m/km, ce qui reflète une déclivité topographique marquée favorisant l'écoulement rapide des eaux de surface, notamment lors des épisodes pluvieux intenses.

Dénivelé spécifique (Ds) :

Elle sert à la classification du bassin versant, calculée par la formule suivante :

$$Ds = I_g * \sqrt{A} \quad , Ds=323,31$$

Table 5: Classification du relief selon LORSTOM

Classe	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Ds	10	10 -25	25 - 50	50 - 100	100 - 250	250 - 500	500+
Type de Relief	Relier très faible	Relief faible	Relief assez faible	Relief modéré	Relief assez fort	Relief fort	Relief très fort

Ds du sous-bassin versant Ksob = **323.31** donc ce sous-bassin présente un **relief fort**

3.3. Paramètres morphométriques

3.3.1. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique constitue un élément fondamental dans l'étude morphométrique d'un bassin-versant. Il peut présenter différentes configurations selon plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Les principales influences sur la forme et la densité du réseau sont :

La géologie : la nature du substratum, selon sa résistance à l'érosion, conditionne le développement et la structure du réseau.

Le climat : dans les régions montagneuses et humides, le réseau est généralement dense, tandis qu'il devient très limité, voire inexistant, dans les zones arides.

La pente du terrain : elle joue un rôle dans le comportement des cours d'eau. Les fortes pentes favorisent l'érosion, alors que les terrains plats sont propices à la sédimentation.

L'activité humaine : les aménagements tels que les barrages, les canaux de drainage, l'endiguement ou la stabilisation des berges modifient fréquemment le tracé naturel du réseau.

Pour analyser le réseau hydrographique, il est essentiel de le représenter sur des cartes à échelle appropriée. L'imagerie satellitaire constitue un outil efficace pour cette démarche. Divers indicateurs morphométriques permettent ensuite de le décrire de manière quantitative.

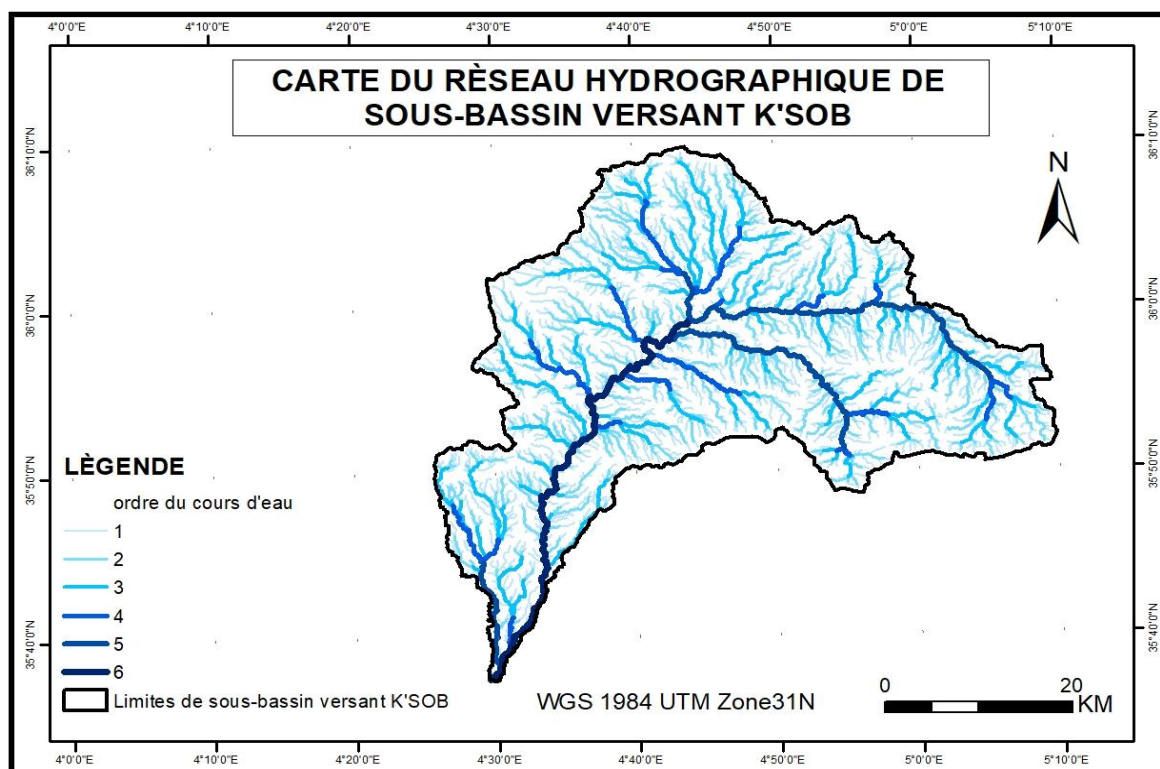
3.4. Hiérarchisation de réseau Hydrographique :

La topologie constitue un outil important dans la description du réseau hydrographique, notamment à travers la proposition d'une classification systématique des cours d'eau. Cette classification est facilitée par un système de numérotation des tronçons de cours d'eau, qu'il s'agisse du cours principal ou des affluents. Ces codifications sont également utilisées dans le traitement et l'analyse des données du réseau hydrographique.

Il existe plusieurs méthodes pour classer les tronçons des cours d'eau, et la classification de **Strehler (1957)** est l'une des plus utilisées et répandues. Cette classification permet de décrire avec précision le développement du réseau de drainage d'un bassin, depuis l'amont jusqu'à l'aval. Elle repose sur les règles suivantes:

- Tout cours d'eau ne possédant pas d'affluents est classé comme étant de premier ordre.
- Lorsque deux cours d'eau de rangs différents confluent, le tronçon résultant prend le rang le plus élevé des deux.
- Lorsque deux cours d'eau de même rang confluent, le rang du tronçon résultant est augmenté d'une unité.

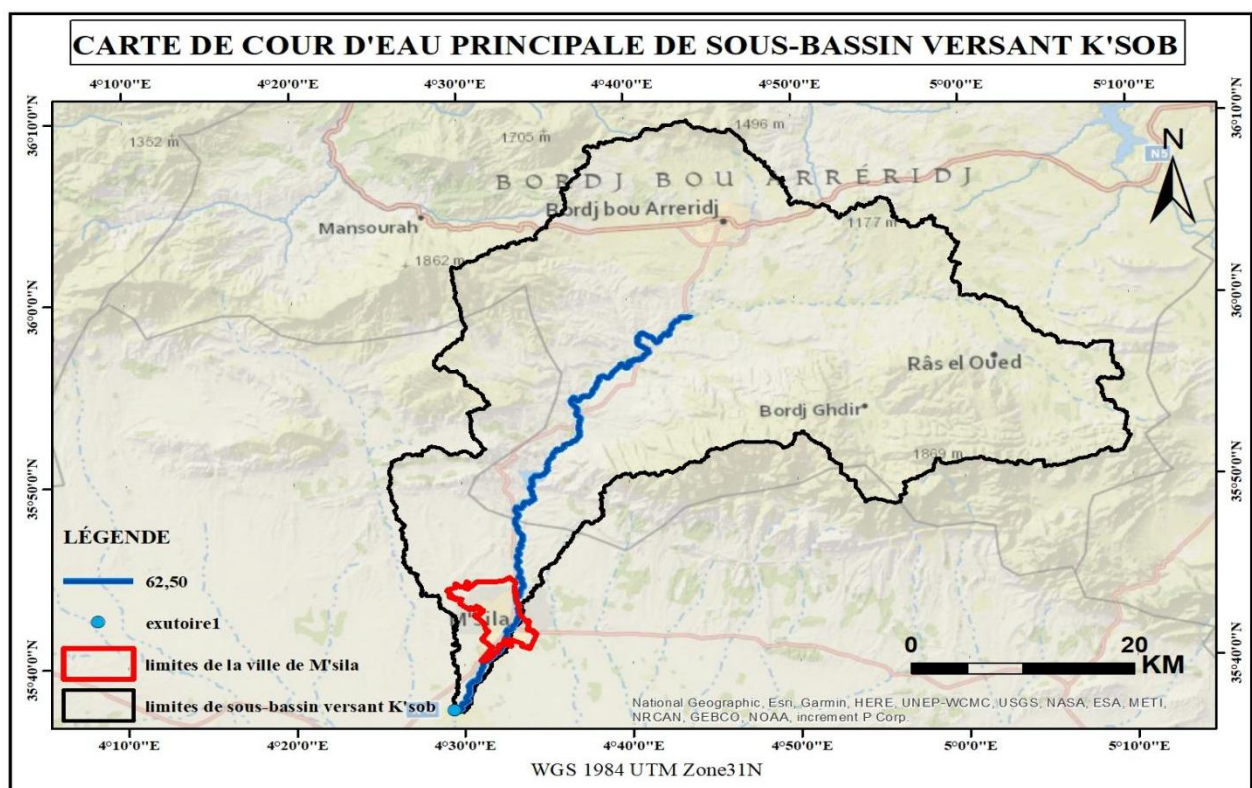
Carte 7 : Carte du réseau hydrographique de sous-bassin-versant K'sob



3.4.1. La longueur caractéristique des cours d'eau :

La longueur caractéristique d'un bassin versant correspond à la longueur du cours d'eau principal (L), mesurée comme la distance curviligne entre la ligne de partage des eaux et l'exutoire. Lorsqu'il existe des embranchements, on suit systématiquement le tronçon ayant l'ordre le plus élevé. En cas d'égalité d'ordre entre deux segments, celui qui draine la plus grande superficie est retenu. Pour le bassin versant du Ksob, cette longueur a été calculée à l'aide du logiciel ArcMap 10.8 et s'élève à **62.5 km**.

Carte 8 : Carte de cour d'eau du sous-bassin versant K'sob



3.4.2. La densité de drainage :

D'après Horton (1945), la densité de drainage est la longueur totale de tous les cours d'eau et rivières d'un versant divisée par la superficie totale du bassin de drainage. C'est une mesure de la qualité ou de la faiblesse du drainage d'un bassin versant par les canaux des cours d'eau.

Ce paramètre s'exprime par la formule suivante :

$$Dd = \frac{\sum Li}{A}$$

Dd: Densité de drainage [km/km²] ; Li: Longueur des cours d'eau [km]

A : surface du bassin versant [km²].

La densité de drainage dans le bassin versant de l'Oued K'sob est égale à 1.63km/km².

Ceci traduit que le bassin présente dans son ensemble une formation géologique perméable dont l'écoulement est plutôt limité et centralisé ainsi que l'infiltration est augmentée.

3.4.3. La densité hydrographique :

La densité hydrographique représente le nombre des cours d'eau par unité de surface.

Où :

$$F = \frac{\sum Ni}{A}$$

F : densité hydrographique [km⁻²]. Ni : nombre des cours d'eau.

A : superficie du bassin [km²]

Table 6: Calcul de la densité hydrographique

ordre	nombre d'ordre Ni	Densité hydrographique F
1	1883,00	1,09642
2	860,00	0,50075
3	544,00	0,31676
4	198,00	0,11529
5	43,00	0,02504
6	1,00	0,00058
totale	3529	2,05484

La densité hydrographique qui est égale à F=2.05 cours d'eau/km², indique une très forte densité de cours d'eau donc le bassin d'étude présente une région à Substrat peu perméable, à couvert végétal limité ou sols érodés et à relief peu accidenté.

3.4.4. Rapport de confluence

Sur la base de la classification des cours d'eau, (Horton 1932; Schumm 1956) ont établi cette loi :

$$R_c = \frac{N_i}{N_{i+1}}$$

Rc: Rapport de confluence des cours d'eau ; Ni: Nombre des cours d'eau d'ordre suivant ;
 N_{i+1} : Longueur des cours d'eau d'ordre suivant

Donc : $RC = 2.37$

Rapport des longueurs

Sur la base de la classification des cours d'eau, (Horton 1932; Schumm 1956) ont établi cette loi :

RL : Rapport des longueurs des cours d'eau.

$$R_L = \frac{L_i}{L_{i+1}}$$

i : Ordre d'un cours d'eau u varie entre 1 et n

L_i : Longueur moyenne des cours d'eau d'ordre i

Donc : $RL = 1,54$

Le rapport de confluence est un nombre exprimant le développement du réseau de drainage. Il varie suivant l'ordre considéré. C'est un élément important à considérer pour établir des corrélations d'une région à une autre. Selon Strahler (1964), le RC varie de 3 à 5 pour une région où la géologie n'a aucune influence.

La fréquence des cours d'eau :

Elle représente le rapport du nombre du cours d'eau d'ordre 1 à la surface du bassin versant d'étude. Donc : $F = 1.096$ cours d'eau/km²

Temps de concentration:

Le temps de concentration est défini comme étant la durée que met une goutte d'eau tombée à un point élevé du bassin versant, pour atteindre l'exutoire, il est exprimé par la formule suivante de Giandott :

A : Superficie du bassin [km²].

$$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

L : Longueur du thalweg principal [km].

Hmoy : Altitude moyenne [m]

Hmin : Altitude minimale [m].

La détermination du temps de concentration nous permettra de mieux connaître la réponse hydrologique du bassin ; le temps de concentration des eaux est non seulement fonction de la surface, mais aussi d'autres paramètres tels que la lithologie, la pluviométrie et le relief. D'après les résultats obtenus, le bassin versant de l'Oued El K'sob présente un temps de concentration de l'ordre : $T_c = 13.61$ heures.

Vitesse d'écoulement de l'eau :

Elle est donnée par l'expression suivante :

$$V_e = L_p / T_c$$

T_c : temps de concentration

L_p : longueur du cours d'eau principale Donc :

V_e du sous-bassin versant Ksob est : $V_e \approx 3,40 \text{ km/h}$ ou $0,944 \text{ m/s}$

Nous récapitulons les caractéristiques géométrique et morphométriques du bassin-versant de Ksob dans le suivant :

Table 7: Récapitulatif des paramètres géométrique et morphométrique

Caractéristiques Morphométrique Hydrographique	Valeurs
Surface	1445.7 km ²
Perimètre	282.825 km
Indice de compacité de Gravelius	1.91
L'altitude maximale	1867 m
L'altitude minimale	422 m
L'altitude moyenne	989.28 m
La dénivelée spécifique	323.31
Longueur du rectangle équivalent	129.9 km
Largeur du rectangle équivalent	13.35 km
Indice global de pente	7.80

Pente moyenne d'un cours d'eau principal	23.12 m/km
Densité de drainage Dd	1.63 km/km ²
La densité hydrographique : F	2.05 cours d'eau/km ²
Rapport de confluence des cours d'eau	2.37
Rapport des longueurs des cours d'eau	1.54
La fréquence des cours d'eau	1.096 cours d'eau/km ²
Temps de concentration	13.61 heures
Vitesse de l'écoulement de l'eau : Ve	3.40 km/h ou 0.944 m/s

Conclusion

L'analyse des composantes naturelles du bassin versant secondaire de l'oued El-Ksob a permis de mettre en évidence plusieurs caractéristiques fondamentales influençant son comportement hydrologique.

Sur le plan géomorphologie, le bassin présente une superficie de 1717,41 km² et un périmètre de 282,825 km, ce qui le classe parmi les bassins de taille moyenne. L'indice de forme de Gravelius (1,91) indique une forme allongée, favorable à un allongement du temps de concentration et donc à une réduction du risque de crues soudaines.

L'étude géologique a révélé une succession de formations allant du Crétacé au Quaternaire, en passant par le Trias. Cette diversité lithologique engendre une variabilité importante de la perméabilité, avec des terrains argileux peu perméables et des formations sablonneuses et graveleuses plus perméables, influençant ainsi les mécanismes d'infiltration et de ruissellement.

D'un point de vue topographique, le relief du bassin est contrasté, avec des altitudes comprises entre 422 m et 1867 m et une altitude moyenne de 989,28 m. L'indice de pente moyen (7,80 %) traduit un relief modérément incliné, tandis que la courbe hypsométrique concave reflète un état de maturité avancé du bassin.

Le réseau hydrographique, bien développé et ramifié, affiche une densité de drainage de 1,63 km/km² et une densité hydrographique de 2,05 cours d'eau/km². Ces valeurs traduisent une bonne efficacité du réseau, liée notamment à la faible perméabilité des roches et à la rareté du couvert végétal.

Enfin, le temps de concentration estimé à 13,61 heures, ainsi qu'une vitesse d'écoulement moyenne de 3,40 km/h, indiquent une réponse hydrologique modérément rapide, offrant un délai raisonnable pour la prévision et la gestion des crues.

En résumé, la connaissance fine des paramètres naturels du bassin constitue une base scientifique solide pour toute étude ultérieure sur les risques hydrologiques ou l'impact du changement climatique, et ouvre la voie à une modélisation plus fiable de son comportement hydrologique.

Chapitre III

Étude climatique et hydro climatique

- 1- Introduction**
- 2- Etude du régime thermique**
- 3- Etude de régime pluviométrique**
- 4- Synthèse climatique**
- 5- Etude Hydro-climatique**
- 6- Conclusion**

Introduction:

En complément des facteurs morphologiques et lithologiques précédemment étudiés, les conditions climatiques interviennent également de manière déterminante dans le comportement hydrologique des cours d'eau (Roche, 1963). Pour analyser de façon quantitative les différentes variables hydrologiques, il est indispensable de disposer de données spatio-temporelles relatives aux paramètres climatiques. Ce chapitre sera donc consacré à l'étude du climat du sous-bassin hydrographique de l'oued Ksob.

1. Climat et caractéristiques météorologiques:

Le climat constitue l'un des facteurs déterminants qui influencent la planification urbaine et l'orientation des axes de développement d'une ville. Il intervient de manière significative dans la conception architecturale des bâtiments, la structuration des infrastructures routières ainsi que dans l'aménagement des divers usages du sol. Ces composantes urbaines sont affectées, même indirectement, par des paramètres climatiques tels que la température, les vents, l'humidité et les précipitations.

Ainsi, une analyse climatique approfondie de la ville s'avère essentielle pour guider efficacement les choix de planification à venir, notamment dans les zones d'expansion urbaine. Cela suppose l'ajustement des modèles d'aménagement et de construction en fonction des spécificités climatiques, tout en prenant en considération la nature des matériaux utilisés, afin d'éviter la répétition des erreurs passées. Une telle démarche exige également un engagement ferme en faveur de la création d'un environnement urbain harmonieux, résilient et adapté aux contraintes naturelles.

Table 8: Les caractéristiques de la station de M'sila

Nom de la station	Code de la station	Type de la station	Les coordonnées géographiques		Altitude (m)	Période d'observation (Années)
			Latitude	Longitude		
M'sila	05 10 02	Météorologique	4° 30'E	35°40' N	441	1988-2022

1.1. Etude de régime thermique:

La température est un facteur essentiel qui influe considérablement sur les phénomènes d'expansion urbaine et les modes d'habitat.

L'analyse des températures moyennes, qu'elles soient mensuelles ou annuelles, revêt une importance capitale. Pour cette étude, nous nous appuyons sur les données de la station climatique de M'sila, couvrant une période homogène de 34 ans (1988-2022). Ces données révèlent les variations des températures moyennes mensuelles maximales, minimales et moyennes au fil des années.

Table 9 : Les moyennes mensuelles interannuelles des températures.

T (°C)	Les Mois												
	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	Moy
Min	0.5	1.2	4.6	9	14	19.5	24.3	24.6	20.9	15.3	6	3.1	12
Max	24.22	14.1	19.1	22.8	31.4	40.2	41	33.9	28.4	22.8	19.2	15.9	25.2
Moy	18.67	9.4	14.05	18.4	25.45	32.25	32.8	27.4	21.85	16.4	13.15	10.1	18.6

Source : Agence National de Ressource Hydriques (ANRH).

Figure 13 : les variations mensuelles des minimax, maximax et moyennes des températures de la station de M'sila.

