

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen

Faculté de TECHNOLOGIE

Département d'HYDRAULIQUE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER En :

Hydraulique

Spécialité : Hydraulique urbaine

Par :

HAMMADI Fatma

Cartographie des risques d'inondation à l'échelle d'un bassin versant à l'aide de la méthode FIGUSED : Cas de l'oued Mekerra (NW algérien).

Soutenue publiquement, le 19 / 06 /2024, devant le jury composé de :

Mme. BABA- HAMED Kamila	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrante
M. BOUANANI Abderrazak	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadrant
Mme. CHERRAF Amina	MCB	Université de Tlemcen	Présidente
Mme. FANDI Wassila	MAA	Université de Tlemcen	Examinatrice

Année universitaire 2024 /2025

Remerciements

Je remercie Allah le Tout-Puissant, pour le soutien inestimable et la force qu'il m'a accordés tout au long de mon parcours d'étude.

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et ma reconnaissance à ma chère encadrante, Professeure **BABA-HAMED Kamila**, pour sa disponibilité, son encadrement rigoureux et bienveillant, ainsi que pour la qualité de ses conseils. Son engagement constant, sa patience et sa rigueur scientifique ont été des piliers essentiels dans l'aboutissement de ce travail. Ce fut pour moi un grand privilège de bénéficier de son expertise et de son accompagnement.*

*Je remercie également mon co-encadreur, Professeur **BOUANANI Abderrazak**, pour ses orientations pertinentes, ses remarques constructives et la clarté de ses explications. Son apport intellectuel a grandement enrichi ce mémoire, et je lui suis profondément reconnaissante.*

*Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury, **CHERRAF Amina** Maître de conférences et **FANDI Wassila** Maître assistante, pour l'honneur qu'elles me font en acceptant d'évaluer ce travail. Leur regard critique, leurs suggestions et leurs remarques sont pour moi une source précieuse d'enrichissement.*

*Je n'oublie pas d'exprimer toute ma reconnaissance à Mlle **BOUSSAIDI Manel** et M. **CHACHOUA Abdeljalil**, qui ont généreusement partagé avec moi leur expérience et m'ont soutenu par leurs conseils pratiques au moment où j'en avais le plus besoin. Leur aide m'a été d'un grand secours.*

*Je souhaite également exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur le Chef du Département **BENADDA Lotfi**, pour la qualité de l'organisation pédagogique et pour son engagement envers les étudiants. Sa disponibilité et son sens du service ont contribué à créer un environnement propice à l'apprentissage et à la réussite.*

J'adresse aussi mes remerciements les plus respectueux à l'ensemble des enseignants du parcours Hydraulique, qui m'ont transmis, avec passion et rigueur, les connaissances et les compétences nécessaires dans ce domaine exigeant. Leurs efforts