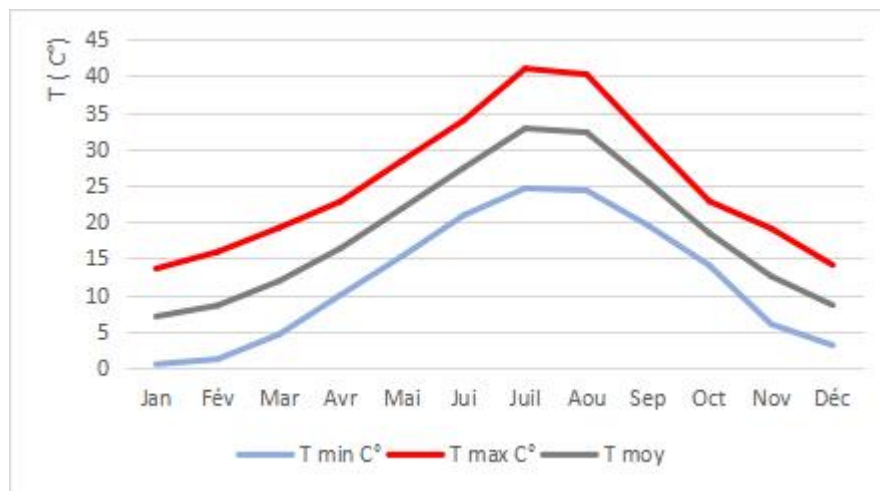


Fig. (13) permet de mettre en évidence les variations thermiques saisonnières, caractérisant le climat de la région étudiée.

1.1.1 Températures minimales:

Les mois les plus froids sont janvier et février, avec des températures minimales de respectivement 0,5°C et 1,2°C, ce qui reflète des conditions hivernales marquées. En revanche, les températures augmentent progressivement à partir de mars pour atteindre un pic en juillet, avec une température minimale de 19,5°C, avant de diminuer à nouveau vers la fin de l'année.

1.1.2 Températures maximales:

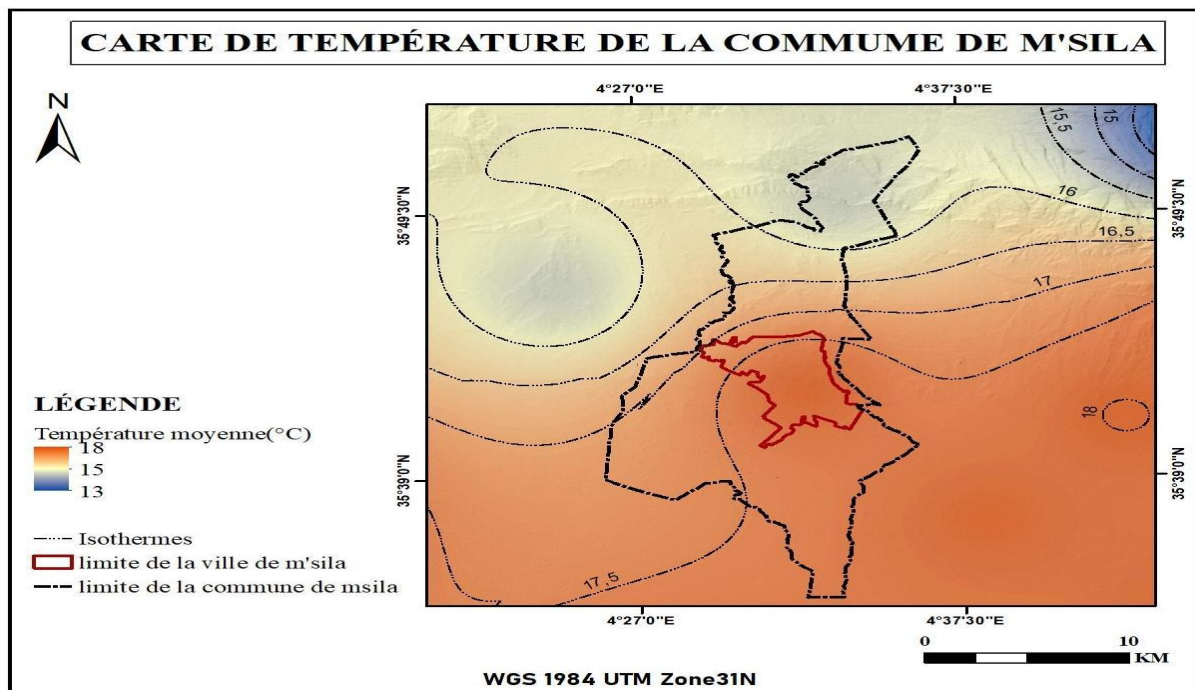
Le tableau (9) montre une nette augmentation des températures maximales pendant les mois d'été, culminant en juillet avec 41°C. Ce mois est le plus chaud de l'année, suivi de juin (40,2°C) et août (33,9°C). Les températures maximales baissent à partir de septembre, atteignant les valeurs les plus basses en décembre (15,9°C) et janvier (14,1°C), soulignant la fraîcheur des mois d'hiver.

1.1.3 Températures moyennes:

La température moyenne annuelle varie significativement en fonction des saisons. Elle oscille entre 9,4°C en janvier, marquant le creux hivernal, et 32,8°C en juillet, marquant le sommet estival. Le printemps et l'automne présentent des températures moyennes plus modérées, avec des valeurs autour de 16,4°C en octobre et 18,4°C en avril, offrant des conditions climatiques plus agréables.

Ces données montrent une forte variation saisonnière, avec des hivers relativement froids et des étés très chauds, typiques des climats arides et semi-arides. La région étudiée connaît des écarts thermiques importants entre le jour et la nuit, ainsi qu'entre les saisons, ce qui peut avoir un impact sur l'évapotranspiration, l'agriculture et la gestion des ressources en eau.

Carte 9: Carte de température de la commune de M'sila



2. Répartition pluviométrique interannuelle pour la station de M'sila :

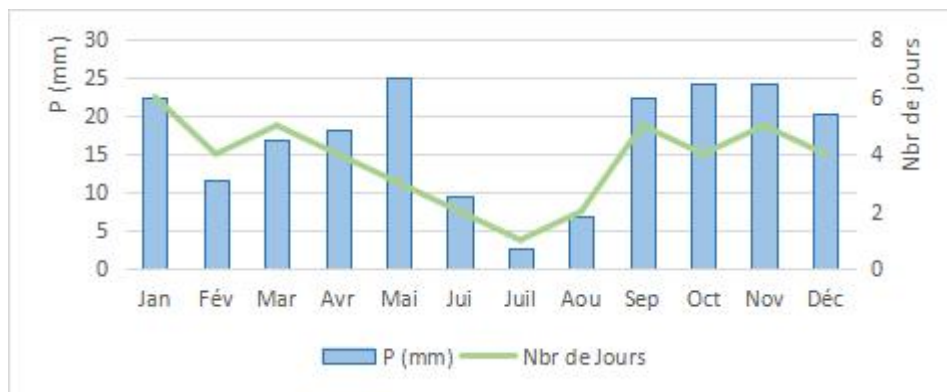
Table 10: Répartition pluviométrique interannuelle des précipitations

P (mm)	Les Mois												Totale
	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	
	22.3	11.7	17	18.3	25.1	9.4	2.6	6.8	22.4	24.3	24.2	20.2	204.3

Table 11: Les caractéristiques statistiques de la série pluviométrique

La moyenne	Maximal	Minimal	Ecar-type	La Variance	Coeffecient de variation
204.3	2,6	25,1	6,27	39,32	0.03

Figure 14: Répartition pluviométrique interannuelle des précipitations



Le tableau N°11 et la Fig.N° 14 présentent les précipitations mensuelles (en mm) et le nombre de jours de pluie pour chaque mois de l'année.

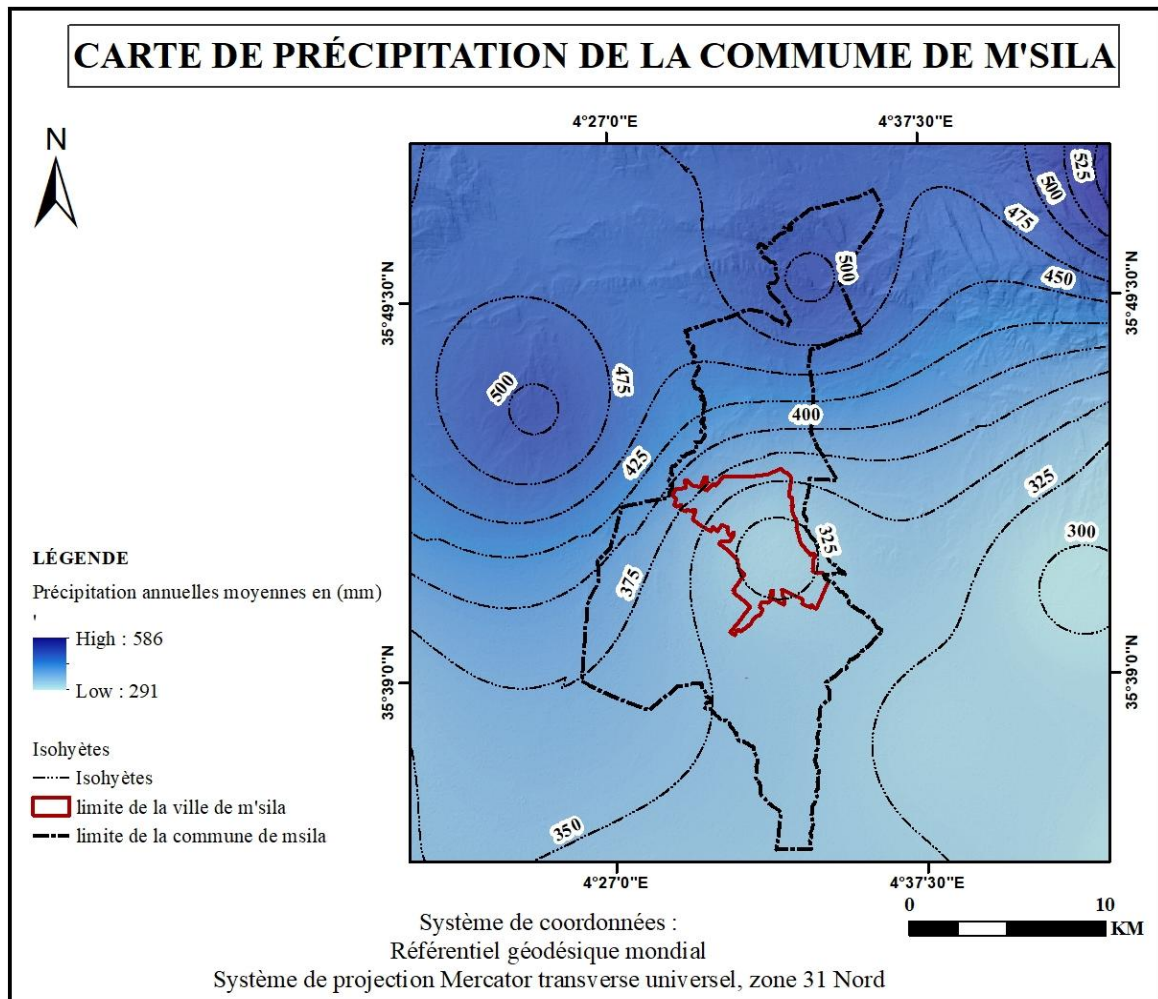
Les précipitations totales annuelles s'élèvent à 204,3 mm, indiquant un climat relativement sec, caractéristique des régions semi-arides. Les mois les plus pluvieux sont mai (25,1 mm), octobre (24,3 mm), et novembre (24,2 mm), marquant une légère saison des pluies au printemps et à l'automne. Les mois d'été, notamment juillet (2,6 mm) et août (6,8 mm), sont les plus secs, illustrant une saison estivale presque aride. Ces faibles précipitations correspondent souvent à des périodes de sécheresse accentuée par des températures élevées.

L'hiver, en particulier janvier (22,3 mm), connaît des précipitations relativement modérées, avec une diminution notable en février (11,7 mm), avant que les précipitations ne

recommencent à augmenter au printemps.

Le nombre total de jours de pluie est de 45 jours par an, ce qui montre que les précipitations sont distribuées sur un nombre limité de jours, souvent sous forme d'épisodes intenses (des averses).

Carte 10 : Carte de précipitation de la commune de M'sila



Ces données soulignent une répartition irrégulière des précipitations, avec une tendance à la sécheresse estivale et des pluies concentrées durant les mois de transition (printemps et automne). Cette variabilité peut affecter fortement l'agriculture locale, les ressources en eau et l'environnement. La faible quantité de pluie durant l'été, combinée aux températures élevées, peut aussi accentuer les phénomènes d'évaporation, mettant sous pression les réserves d'eau disponibles.

3. Le Vent et le Sirocco :

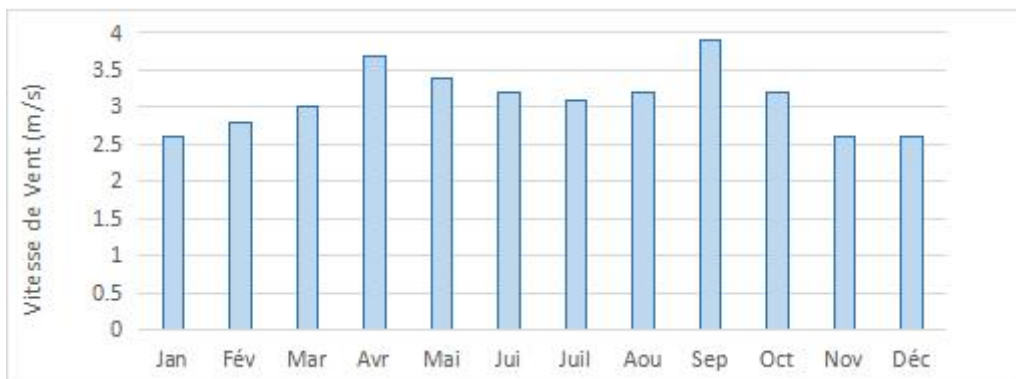
Le vent, défini par sa direction dominante, son intensité et sa fréquence, constitue un paramètre météorologique essentiel. Il joue un rôle déterminant dans les phénomènes d'érosion éolienne, tout en influençant directement d'autres variables climatiques telles que la température, l'humidité, l'évaporation et l'évapotranspiration. Son étude permet d'évaluer non seulement son impact sur les processus d'érosion et de transport des particules, mais aussi son effet sur les microclimats locaux, la répartition des précipitations, ainsi que sur la gestion des ressources hydriques et des systèmes agricoles. De plus, l'analyse des régimes de vent est primordiale en urbanisme, tant pour la conception des infrastructures que pour la prévention des risques naturels, notamment les tempêtes de sable, fréquentes dans les zones arides et semi-arides comme la région de M'sila, où les vents saisonniers tels que le sirocco aggravent les conditions de sécheresse.

Dans cette région, les vents dominants soufflent principalement du Nord-est et du Nord-Ouest, particulièrement en hiver, période durant laquelle ils apportent généralement des précipitations. En été, le sirocco, vent chaud et sec provenant du Sud-Ouest, prédomine, entraînant une hausse marquée des températures accompagnée d'une forte diminution de l'humidité atmosphérique.

Table 12: Les vitesses moyennes mensuelles interannuelles des vents [1981 – 2009]

Vitesse de vent	Les Mois												Moy
	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	
m/s	2.6	2.8	3	3.7	3.4	3.2	3.1	3.1	3.9	3.2	2.6	2.6	3.1

Figure 15: les variations mensuelles des vitesses de Vent de la station de M'sila.



L'analyse de l'histogramme ci-dessus montre que les vitesses du vent sont plus élevées durant la période estivale, de mars à septembre, période marquée par la présence du sirocco (Chhili). En revanche, durant l'hiver, les vents, principalement de direction Nord-Ouest, sont légèrement moins intenses.

4. Synthèse climatique :

4.1. L'indice d'aridité climatique de DE MARTONNE

En se basant principalement sur des critères géographiques, De Martonne a introduit une nouvelle fonction climatologique :

L'indice d'aridité, exprimé par la formule :

$$I_a = \frac{P_{\text{moy}}}{T_{\text{moy}} + 10}$$

Où :

P_{moy}: précipitation moyenne annuelle en mm.

T_{moy}: température moyenne annuelle en °C

Cet indice indique que l'aridité augmente à mesure que sa valeur diminue. Une faible aridité est associée à des précipitations élevées et/ou des températures basses. De Martonne a ainsi établi six grandes catégories de climats en fonction des valeurs de cet indice annuel.

I_a = 7.14 Cela démontre que la zone étudiée présente un climat semi-aride.

4.2. Diagramme Ombrothermique de Gaussen (P=2T):

Cet indice, toujours largement utilisé aujourd'hui, prend en compte les moyennes mensuelles des précipitations (P, en mm) et de la température (T, en °C) pour fournir une mesure relative de la sécheresse estivale, tant en durée qu'en intensité. La sécheresse est évaluée par un indice spécifique, appelé indice ombrothermique (S), obtenu en calculant la différence entre les courbes des précipitations et des températures durant les mois les plus

secs. Un mois est considéré comme sec lorsque $P < 2T$, ce qui signifie que l'évapotranspiration potentielle (ETP) dépasse les précipitations. À l'inverse, lorsque $P > 2T$, le mois est qualifié d'humide.

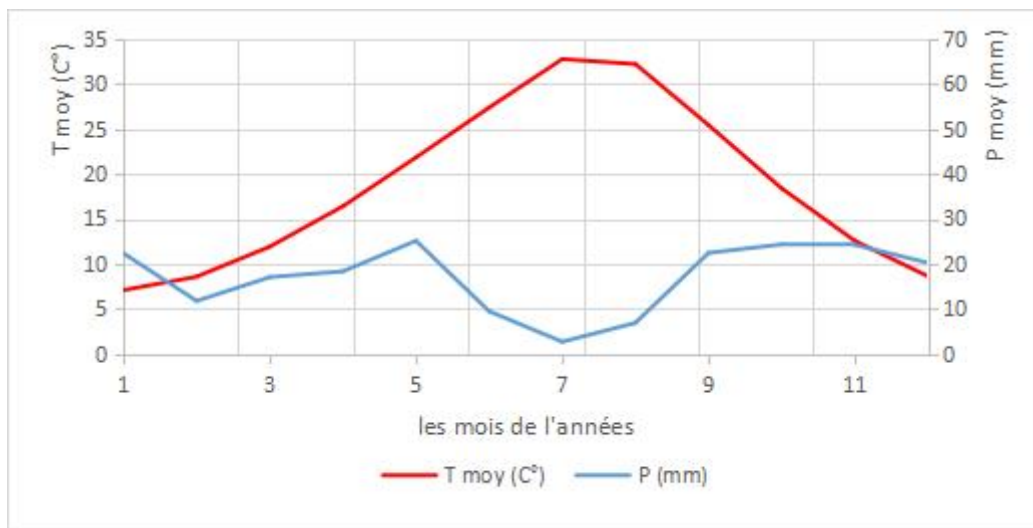
- $P < 2T$: mois sec
- $P > 2T$: mois humide

Pour identifier les mois secs et humides ainsi que les périodes de sécheresse dans une région donnée, des diagrammes ombrothermiques sont généralement tracés. Ces graphiques permettent de superposer les courbes des températures et des précipitations pour chaque mois de l'année, révélant ainsi une aire ombrothermique. Plus cette aire est étendue, plus la saison est sèche.

Table 13 : les moyennes des précipitations et des températures de la station de M'sila.

	Les Mois											
	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
P (mm)	22.3	11.7	17	18.3	25.1	9.4	2.6	6.8	22.4	24.3	24.2	20.2
Tmoy (C°)	7.05	8.55	11.9	16.4	21.85	27.4	32.8	32.25	25.45	18.4	12.55	8.6

Figure 16: Diagramme Ombrothermique de Gaussen



D'après la Fig.(16), on constate que la période sèche est très longue, couvrant presque toute l'année, s'étendant de la fin janvier jusqu'au début de novembre. En revanche, la période humide est très courte, ne durant que trois mois (novembre, décembre et janvier).

4.2.1. Le Quotient pluviométrique d'Emberger:

Le quotient pluviométrique d'Emberger vise à définir le climat de la zone d'étude en s'appuyant sur les précipitations annuelles moyennes et les températures maximales et minimales. Il est défini par la formule suivante :

$$Q = \frac{P.1000}{(M+m)/2.(M-m)}$$

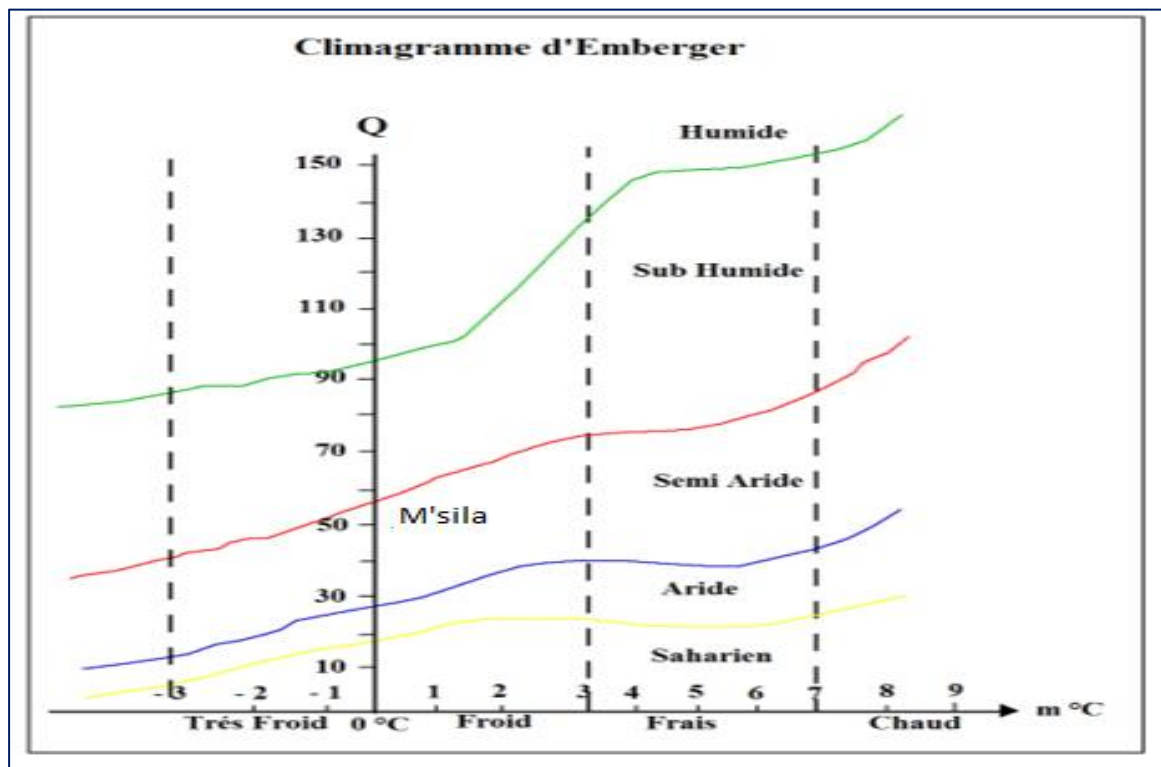
- Q : quotient pluviométrique d'Emberger,
- P : précipitation annuelle moyenne (en mm),
- M : température moyenne des maxima du mois le plus chaud (en Kelvin),
- m : température moyenne des minimas du mois le plus froid (en Kelvin).

Les températures sont converties en degrés Kelvin selon la formule : $T(K) = T(^{\circ}C) + 273,2$.

Dans ce contexte, le quotient : **Q = 51,33**

Indique que la zone étudiée appartient à un étage bioclimatique semi-aride à hiver frais.

Figure 17 : Illustration de l'étage bioclimatique de :M'sila à travers le climagramme d'Emberger.



5. La pluviométrie et les séries d'observation :

L'étude hydrologique d'un bassin versant nécessite une approche méthodologique rigoureuse basée sur l'analyse des données pluviométriques et hydrométriques. La caractérisation des précipitations constitue un élément fondamental pour comprendre le comportement hydrologique d'un bassin et évaluer les ressources en eau disponibles.

5.1. Présentation du Réseau de Mesure

5.1.1. Localisation et Répartition des Stations

Pour cette étude, cinq stations pluviométriques ont été sélectionnées, toutes situées à l'intérieur du bassin versant. Ces stations sont réparties de manière homogène dans la partie inférieure du sous-bassin 09 Ksob, où le caractère montagneux est moyennement dominant. Cette répartition spatiale permet une représentativité optimale des conditions pluviométriques du bassin étudié.

5.1.2. Caractéristiques Techniques des Stations

Le tableau suivant présente les coordonnées Lambert et les altitudes des cinq stations pluvio-hydrométriques retenues pour cette analyse :

Table 14: Coordonnées des stations pluvio-hydrométriques et leurs codes.

Station	Code de station ANRH	Coordonnées Lambert (Km)		Altitude (m)
		X	Y	
Barrage Ksob	05 10 05	668.70	282.65	600
Medjez	05 09 01	673.35	289.65	636
Bordj Ghdar	05 09 04	698.40	292.20	1054
Medjana	05 09 06	677.75	316.20	1042
Bordj Bou Arreridj	05 09 05	677.37	302.62	922

5.2. Analyse Détaillée des Stations Pluviométriques

5.2.1. Station de Bordj Bou Arreridj (BBA)

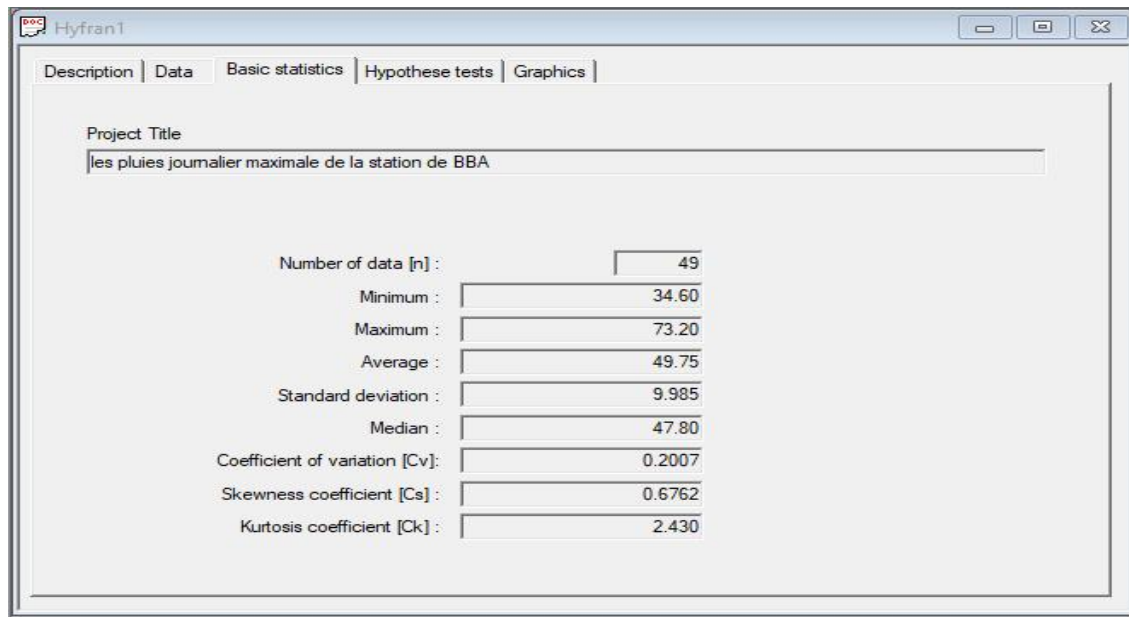
Situation géographique et caractéristiques :

La station de Bordj Bou Arreridj, située à une altitude de 922 mètres, représente une position intermédiaire dans le gradient altitudinal du bassin. Cette station joue un rôle crucial dans la compréhension de la variabilité spatiale des précipitations en zone semi-montagneuse.

Etude des pluies journalières maximales :

Ajustement des précipitations à une loi de probabilité :

Figure 18: les caractéristiques empiriques de la Station BBA



Cette analyse statistique révèle la distribution des précipitations et les tendances à long terme. Les paramètres statistiques calculés permettent d'évaluer la fiabilité des données et d'identifier les valeurs extrêmes.

Ainsi que la courbe chronologique des données annuelles.

Figure 19: la repartition statistiques des PJ max - Station BBA



Cette analyse statistique révèle la distribution des précipitations et les tendances à long terme. Les paramètres statistiques calculés permettent d'évaluer la fiabilité des données et d'identifier les valeurs extrêmes.

Figure 20 : les périodes de retours des pluies journaliers maximales - Station BBA

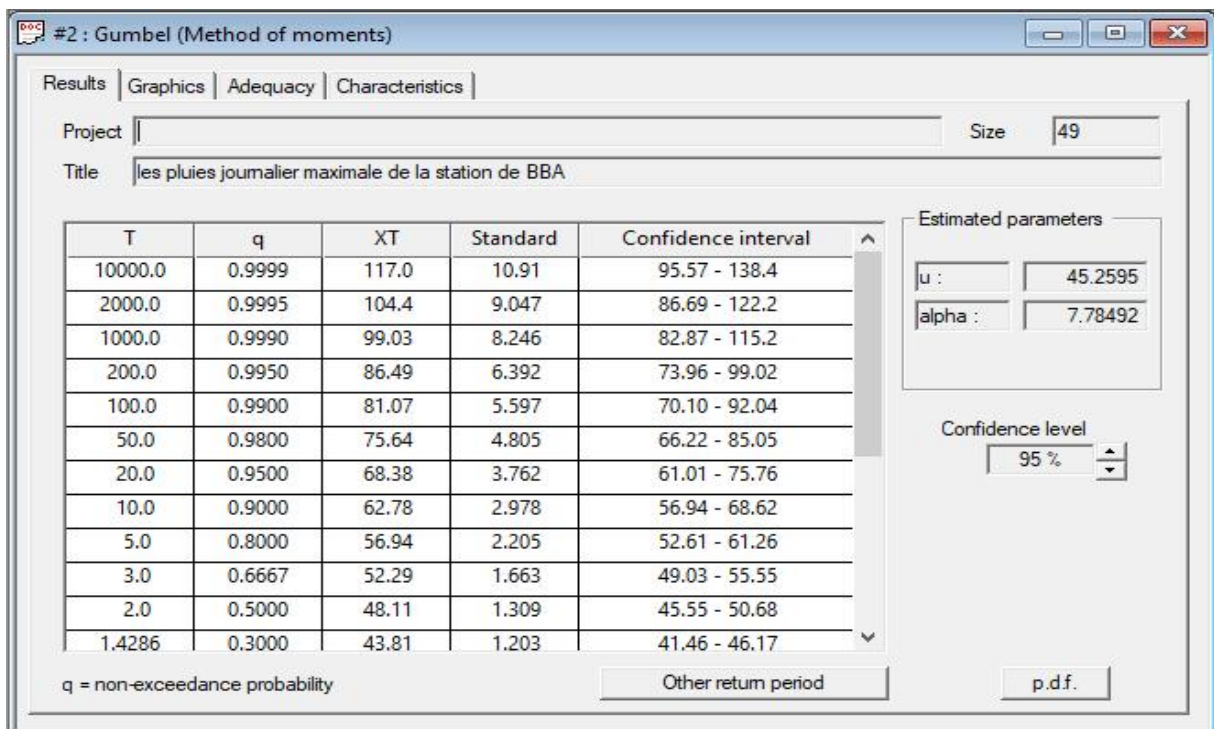
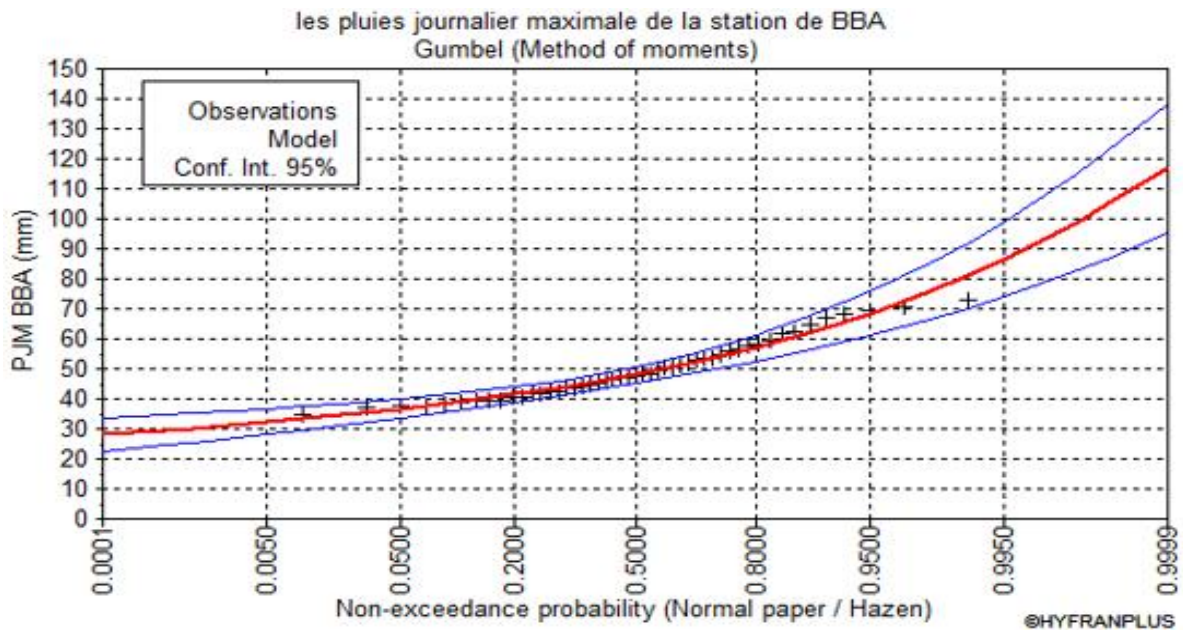


Figure 21: Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus - Station BBA

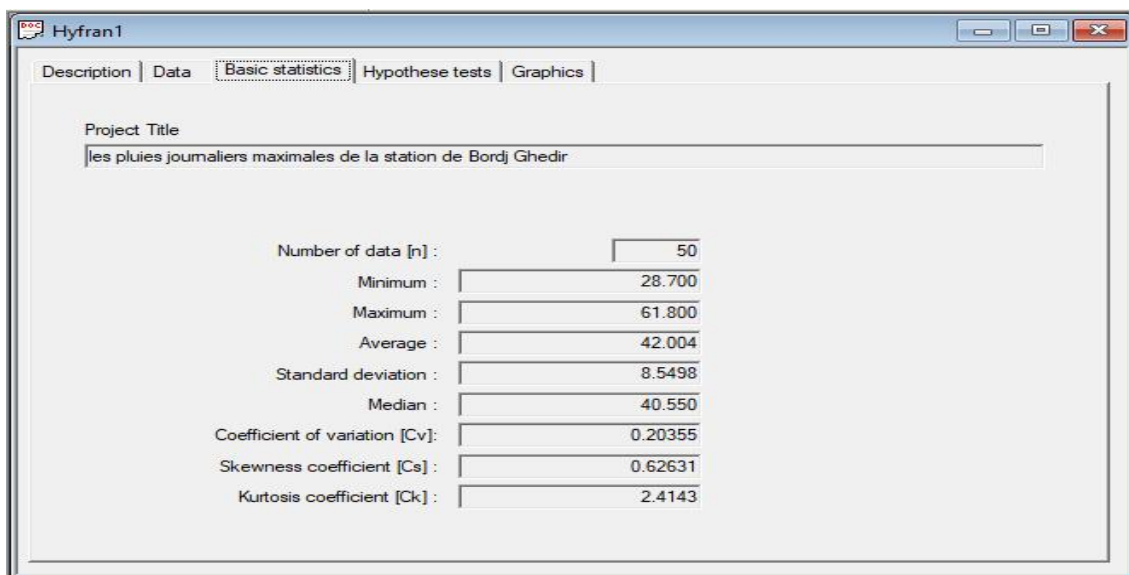


5.2.2. Station de Bordj Ghdir

Caractéristiques altimétriques:

Située à 1054 mètres d'altitude, la station de Bordj Ghdir représente l'une des positions les plus élevées du réseau de mesure. Cette altitude confère à cette station une importance particulière pour l'étude de l'effet orographique sur les précipitations

Figure 22 : les caractéristiques empiriques de la station de Bordj Ghdir



Cette figure illustre les caractéristiques empiriques des précipitations Journaliers maximales (PJ max) de la station de Bordj Ghdir. L'influence de l'altitude se traduit par des totaux pluviométriques généralement supérieurs aux stations de plus basse altitude.

Figure 23: Distribution statistique des PJ max- Station Bordj Ghdir

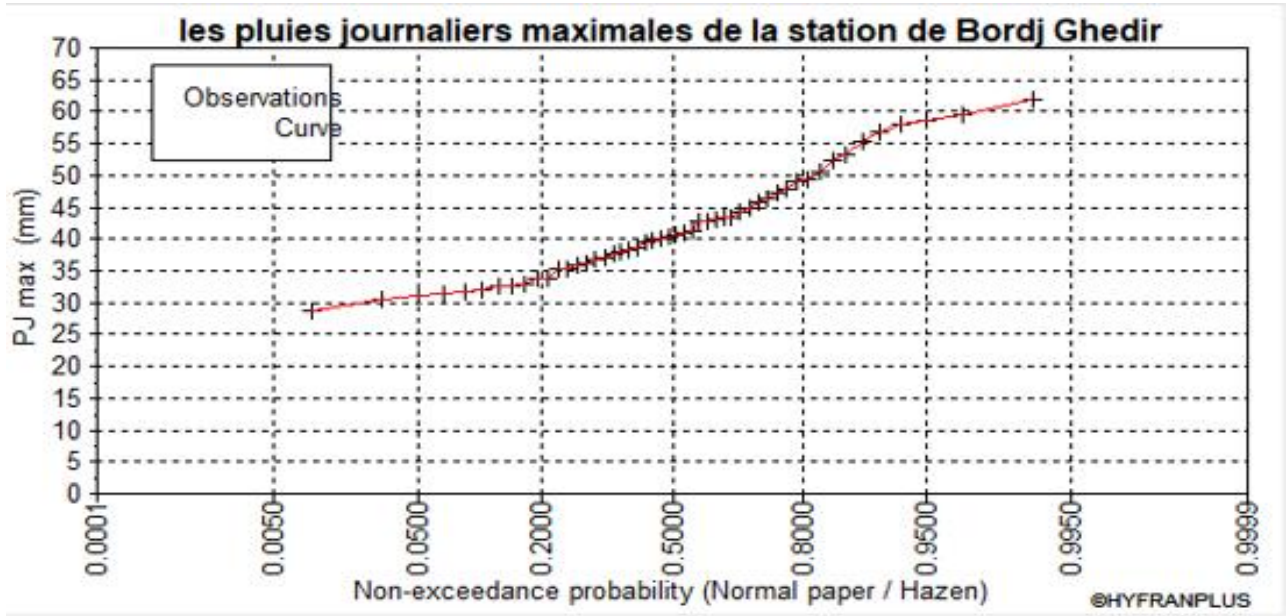


Figure 24: les périodes de retours des PJ max de la Station de Bordj Ghdir

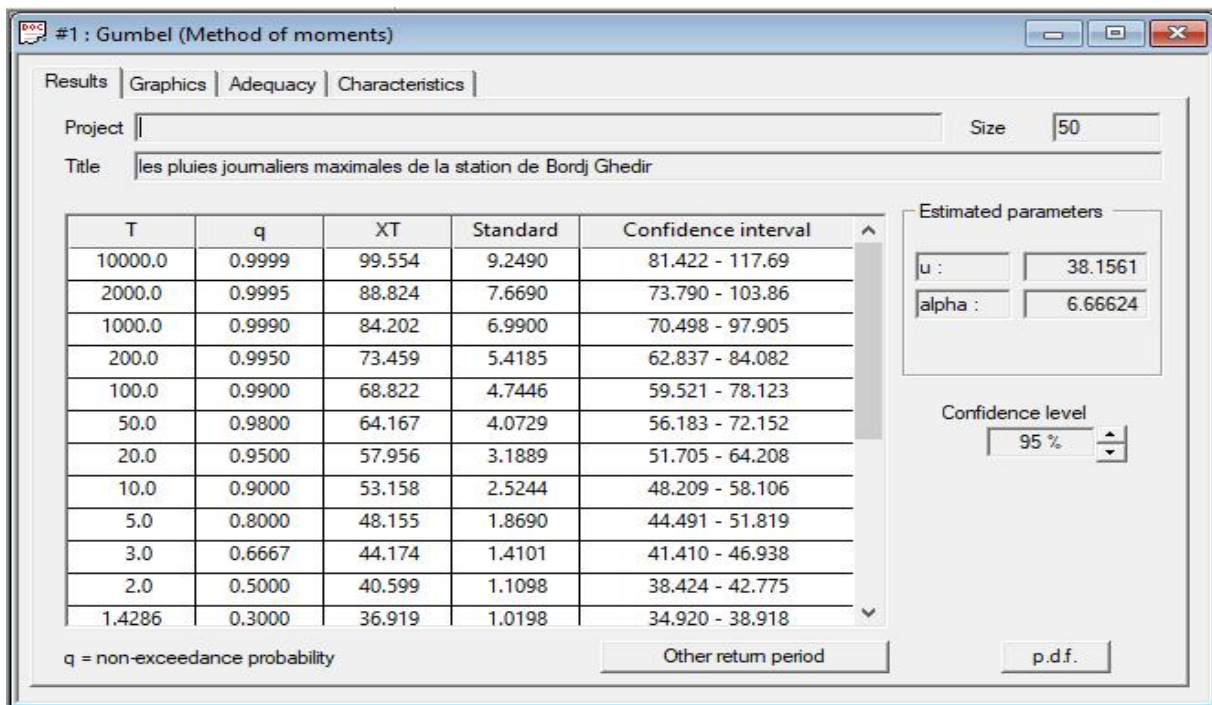
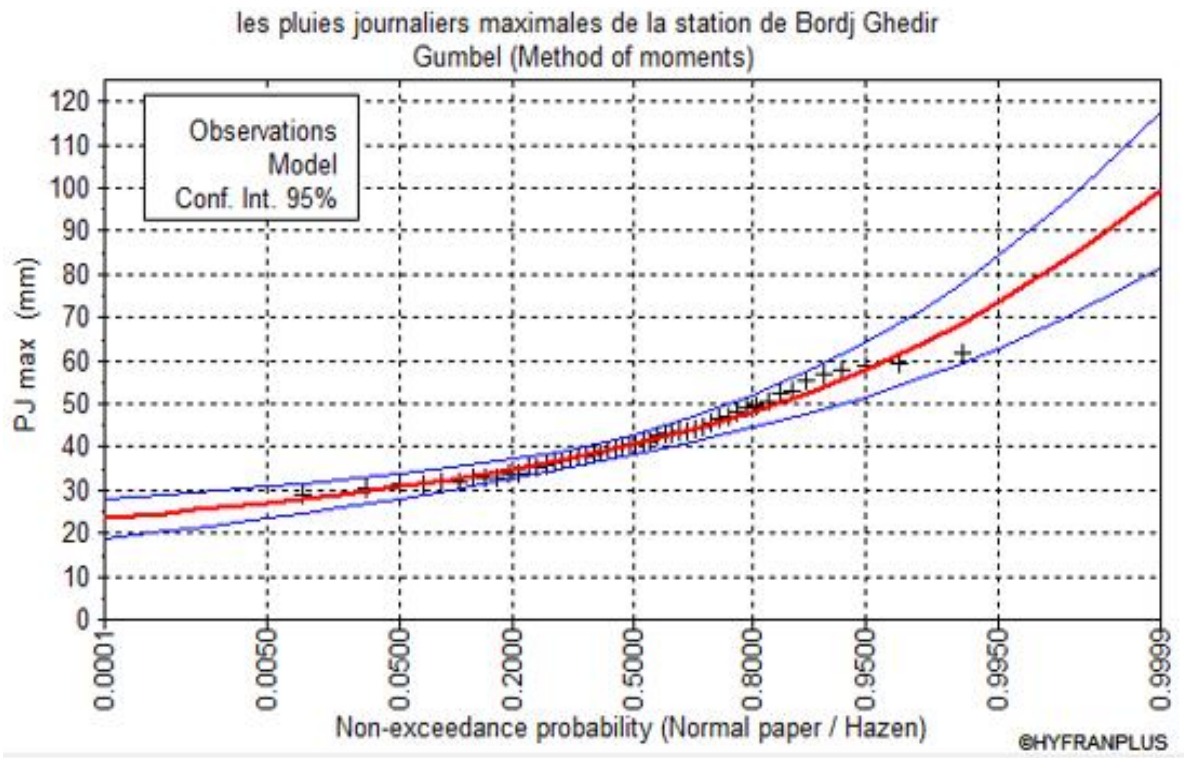


Figure 25: Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus Station Bordj Ghdir



L'analyse de fréquence permet d'évaluer les probabilités d'occurrence des événements pluviométriques extrêmes, information essentielle pour les études de risque hydrologique.

5.2.3. Station de Medjez

La station de Medjez, localisée à 636 mètres d'altitude, occupe une position géographique stratégique permettant de caractériser les précipitations dans la partie médiane du bassin versant.

Figure 26: les caractéristiques empiriques de la station de Medjez

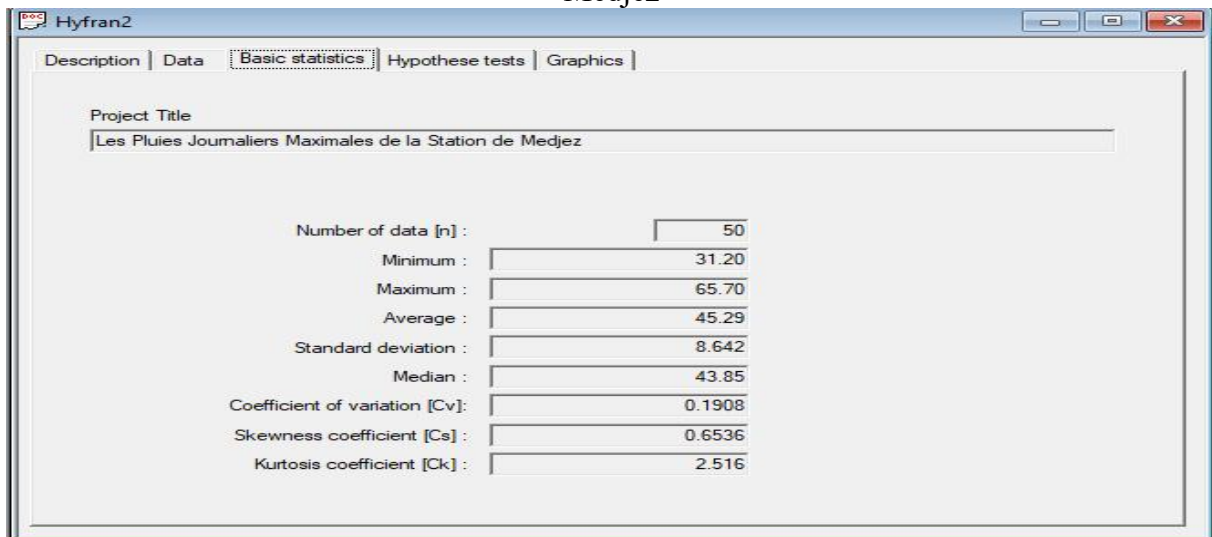
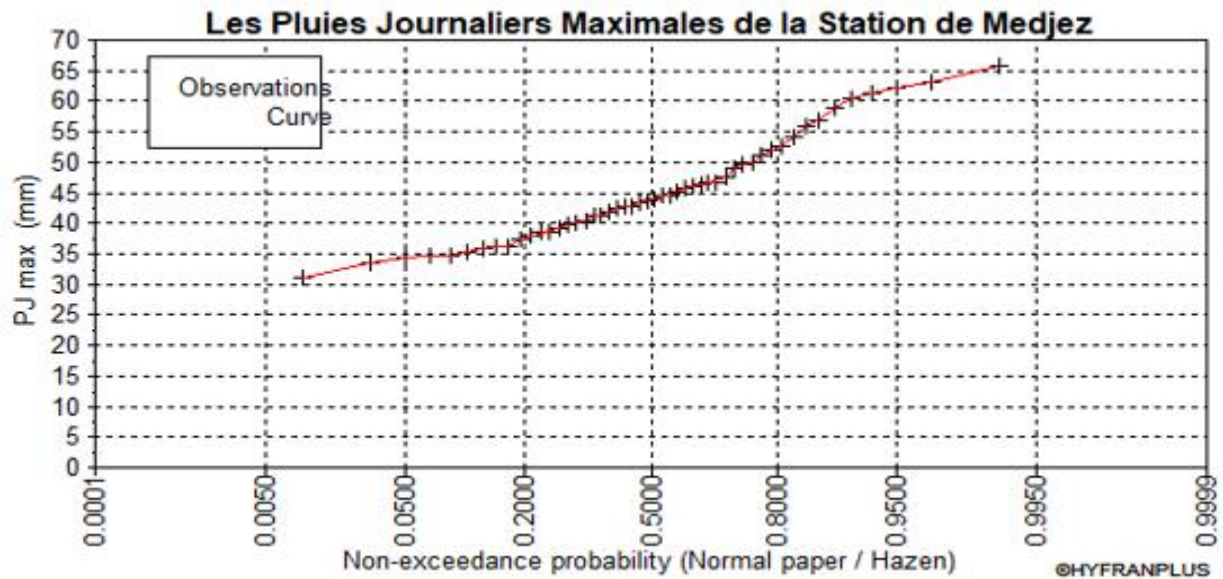


Figure 27 : Distribution statistique des précipitations mensuelles à Medjez



Cette représentation graphique illustre la répartition statistique des précipitations mensuelles, mettant en évidence la saisonnalité des précipitations et les caractéristiques du régime pluviométrique méditerranéen de la station.

Figure 28 : les périodes de retours des PJ max de la Station de Medjez

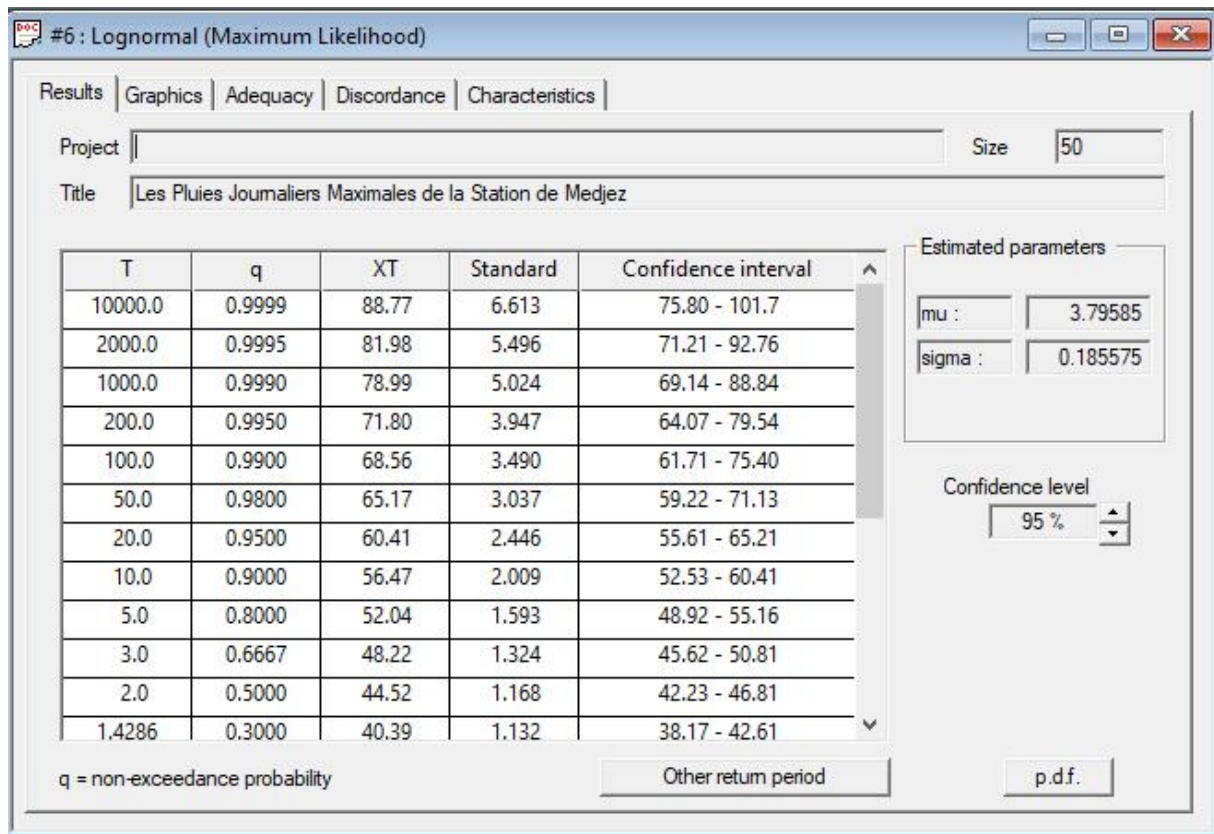
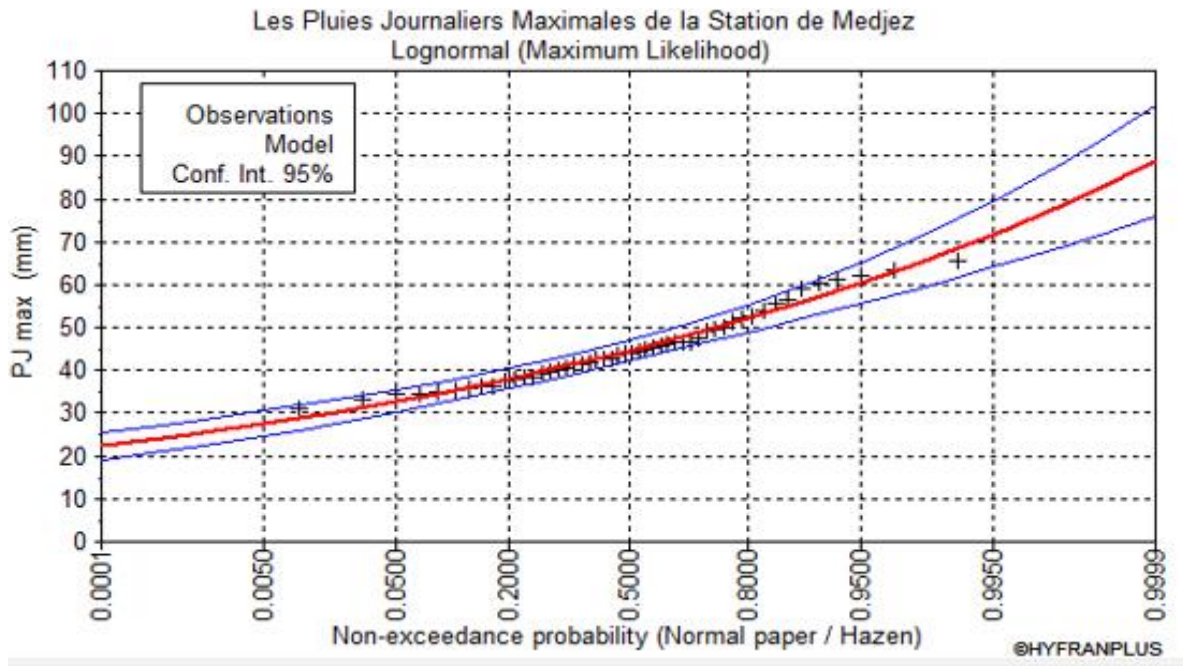


Figure 29: Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Medjez



5.2.4. La station de Medjana

Figure 30 : les caractéristiques empiriques de la station de Medjana

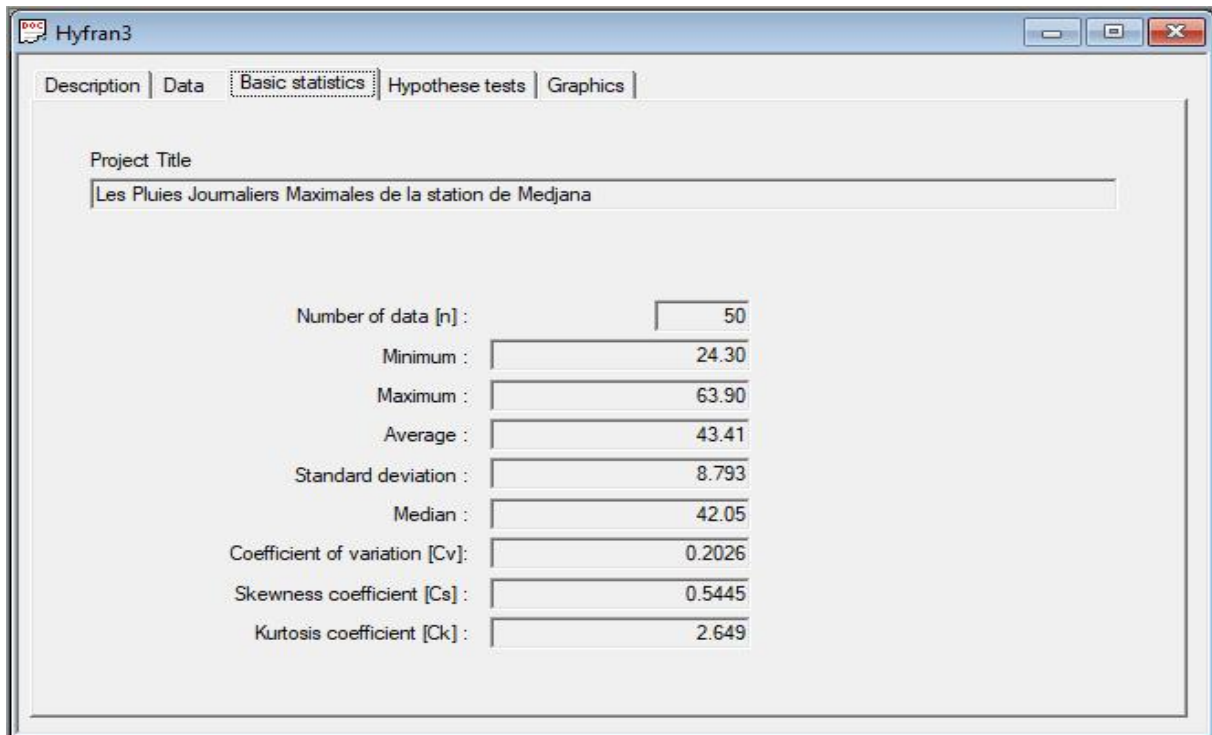


Figure 31 : les caractéristiques empiriques de la station de Medjana

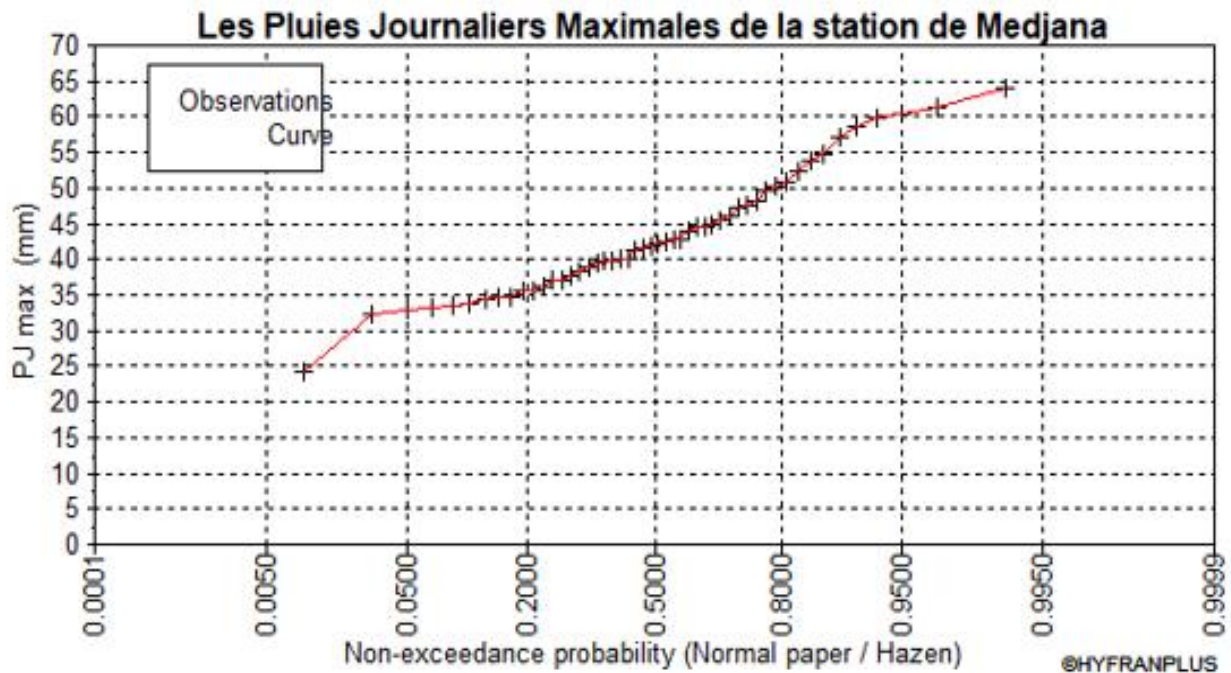


Figure 32 : les périodes de retours des PJ max de la Station de Medjana

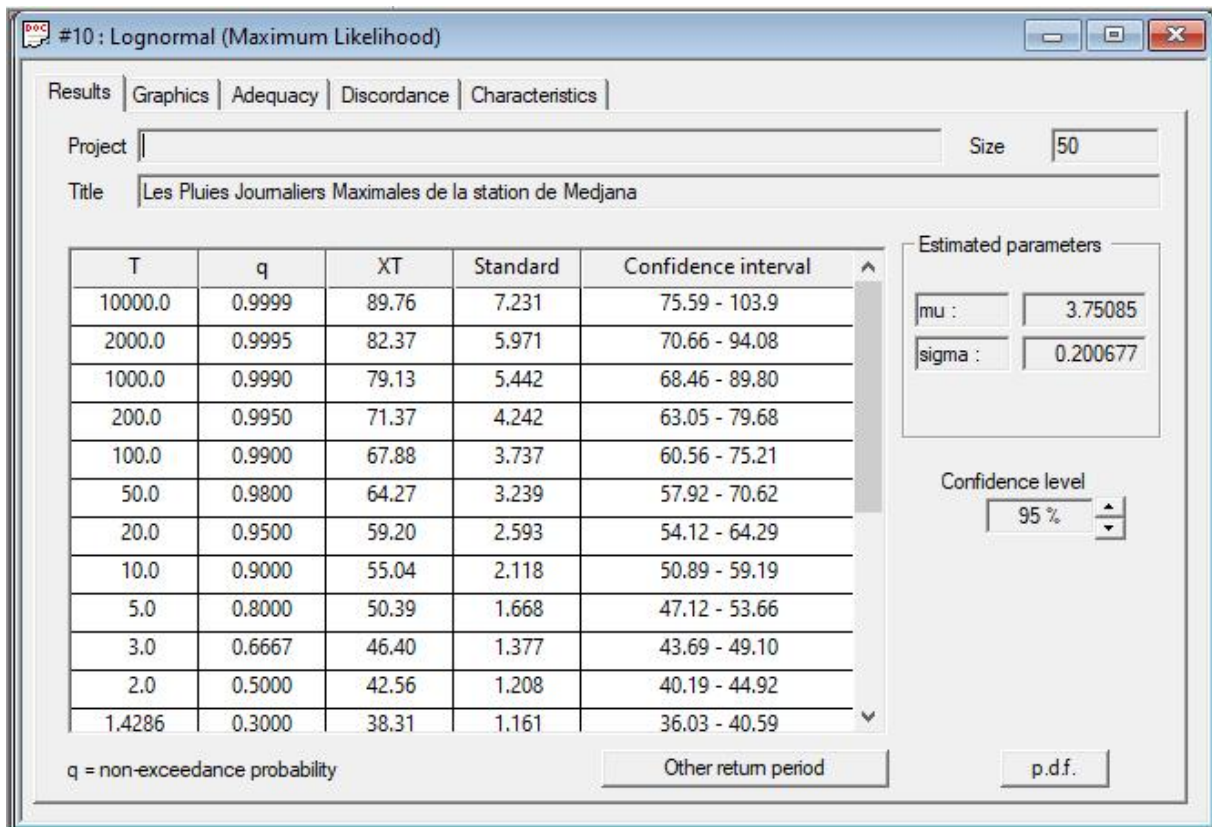
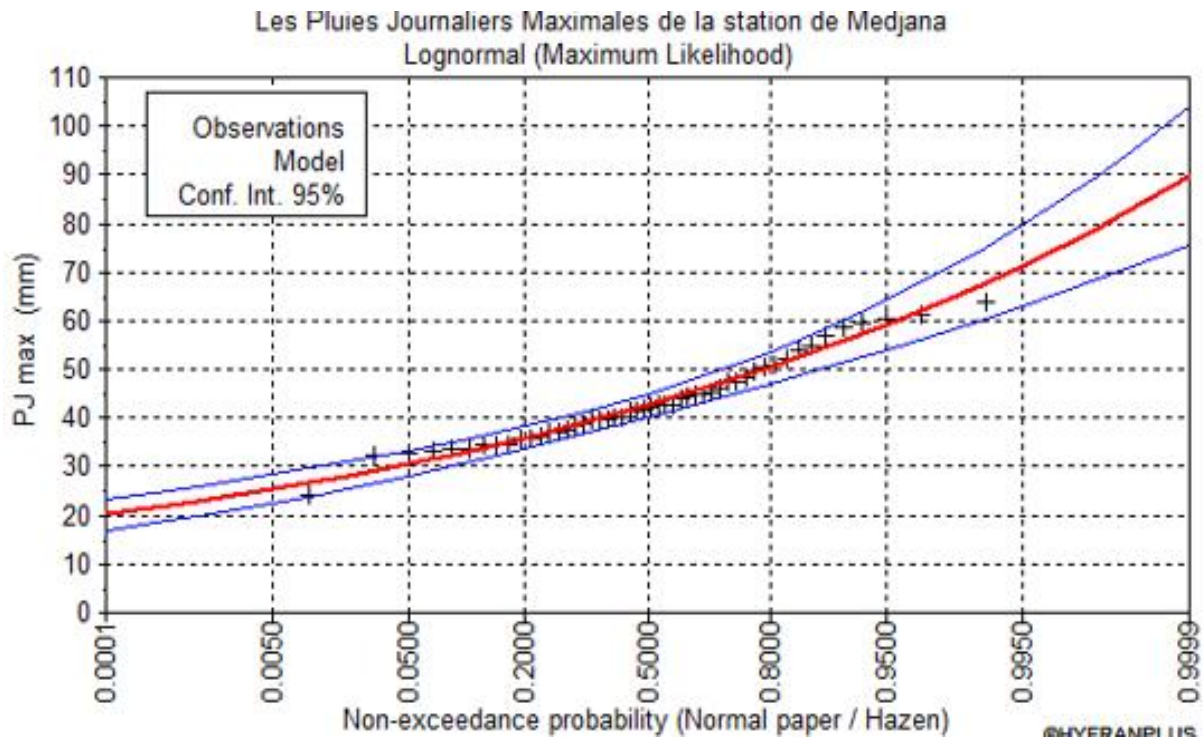


Figure 33: Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Medjana



5.2.5. Station du Barrage Ksob (Oued Ksob)

Position hydrologique stratégique : La station du barrage Ksob, située à 600 mètres d'altitude, occupe une position stratégique à l'exutoire du sous-bassin, permettant une intégration des processus hydrologiques amont.

Figure 34: les caractéristiques empiriques de la station de Oued Ksob.

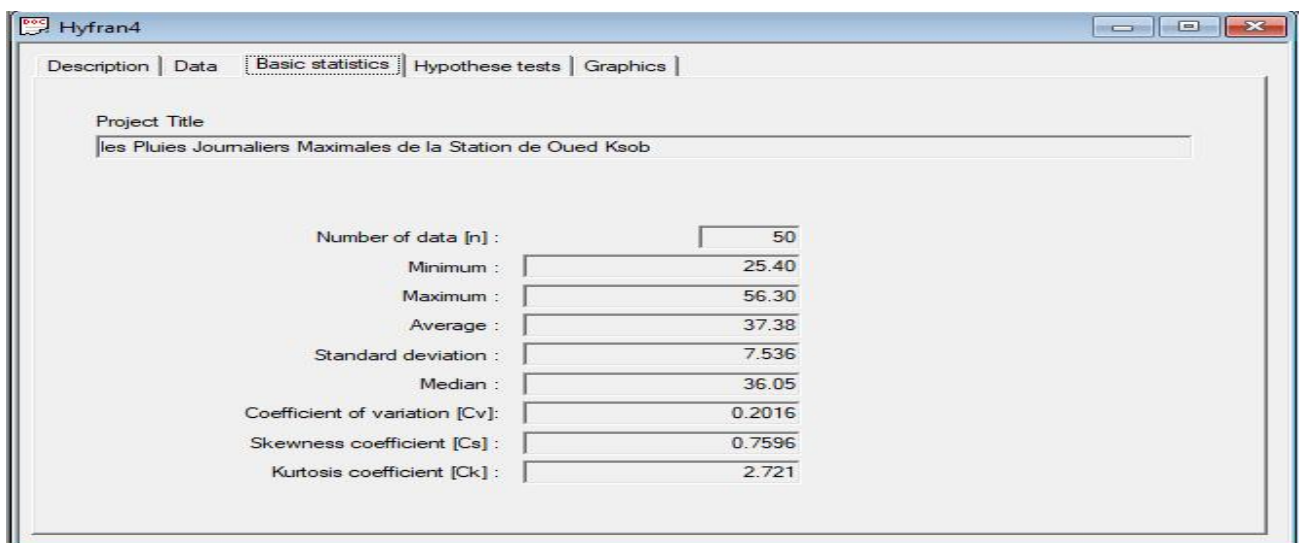


Figure 35: la repartition statistiques des PJmax de la station de Oued Ksob.

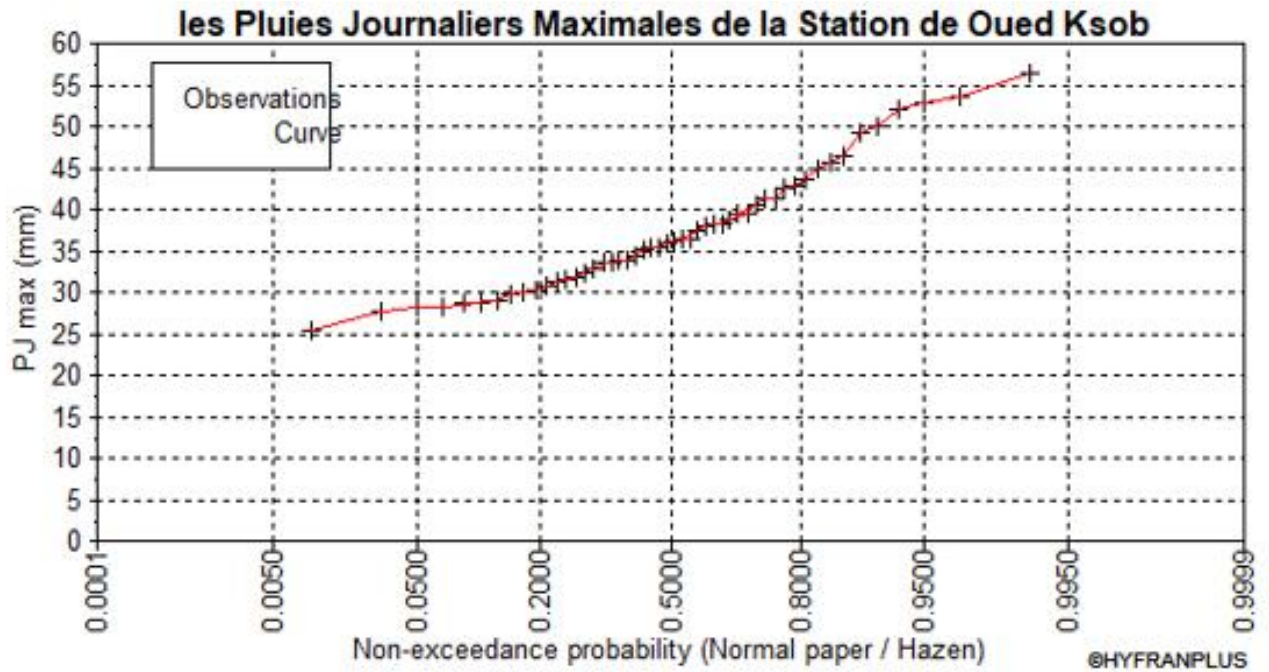


Figure 36 : les periodes de retours des PJ max de la station de Oued Ksob.

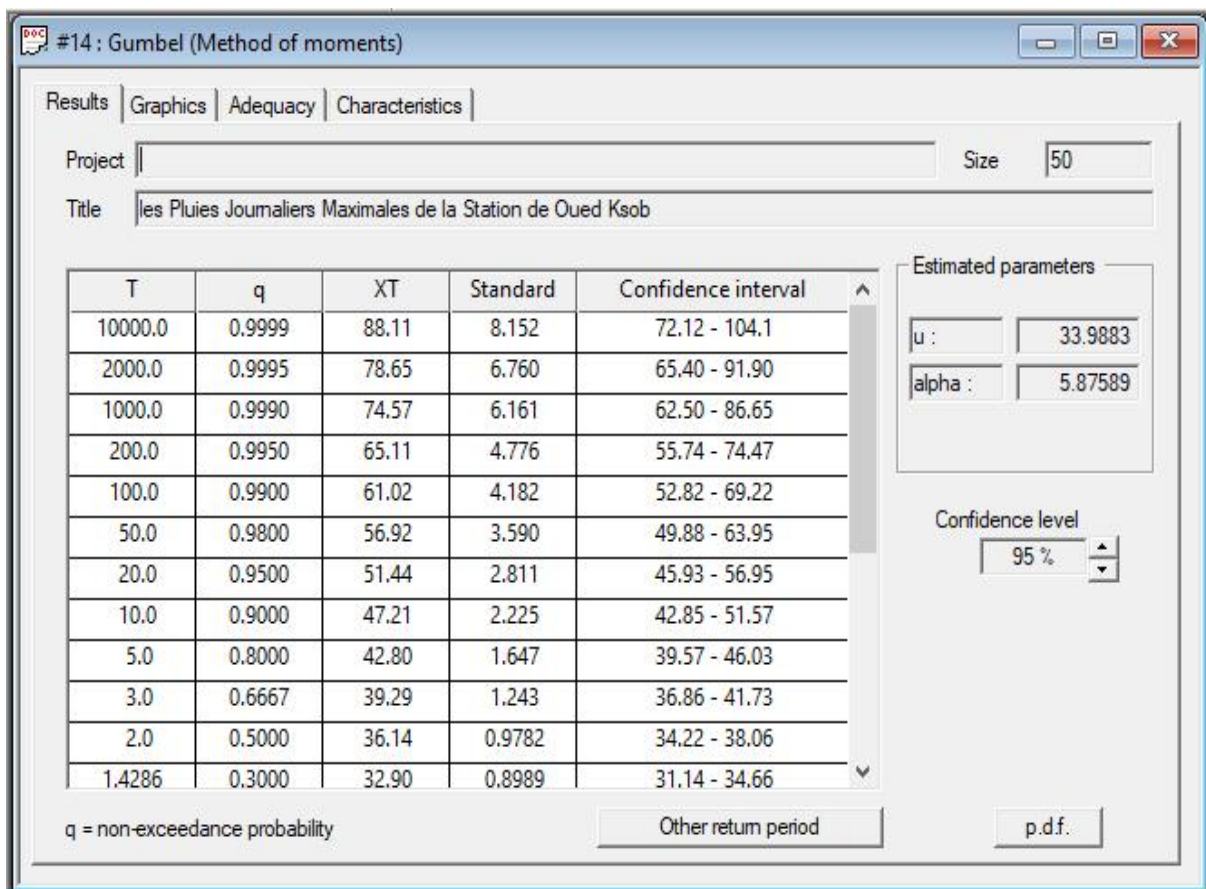
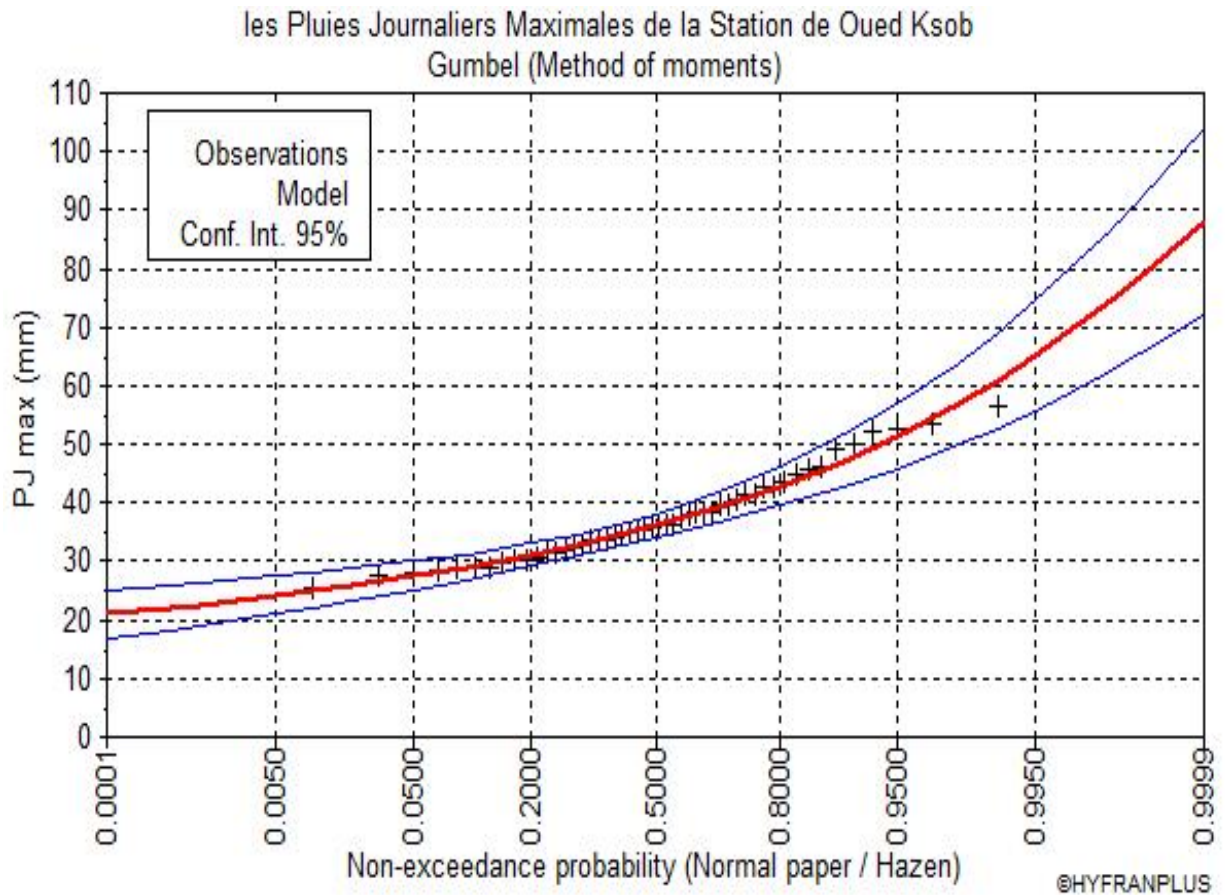


Figure 37 : Répartition statistique des pluies Journaliers maximales selon la loi de Gumbel avec Hyfran plus station Ksob



5.3. Mdélisation Hydrologique:

5.3.1. La modélisation :

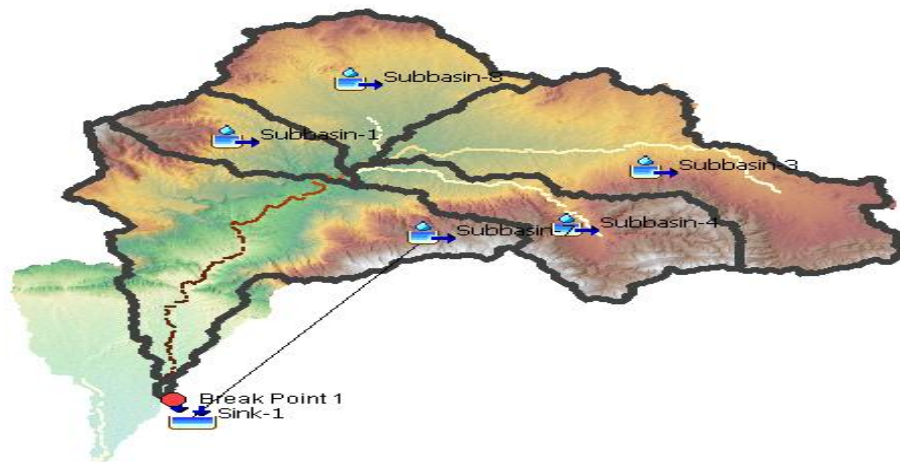
Dans le contexte de la gestion des risques liés aux inondations, la modélisation est un outil essentiel qui permet de représenter de manière simplifiée le comportement hydrologique et hydraulique d'un bassin versant ou d'un cours d'eau. Elle vise à comprendre les mécanismes de génération et de propagation des crues, afin de mieux anticiper les zones exposées et d'élaborer des stratégies de prévention.

5.3.2. La simulation :

La simulation, appliquée aux phénomènes d'inondation, consiste à reproduire numériquement le déroulement d'un événement hydrologique, tel qu'une pluie intense ou une crue exceptionnelle, en utilisant un modèle préalablement construit. Elle permet d'évaluer les impacts potentiels, de tester différents scénarios (naturels ou anthropiques) et de soutenir la prise de décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion des urgences.

5.3.3. Modélisation avec HEC-HMS

Le logiciel HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) a été employé pour modéliser la relation pluie-débit au sein du bassin versant étudié. Il offre une approche intégrée permettant de simuler les principaux processus hydrologiques, tels que l'infiltration, le ruissellement de surface et la concentration des écoulements, en vue d'analyser la réponse hydrologique du bassin aux événements pluviométriques



Carte 11: Division du bassin versant en sous-bassins homogènes selon la méthode SCS Curve Number, basée sur le type de sol et occupation du sol

Dans HEC-HMS, le découpage du bassin versant en sous-bassins est une étape essentielle pour permettre une modélisation hydrologique précise. Ce découpage est généralement automatisé ou semi-automatisé et repose sur plusieurs critères, en particulier lorsque l'on utilise la méthode SCS Curve Number (CN) :

- Le logiciel utilise un Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour:
 - Délimiter le bassin versant principal,
 - Identifier les lignes de crête et les talwegs,
 - Générer le réseau hydrographique.

Pour appliquer la méthode SCS Curve Number, chaque sous-bassin doit être homogène du point de vue hydrologique, c'est-à-dire:

- Même type de sol (classification des groupes hydrologiques A, B, C, D),
- Même occupation du sol (zones urbaines, forêts, terres agricoles, etc.),
- Cela permet d'attribuer un Curve Number unique par sous-bassin.

But de découpage:

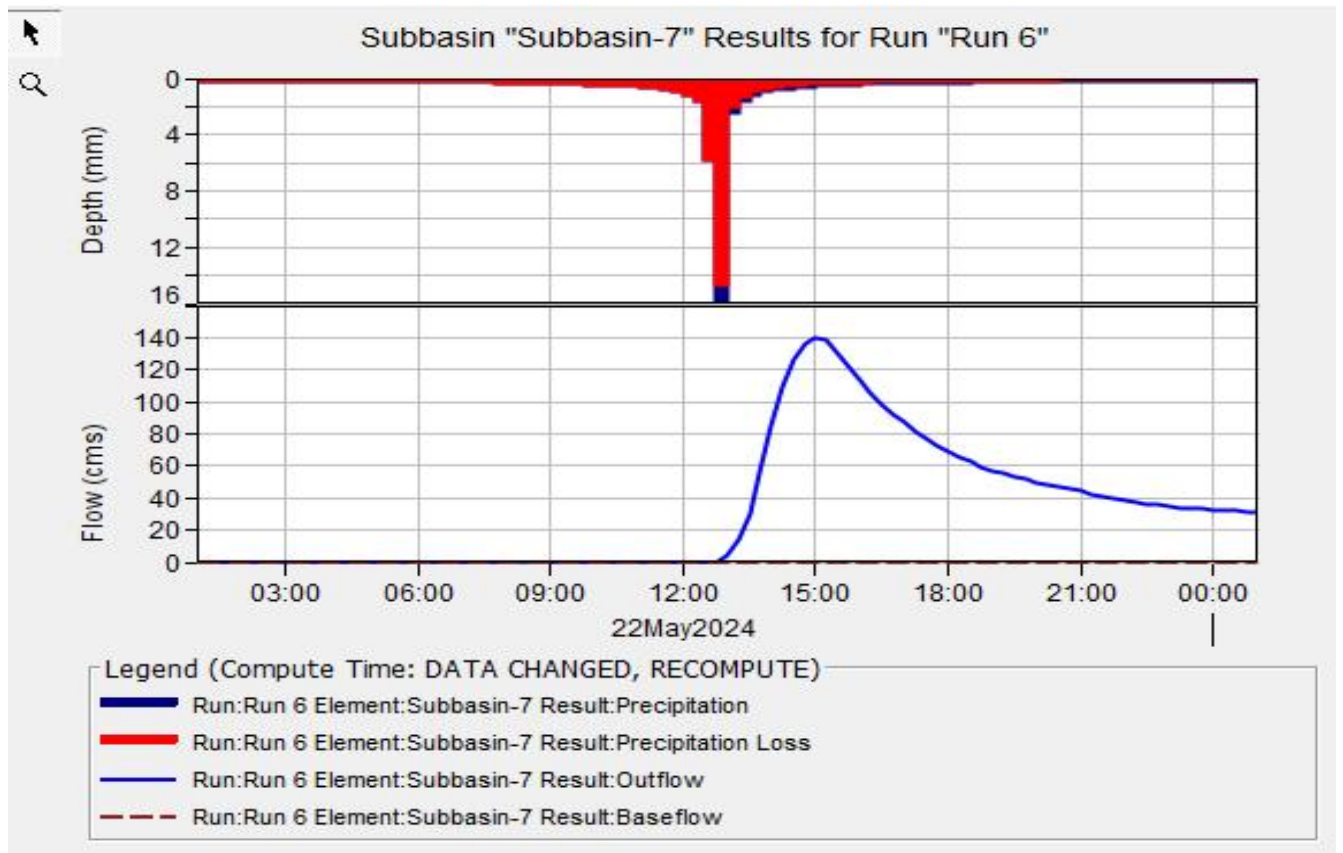
- Permet de calculer les volumes de ruissellement plus précisément,
- Chaque sous-bassin a sa propre pluie nette (calculée avec le CN),
- Ces volumes sont ensuite routés via les tronçons vers l'exutoire.

Carte 12: Analyse de la Réponse Hydrologique Spatiale des Sous-bassins de Drainage Utilisant le Modèle HEC-HMS"

Global Summary Results for Run "Run 6"				
Project: bassin versant Ksob Simulation Run: Run 6				
Start of Run: 22mai2024, 01:00		Basin Model: Basin 1		
End of Run: 23mai2024, 01:00		Meteorologic Model: Met 1		
Compute Time: DATA CHANGED, RECOMPUTE		Control Specifications: Control 1		
Show Elements:	All Elements	Volume Units:	☒ MM ☐ 1000 M3	Sorting: Watershed Explorer
Hydrologic Element	Drainage Area (KM2)	Peak Discharge (M3/S)	Time of Peak	Volume (MM)
Subbasin-3	439.3	26.6	22 May 2024, 15:45	1.80
Subbasin-8	267.9	413.8	22 May 2024, 14:15	18.63
Subbasin-4	239.0	305.8	22 May 2024, 14:45	18.41
Subbasin-1	116.8	28.3	22 May 2024, 14:45	4.88
Subbasin-7	463.8	140.1	22 May 2024, 15:00	5.98
Sink-1	463.8	140.1	22 May 2024, 15:00	5.98

Les résultats de la simulation hydrologique démontrent une variabilité spatiale claire dans la réponse hydrologique entre les six sous-bassins. Le sous-bassin 8 a enregistré le débit de pointe le plus élevé (413,8 m³/s) et la plus grande lame d'eau écoulée (18,63 mm), comparativement au sous-bassin 1 qui a enregistré les valeurs les plus faibles (28,3 m³/s et 4,88 mm respectivement). Cette variabilité reflète les différences dans les caractéristiques physiographiques des bassins telles que la superficie, la pente, le type de sol et la couverture végétale, influençant ainsi le temps de concentration et le coefficient de ruissellement de surface.

Figure 38: Relation Temporelle entre l'Intensité des Précipitations et la Réponse du Ruissellement de Surface"

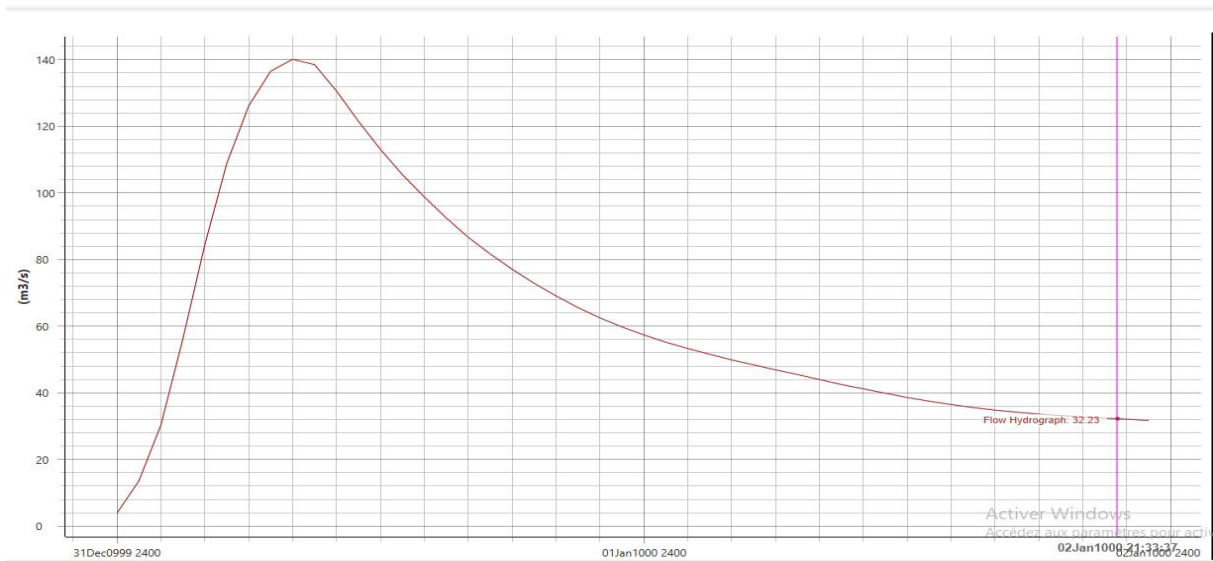


L'hydrogramme obtenu met en évidence l'application de la théorie de l'hydrogramme unitaire, selon laquelle un événement pluvieux intense — survenu autour de 12h00 — engendre un pic de débit d'environ 140 m³/s, atteint après un délai d'environ trois heures. Ce décalage temporel correspond au **temps de concentration** du bassin versant, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'eau provenant des points les plus éloignés atteigne l'exutoire.

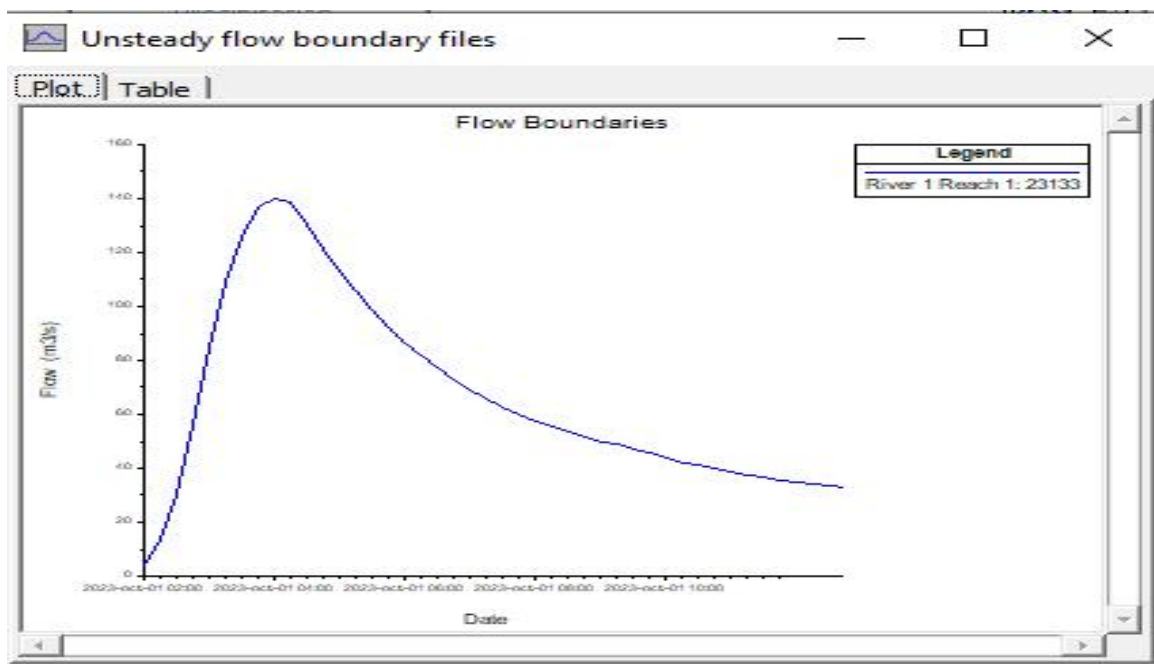
La phase de décrue de l'hydrogramme adopte une forme exponentielle, caractéristique d'un écoulement naturel sans apport supplémentaire. Elle suit l'équation :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}$$

où Q_0 est le débit initial au début de la décrue, α est le **coefficient de décrue** qui dépend des propriétés de stockage du bassin (capacité des sols, végétation, relief, etc.). Ce comportement reflète une réponse hydrologique typique d'un système naturel, dans lequel les pertes progressives d'eau (infiltration, évaporation, ralentissement par la végétation) influencent la vitesse de retour à l'état de base.

Figure 39: "L'hydrogramme des crues de Oued Ksob."

Cette courbe représente l'analyse de décrue à long terme suivant le modèle mathématique de décrue exponentielle. La courbe montre la transition du débit depuis le pic (≈ 140 unités) vers le débit de base stable (≈ 30 unités) sur une période temporelle étendue. Le coefficient de décrue extrait de cette analyse est utilisé pour calibrer les modèles de simulation hydrologique et estimer les caractéristiques de stockage souterrain. Cette analyse est nécessaire pour comprendre la dynamique de vidange des eaux souterraines et estimer les débits d'étiage pendant les périodes de sécheresse.

Figure 40: "Analyse de l'Écoulement Non Permanent Utilisant les Équations de Saint-Venant"

Cette courbe représente la solution des équations d'écoulement non permanent qui décrivent la propagation de l'onde de crue à travers le chenal ou le cours d'eau. Le pic atteignant 8 unités est suivi d'une décrue progressive reflétant l'effet d'atténuation et de délai temporel de l'onde de crue. Cette analyse est fondamentale dans la modélisation de propagation des crues et la conception de systèmes d'alerte précoce, aidant à déterminer les temps d'arrivée et les pics de débit aux points critiques le long du cours d'eau.

Ces résultats constituent une étude hydrologique intégrée appliquant les théories fondamentales de l'hydrologie appliquée, de la modélisation pluie-débit à l'analyse de l'écoulement non permanent. Les résultats confirment l'importance de la modélisation mathématique dans la compréhension des processus hydrologiques complexes et leurs applications dans la gestion des ressources en eau et la protection contre les inondations.

Conclusion

À partir de l'analyse statistique des précipitations journalières maximales du bassin versant de l'oued El-Ksob, il apparaît que la série étudiée présente une variabilité modérée ainsi qu'une légère tendance vers les valeurs élevées, traduisant un régime pluviométrique irrégulier soumis à des influences climatiques extrêmes. Les indicateurs statistiques tels que la moyenne, l'écart-type, le coefficient d'asymétrie et le kurtosis ont permis de caractériser la distribution des données et de comprendre la nature des valeurs extrêmes au sein de la série, ce qui renforce la fiabilité des données utilisées dans la modélisation hydrologique. Cette analyse constitue une base scientifique essentielle pour interpréter le comportement des précipitations extrêmes et évaluer les risques d'inondation, contribuant ainsi à une meilleure efficacité de la planification et de la gestion durable des ressources en eau dans la région.

CHAPITRE IV

MODÉLISATION DU

RISQUE D'INONDATION -

CAS DE LA VILLE DE

M'SILA

INTRODUCTION

L'importance de l'étude hydroclimatique réside dans le fait qu'elle nous donne une représentation numérique (valeur du débit maximal) du risque d'inondation probable sur la zone d'étude, ainsi que le volume de la lame d'eau courante que peut recevoir le bassin versant. Pour parvenir à une évaluation de l'ampleur de l'impact du phénomène sur le cadre physique, connaître les niveaux d'eau que peut atteindre la crue de l'oued, et les lieux menacés, nous devons transformer ces données de leur valeur numérique en cartes à différentes dimensions.

C'est pourquoi le processus de modélisation était très nécessaire pour connaître la menace potentielle du phénomène d'inondation sur les enjeux, et aussi savoir comment intervenir pour réduire et limiter l'impact du phénomène, et sortir également avec des recommandations et propositions qui servent cet objectif, c'est ce que nous aborderons dans ce chapitre.

1. MODÉLISATION ET SIMULATION

1.1. Définition de la modélisation

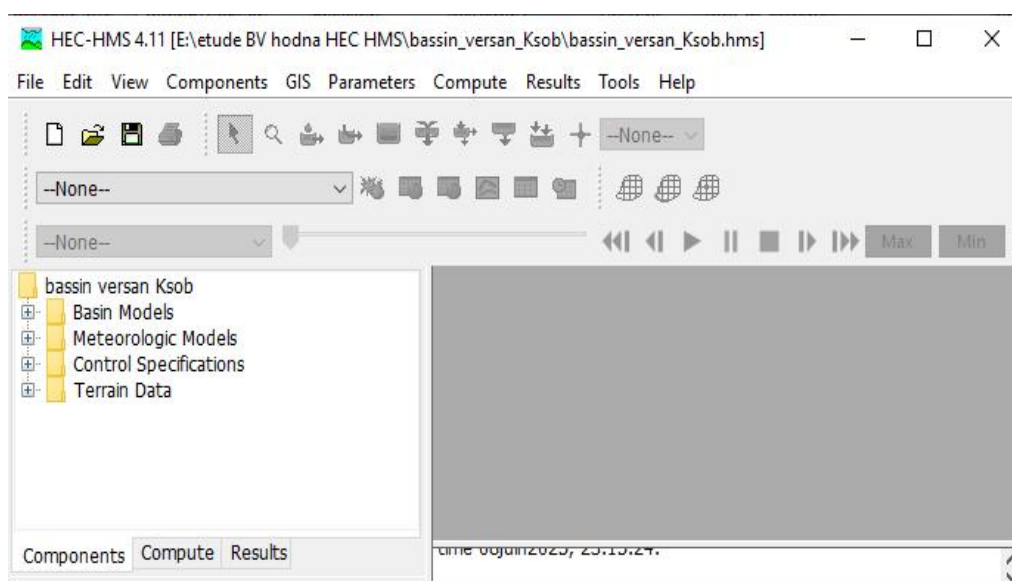
La modélisation est un processus de représentation logique, physique ou mathématique d'un système donné, incluant sa méthode de construction ou de fonctionnement, de sorte qu'il ressemble à un système réel, afin d'aider les spécialistes à prédire les effets résultant des changements qui se produiront sur le système. En d'autres termes, la modélisation consiste à créer un modèle qui simule le système avec toutes ses caractéristiques.

Quant à la simulation, c'est l'exploitation du modèle d'une manière liée au temps ou à l'espace pour aider à analyser les performances d'un système existant ou proposé, c'est-à-dire l'étude des performances du système en utilisant le modèle.

1.2. Présentation du logiciel HEC-HMS :

Le logiciel **HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System)** est un outil développé par le **US Army Corps of Engineers** destiné à la **modélisation hydrologique des bassins versants**. Il permet de simuler la transformation des précipitations en débits de ruissellement, en tenant compte des caractéristiques du bassin (pente, occupation du sol, type de sol, etc.).

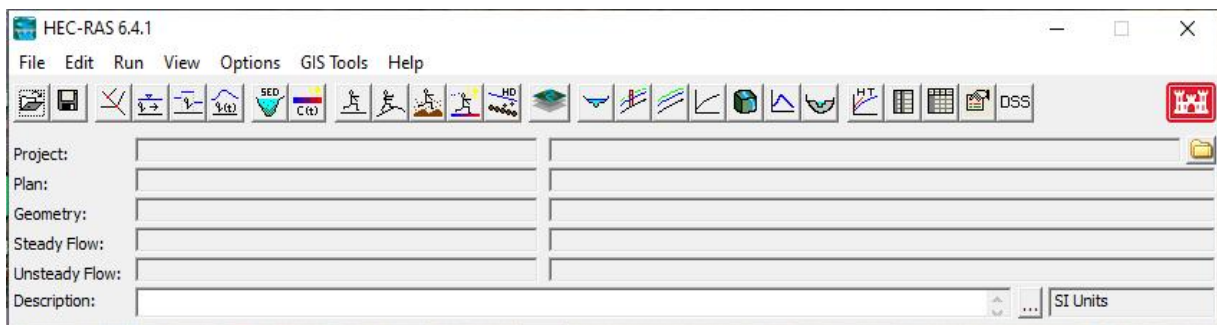
Figure 41: l'interface du logiciel HEC HMS.



1.3. Présentation du logiciel HEC-RAS :

HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) est un logiciel de modélisation et simulation hydraulique pour les oueds et canaux, développé par le Corps des Ingénieurs de l'Armée Américaine. Il permet d'estimer le volume de débit et l'élévation du niveau d'eau dans toutes les sections transversales des cours d'eau.

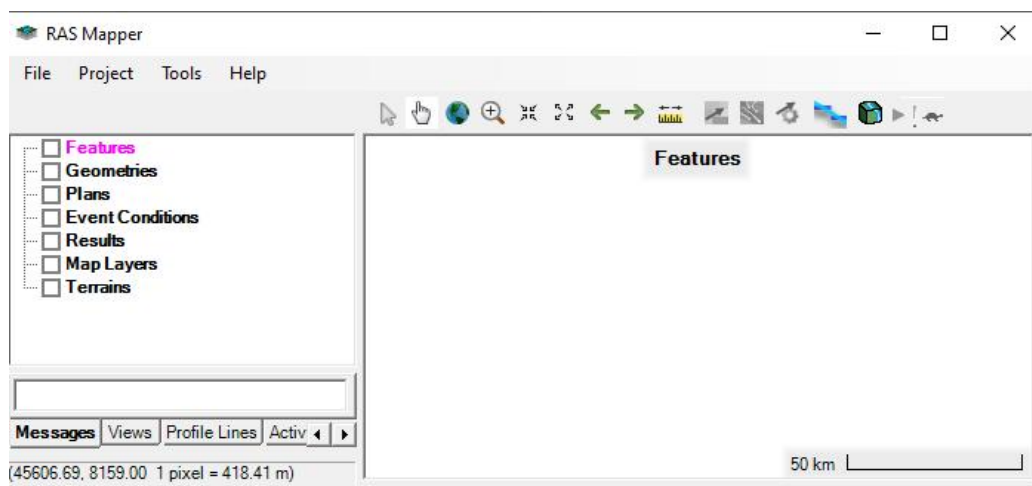
Figure 42: Interface du logiciel HEC-RAS



1.4. Outil RAS Mapper:

L'outil RAS Mapper dans HEC-RAS est un composant intégré puissant utilisé pour la visualisation cartographique, la gestion des données géospatiales, et la génération de cartes d'inondation. Il permet de transformer les résultats des simulations hydrauliques en cartes SIG faciles à interpréter.

Figure 43: Outil Outil RAS Mapper



2. Étude et modélisation du risque d'inondation par le logiciel HEC-RAS:

La modélisation hydraulique constitue un outil fondamental pour l'analyse et l'évaluation des risques liés aux inondations, puisqu'elle permet une représentation précise du comportement de l'écoulement dans les milieux naturels et urbains. Dans ce cadre, le logiciel **HEC-RAS**, reconnu comme l'un des principaux outils spécialisés dans la simulation des écoulements en cours d'eau ouverts, a été adopté afin d'étudier le comportement hydraulique du bassin versant du oued **KSOB** dans la ville de **M'Sila**.

Cette modélisation vise à évaluer le degré d'exposition de la région au risque d'inondation à travers la simulation de scénarios de crue basés sur différentes périodes de retour, notamment celles de 50 ans et 100 ans, dans le but de fournir une base de données précise contribuant à une prise de décision efficace en matière d'aménagement urbain, de planification préventive et de réduction des dommages potentiels.

2.1. Modélisation du scénario d'inondation pour une période de retour de 50 ans

Dans la première phase de l'étude, un modèle hydraulique a été élaboré afin de simuler une crue correspondant à une période de retour de **50 ans**, représentant ainsi des inondations à probabilité de récurrence moyenne sur une échelle temporelle. Ce scénario a été retenu dans le but d'identifier les zones susceptibles d'être inondées lors d'un événement de crue modérée.

Les résultats de cette simulation ont permis de représenter avec précision le comportement de l'écoulement et la répartition des eaux le long des différentes sections du oued KSOB, ce qui a conduit à l'élaboration d'une **carte préliminaire des zones à risque**. Cette carte a facilité la localisation des points critiques ainsi que des secteurs résidentiels ou infrastructures nécessitant des mesures de protection

immédiates ou une révision des plans d'aménagement urbain.

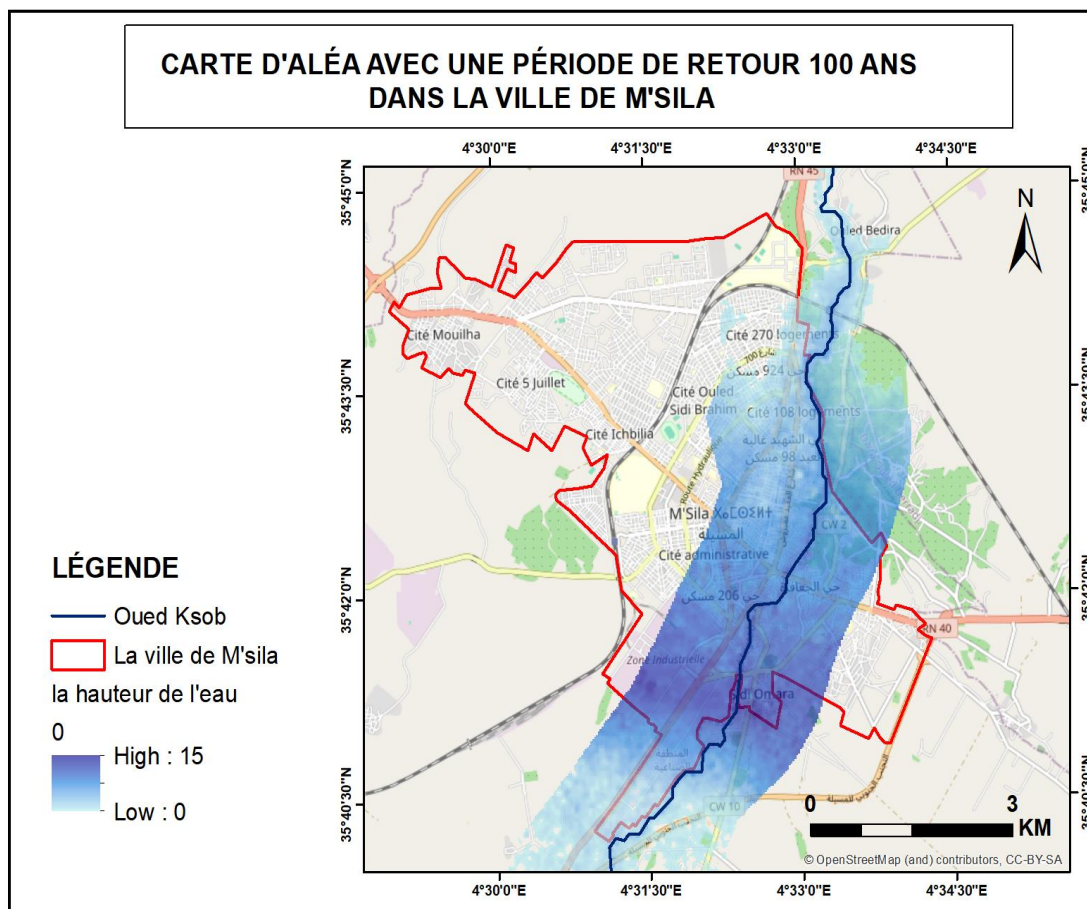
Carte 13: Carte d'aléa avec une période de retour 50 ans dans la ville de M'sila



2.2. Modélisation du scénario d'inondation pour une période de retour de 100 ans

Dans une phase complémentaire de l'étude, un scénario plus extrême a été adopté, correspondant à une crue avec une période de retour de **100 ans**, reflétant un événement rare mais plausible, en particulier dans le contexte des changements climatiques et de l'expansion urbaine non maîtrisée.

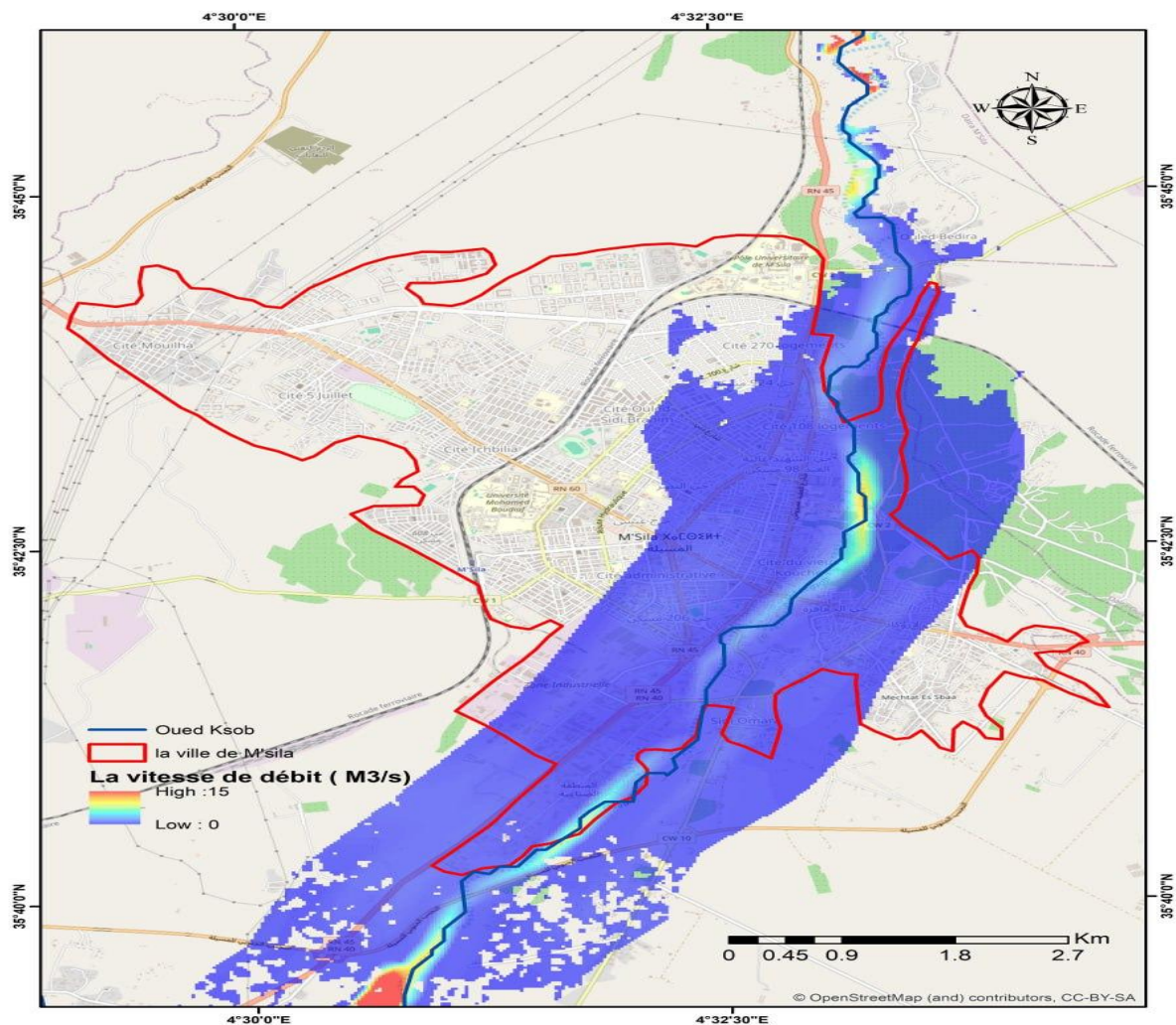
Carte 14: Carte d'aléa avec une période de retour 100 ans dans la ville de M'sila



La ville de M'Sila est fortement exposée au risque d'inondation, en particulier en cas de crue centennale du oued Ksob, correspondant à une période de retour de 100 ans. L'analyse cartographique révèle que plusieurs quartiers urbains se situent dans des zones de forte vulnérabilité, où la hauteur d'eau peut atteindre jusqu'à 15 mètres. Cette situation représente une menace significative pour la population, les infrastructures essentielles ainsi que pour les activités économiques implantées dans les zones concernées.

Cette modélisation a permis de représenter la situation maximale possible d'élévation des eaux d'inondation, aboutissant à une **carte détaillée des risques** qui met en évidence avec précision les zones susceptibles d'être inondées, ainsi que les niveaux d'eau et la vitesse d'écoulement. Ces résultats constituent un outil indispensable pour soutenir la prise de décision dans le cadre de la planification régionale, la protection des infrastructures critiques, et l'élaboration de stratégies efficaces d'atténuation des impacts des catastrophes naturelles.

Carte 15: la carte de la vitesse d'eau dans l'oued ksob pendant la crue



Après la modélisation de l'inondation exceptionnelle du oued KSOB à l'aide du logiciel HEC-RAS, nous avons procédé à l'exportation des résultats vers le logiciel SIG ArcMap. Cette étape a permis d'intégrer les données hydrauliques dans un environnement géographique performant, facilitant ainsi la visualisation spatiale des phénomènes d'inondation.

Grace à cette intégration, nous avons pu générer une carte précise et détaillée du risque d'inondation, mettant en évidence non seulement les zones inondées, mais aussi les niveaux d'eau atteints en différents points du cours d'eau. Cette cartographie fine est essentielle pour une meilleure compréhension de l'étendue et de la profondeur des inondations, ainsi que pour l'aide à la prise de décision dans les domaines de la gestion des risques, de l'aménagement du territoire et de la protection des populations.

3. Les zones exposées au risque d'inondation dans la ville de M'sila :

À partir de l'historique des crues de l'oued Ksob et de l'analyse des cartes d'impact des inondations exceptionnelles, il est essentiel de mettre en évidence les quartiers les plus vulnérables aux risques d'inondation à l'intérieur de la ville de M'sila.

Les quartiers **El Kouche** et **El Argoub** sont les zones les plus exposées. Leur situation géographique sur des terrains bas, proches du lit de l'oued Ksob, fait que ces quartiers subissent régulièrement les débordements de l'oued, comme l'attestent les graves inondations historiques (notamment celles de 1982, 1994 et 2007). Ces inondations ont causé des pertes humaines, la destruction de dizaines de maisons, et un grand nombre de sinistrés.

En revanche, les quartiers situés en altitude ou sur des terrains plus élevés, tels que **le centre-ville** et les quartiers comme **Cité Mouliha**, sont moins exposés ou ne subissent que des inondations localisées, souvent dues à une mauvaise urbanisation sur des plaines inondables.

La morphologie du lit de l'oued Ksob, qui peut atteindre jusqu'à 10 mètres de profondeur et 50 à 60 mètres de largeur dans certains secteurs, joue un rôle clé dans la dynamique des inondations. Cette configuration naturelle permet en général un écoulement important, limitant l'impact des crues aux zones basses et aux plaines inondables adjacentes.

Table 15: Historique des crues dans la ville de M'sila.

La date	Localisation	Pertes	Précipitations (mm) et durée	Phénomènes
10 Mai 1982	El kouche et El Argoub	2 Morts, 6 Maison démolis et 30 SDF	60mm pendant 4 heures	Débordement de l'oued Ksob
20 Octobre 1982	El kouche et El Argoub	9 Maison démolis et 51 SDF	31mm pendant 11 heures	Débordement de l'oued Ksob
29 Octobre 1982	El kouche et El Argoub	7 Maison démolis et 41 SDF	22.3mm pendant 8heures	Débordement de l'oued Ksob
11 Octobre 1991	Centre-ville de M'sila	/	25.2mm pendant 10 heures	Inondation de plaine
23 Septembre 1994	El kouche et El Argoub	1 Mort,251 Maison démolis et 810 SDF	110mm pendant 9heures	Débordement de l'oued Ksob
13 et 14 Septembre 2006	Jnan el Wali et ses environs	17 Familles sinistrées et plusieurs entreprises public endommagées		Débordement de l'oued Ksob
23 Septembre 2007	El kouche et El Argoub	20 Morts	/	Débordement de l'oued Ksob
12 Octobre 2007	Cité Mouliha	20 Milliards de centimes de dégâts		Urbanisation sur plaine inondable

Source : Direction de la protection civile de la commune de M'sila

Figure 44: M^{rs}ila (EL ARGOUBE, 2021)



Figure 45: M^{rs}ila (zone d'extension, 2021)



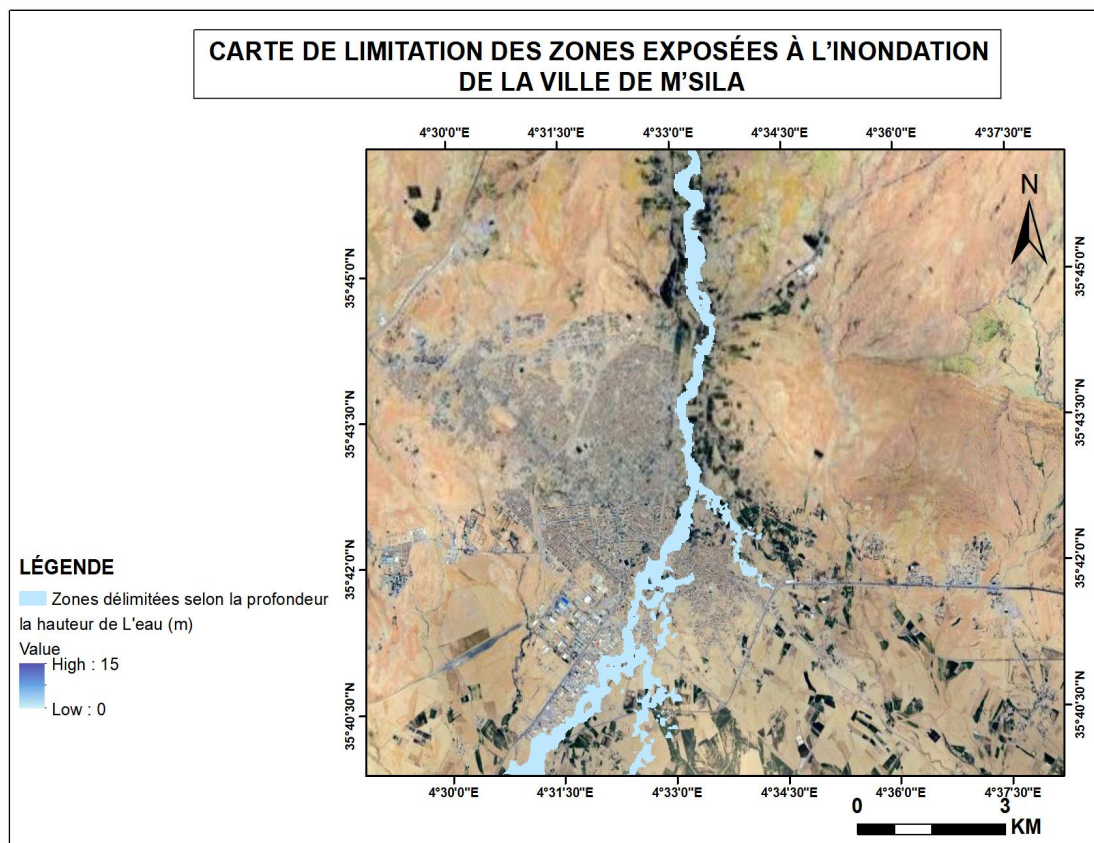
Figure 46:M “sila (siège de la wilaya, centre ville, 2021).



Figure 47:M“sila (EL KOUICHE, 2021)



Carte 16: carte de limitation des zones exposées à l'inondation de la ville de M'sila



4. Vulnérabilité des quartiers exposés au phénomène d'inondation

La vulnérabilité des quartiers exposés aux inondations dans la ville de M'sila se manifeste par plusieurs facteurs urbanistiques, sociaux et environnementaux. Les quartiers comme **El Kouche** et **El Argoub** présentent une sensibilité particulière en raison de leur position topographique basse, la mauvaise qualité des infrastructures, la densité de population élevée et l'absence ou l'insuffisance du réseau de drainage des eaux pluviales.

Les habitations précaires, souvent construites de manière informelle, augmentent le risque d'effondrement ou de dégâts matériels graves en cas de crue. De plus, le manque d'équipements publics adaptés (centres de secours, routes praticables, systèmes d'alerte) accentue la fragilité de ces zones face aux catastrophes hydrologiques.

Table 16: Niveau de vulnérabilité des quartiers exposés aux inondations

Élément	Quartier El Kouche	Niveau de vulnérabilité	Quartier El Argoub	Niveau de vulnérabilité
Densité de population	180 hab./ha	5	165 hab./ha	4
Équipements importants	Centre de santé principal	4	Centre de jeunesse municipal	3
État des logements	Moyen (détérioration partielle)	4	Mauvais (bidonvilles)	5
Terres agricoles	Limitée	3	Presque inexistante	2
État des routes	Bon (réfection récente)	3	Mauvais (bordures non aménagées)	6
Réseau de drainage des eaux pluviales	Incomplet	5	Inexistant	6
Niveau de vulnérabilité	Vulnérabilité moyenne	4,2	Vulnérabilité élevée	5,1

Table 17: la classification des niveaux de vulnérabilité

Niveau de vulnérabilité	Échelle
Faible vulnérabilité	de 1 à 2
Vulnérabilité moyenne	de 3 à 4
Forte vulnérabilité	de 5 à 6

Le quartier **El Kouche** présente certains signes de dégradation, mais dispose d'infrastructures et de services de base acceptables, ce qui le place dans une situation de vulnérabilité *moyenne* (4,2).

En revanche, le quartier **El Argoub** souffre d'un manque d'infrastructures essentielles, de logements précaires et d'une absence totale de drainage, ce qui le classe dans une situation de vulnérabilité *élevée* (5,1).

Comparé aux autres quartiers de M'Sila, El Argoub est l'un des plus vulnérables et nécessite une intervention urgente.

5. Carte de vulnérabilité:

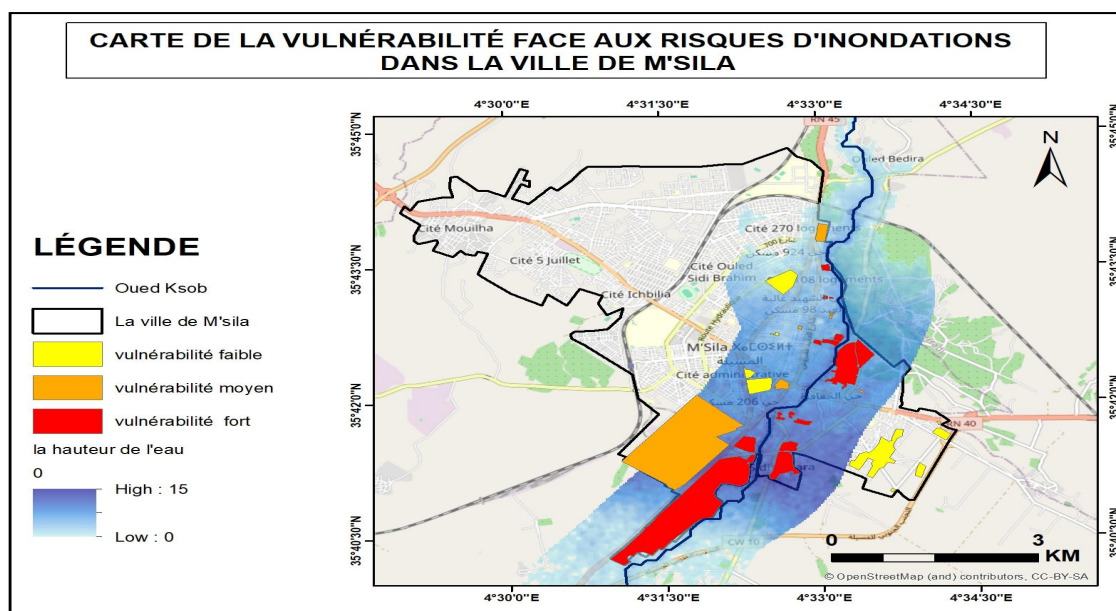
Après avoir évalué la vulnérabilité des quartiers à travers le tableau précédent, nous avons pu la transformer en une carte illustrant le degré de vulnérabilité des quartiers.

Le **quartier El Argoub** représente la zone la plus exposée au risque dans la ville de M'Sila. Cette exposition est due à une **vulnérabilité élevée (5,1)**, résultant de logements précaires, de routes dégradées et de l'absence totale de réseau de drainage des eaux pluviales, combinée à une **position topographique basse** qui accroît la probabilité d'inondation.

Selon la matrice de risque, El Argoub est ainsi classé dans la **catégorie de risque élevé**.

Quant au **quartier El Kouche**, bien qu'il soit exposé à un phénomène d'inondation intense, sa vulnérabilité moyenne le place dans une **catégorie de risque moyen à élevé**.

Carte 17: carte de la vulnérabilité face aux risques d'inondation dans la ville de M'sila



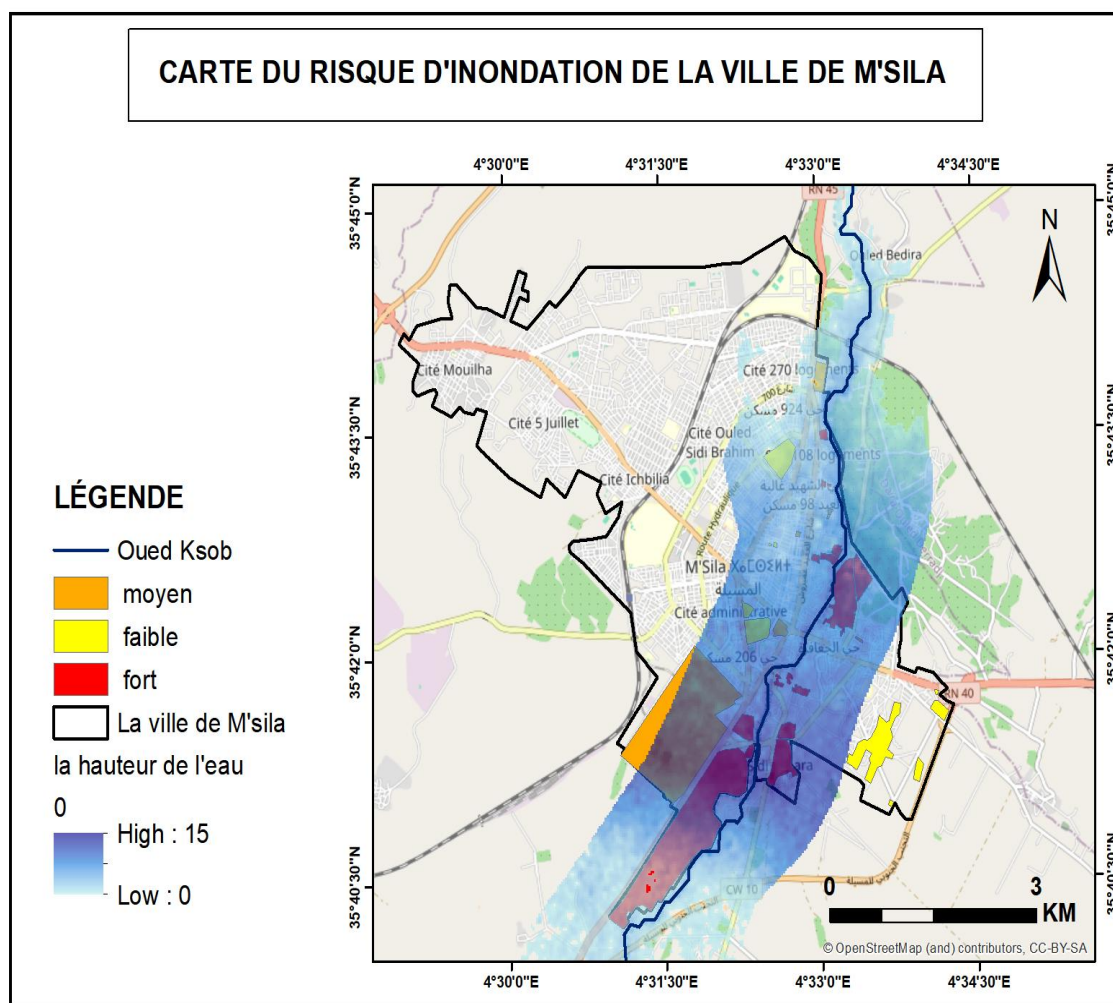
6. Carte du risque :

Elle résulte de l'intersection entre le phénomène et la vulnérabilité des enjeux.

Table 18: Matrice de risque d'inondation

Phénomène d'inondation	Vulnérabilité faible	Vulnérabilité moyenne	Vulnérabilité forte
Faible	Faible	Faible	Moyenne
Moyen	Faible	Moyenne	Élevée
Élevé	Moyenne	Élevée	Élevée

Carte 18: carte de risque



Le quartier El Argoub constitue la zone la plus vulnérable aux risques d'inondation dans la

ville de M'Sila, en raison de sa position topographique basse, de la faiblesse de ses infrastructures, ainsi que de la forte densité de sa population, qui complique les opérations d'évacuation. En revanche, le quartier El Kouche présente une vulnérabilité moindre, malgré une exposition modérée au risque d'inondation, grâce à la présence de certaines infrastructures de base.

Les autres quartiers de la ville affichent des niveaux de risque variables, principalement liés à leur altitude relative et à la qualité de leurs équipements urbains. Ainsi, les zones situées en altitude et dotées de réseaux efficaces de drainage sont moins exposées, tandis que les quartiers nouvellement urbanisés ou informels, situés à proximité des cours d'eau, présentent un risque accru.

En conclusion, le quartier El Argoub nécessite une intervention urgente et prioritaire, tandis que les autres secteurs requièrent des mesures préventives et une planification urbaine rigoureuse afin de réduire leur vulnérabilité.

7. Analyse du risque d'inondation et renforcement de la résilience urbaine à M'Sila : une approche intégrée et multidimensionnelle

La ville de M'Sila, localisée dans le bassin hydrographique de l'oued Ksob (région de Hodna) et encadrée par les massifs de l'Atlas tellien et saharien, est exposée à des risques élevés d'inondations rapides et de crues soudaines, phénomènes accentués par des épisodes pluviométriques extrêmes. Cette vulnérabilité est aggravée par une urbanisation accélérée, une pression accrue sur les infrastructures hydrauliques et urbaines, ainsi que par les effets du changement climatique modifiant les régimes hydrologiques.

À partir d'une étude exhaustive combinant modélisation hydrologique et hydraulique, analyse spatiale des zones inondables, et évaluation des vulnérabilités socio-économiques, cette recherche propose un cadre stratégique d'interventions visant à réduire l'exposition et la sensibilité aux risques d'inondation. Les solutions intégrées présentées englobent la planification urbaine adaptative, la mise en place d'infrastructures vertes et bleues résilientes, le renforcement des systèmes d'alerte précoce, ainsi que l'implication des acteurs locaux dans la gouvernance des risques.

Cette démarche multidimensionnelle aspire à améliorer la capacité de la ville à anticiper, gérer et se relever des événements hydrométéorologiques extrêmes, dans une perspective de développement urbain durable et résilient

7.1. Interventions structurelles et organisationnelles immédiates

7.1.1. Intégration de la gestion des risques d'inondation dans la planification urbaine

- Cartographie précise des zones inondables à l'aide de modélisations hydrologiques et hydrauliques avancées.
- Application stricte des règlements de construction et interdiction de bâtir dans les zones à haut risque.
- Planification directrice du développement orientée vers des zones surélevées à faible risque.

7.2. Donner plus d'espace à l'eau (approche écologique - villes éponges)

7.2.1. Création et extension de bassins de rétention, notamment le bassin de l'oued Lakmane.

7.2.2. Développement d'infrastructures vertes et bleues telles que:

- Parcs inondables
- Toitures végétalisées et fossés de biosorption
- Revêtements perméables
- Restauration des cours d'eau et végétalisation des berges

7.3. Protection des infrastructures critiques

- Surélévation ou protection des installations vitales (stations d'épuration, équipements électriques).
- Révision et modernisation des réseaux d'évacuation avec séparation des eaux pluviales et usées.
- Installation de stations de pompage d'urgence dans les points bas.

7.4. Conception de logements adaptés au risque

- Utilisation de matériaux hydrofuges, surélévation des accès, membranes d'étanchéité.
- Architecture adaptative : rez-de-chaussée non résidentiels avec issues de secours aux étages.

7.5. Espaces intelligents pour la gestion de crise

- Centre intégré de gestion des urgences (EOC) avec coordination interinstitutionnelle.
- Plan de reconstruction durable basé sur le principe du « Build Back Better »

8. Renforcement de la résilience urbaine (mesures non structurelles)

8.1. Amélioration des systèmes d'alerte et de prévision

- Réseau local de surveillance (pluviomètres, jauges reliées à un système centralisé).
- Modélisation en temps quasi réel pour la prévision des crues.
- Système d'alerte multicanal : SMS, applications, sirènes, haut-parleurs, etc.

8.2. Entretien et adaptation des infrastructures existantes

- Programmes d'entretien préventif (nettoyage des oueds et canaux).
- Renforcement des ponts et ouvrages hydrauliques existants.
- Amélioration du réseau pluvial et création de nouveaux collecteurs.

8.3. Cadre législatif, gouvernance et financement

- Mise à jour des lois en matière d'urbanisme, eau et gestion des catastrophes.
- Planification intégrée à l'échelle du bassin versant et coopération intercommunale.
- Financement durable des projets de prévention, entretien et alerte.
- Promotion des systèmes d'assurance contre les inondations.

Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a mis en évidence le rôle fondamental de la modélisation hydrologique et hydraulique dans la compréhension des dynamiques d'inondation et l'évaluation des risques dans la ville de M'sila. Grâce à l'intégration d'outils performants tels que HEC-HMS, HEC-RAS et les Systèmes d'Information Géographique (SIG), il a été possible de localiser avec précision les zones les plus vulnérables, notamment les quartiers de Kouch et d'El Arkoube, fortement exposés dans les scénarios de crues extrêmes. L'analyse de la vulnérabilité a permis de souligner l'importance de facteurs comme la densité de population, l'état des infrastructures et la fragilité du bâti dans la variation des niveaux de risque. Ces résultats ont conduit à la proposition d'une série de recommandations stratégiques articulées autour de trois axes majeurs : des interventions urgentes sur les infrastructures, l'adoption de solutions durables (telles que le concept de « ville éponge ») et le renforcement de la gouvernance locale à travers une meilleure coordination institutionnelle et la création de mécanismes de financement pérennes. Par ailleurs, cette étude propose une méthodologie reproductible pour d'autres zones à risques similaires, en soulignant que la gestion des inondations ne peut être efficace qu'à travers une approche intégrée combinant ingénierie, aménagement urbain et engagement communautaire, dans une logique de résilience face aux changements climatiques.

Conclusion générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre des efforts scientifiques visant à comprendre et analyser le risque d'inondation dans la ville de M'sila, à travers une approche méthodologique intégrée combinant étude théorique, analyse géonaturelle, traitement statistique des données climatiques et modélisation numérique avancée.

Dans un premier temps, nous avons établi un socle conceptuel solide en explorant les notions fondamentales liées aux risques, à la résilience et à la gestion de crise, offrant ainsi une grille de lecture cohérente de la problématique des inondations dans un cadre global et systémique.

Par la suite, l'étude approfondie des caractéristiques naturelles du bassin versant secondaire de l'oued El-Ksob a permis de mieux cerner les dynamiques physiques influençant le comportement hydrologique du territoire. Les données géomorphologiques, géologiques et topographiques analysées ont constitué une base scientifique rigoureuse pour toute modélisation future et pour l'anticipation des scénarios extrêmes.

Cette analyse a été enrichie par une étude statistique des précipitations journalières maximales, révélant une variabilité notable du régime pluviométrique et soulignant l'exposition croissante du territoire aux événements climatiques extrêmes. Ces résultats renforcent la pertinence de l'intégration de données fiables dans les outils de gestion des risques.

Enfin, l'apport de la modélisation hydrologique et hydraulique à l'aide des logiciels HEC-HMS, HEC-RAS et des Systèmes d'Information Géographique a permis de localiser avec précision les zones les plus vulnérables de la ville, notamment les quartiers de Kouch et d'El Arkoub. Sur cette base, nous avons formulé des recommandations stratégiques articulées autour de la réhabilitation des infrastructures, de l'adoption de solutions innovantes telles que le concept de « ville éponge » et du renforcement de la gouvernance locale.

Ce travail ne se limite pas à un simple diagnostic, mais ouvre des perspectives pour la mise en place de politiques publiques durables et résilientes, prenant en compte les défis du changement climatique et de l'urbanisation rapide. La résilience urbaine, à travers une approche intégrée et participative, doit désormais être au cœur de la planification future de la ville de M'sila.

Liste des références bibliographiques

Liste des références bibliographiques

1. Ouvrages (Livres et chapitres de livres)

- Ballais, J. L. (2005). **Géomorphologie et environnement**. Paris : Armand Colin.
- Blin, M. (2001). **La vulnérabilité aux risques naturels : approche et modélisation**. Paris : L'Harmattan.
- Lambert, J. (2006). **Morphologie fluviale et crues : dynamique des lits majeurs**. Paris : Dunod.
- Ledoux, B. (2006). **Comprendre le risque inondation pour mieux le prévenir**. Paris : Lavoisier.
- Masson, A. (1996). **Les lits des rivières : morphologie et occupation humaine**. Bordeaux : Éditions Sud-Ouest.
- Salomon, J. N. (1997). **L'eau et les catastrophes naturelles**. Paris : Economica.

2. Mémoires et thèses universitaires

- Chachoua, M. (2010). **Modélisation probabiliste des crues en milieu semi-aride : application aux oueds algériens**. Thèse de doctorat, Université USTHB, Alger.
- Gullouh, A. (2017). **Analyse des inondations urbaines en zone semi-aride : cas de la wilaya de M'sila**. Mémoire de Master, Université de M'sila.
- Merabet, A. (2006). **Les facteurs aggravants des inondations en Algérie : diagnostic et pistes de prévention**. Mémoire de Magister, Université de Batna.
- Yahiaoui, K. (2012). **Stratégies de prévention des inondations en milieu urbain en Algérie**. Mémoire de Magister, Université de Blida.

3. Articles scientifiques / revues spécialisées

- Boubchir, A. (2007). **La gestion des inondations en Algérie : étude de cas et analyse critique**. Revue des Sciences de l'Environnement, 3(2), 45–62.
- Degoutte, G. (2012). **Les ripisylves : rôles écologiques et gestion**. Revue Forêt Méditerranéenne, 33(1), 11–18.
- Guerbi, A., & Abdelkebir, B. (2017). **Histoire des grandes inondations en Algérie**. Revue des risques et des catastrophes, 5(1), 24–40.

4. Documents institutionnels (rapports, études, lois)

- Direction Générale de la Protection Civile. (2024). **Rapport annuel des interventions en cas d'inondation – période 1990–2023**. Ministère de l'Intérieur.

Liste des références bibliographiques

- ANRH – Agence Nationale des Ressources Hydrauliques. (2022). *Inventaire des bassins versants en Algérie – Rapport technique n°05 : Bassin du Hodna*.
- URBAS M'sila. (2015). *Étude de vulnérabilité aux inondations dans la commune de M'sila*. Rapport interne.
- République Algérienne Démocratique et Populaire. (2024). *Loi n° 24-04 du 26 février 2024 portant sur les règles de prévention, d'intervention et de réduction des risques de catastrophes dans le cadre du développement durable*. Journal Officiel de la République Algérienne.
- Ministère des Ressources en Eau. (2023). *Plan national de prévention des risques d'inondation*.
- Office National de la Météorologie. (2023). *Statistiques climatiques : précipitations extrêmes 2000–2022*.

5. Logiciels et outils techniques

- US Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS River Analysis System – Version 6.0*. Hydrologic Engineering Center. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>
- US Army Corps of Engineers. (2020). *HEC-HMS Hydrologic Modeling System – User's Manual Version 4.9*. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hechms/>
- ESRI. (2020). *ArcGIS Desktop: Release 10.8*. <https://www.esri.com/>
- Centre d'expertise hydrique du Québec. (2004). *HYFRAN : Manuel d'utilisation, version 2.0 – Logiciel d'analyse fréquentielle en hydrologie*. Québec : Ministère de l'Environnement, Direction de l'expertise hydrique.

6. Sources web et figures en ligne

- PPRI Sud-Est Vendée. (2021). *Figures et schémas de vulnérabilité*. <https://ppri-sudest-vendee.fr>
- Google Images. (2024). *Illustrations de crues et d'inondations*. <https://images.app.goo.gl/>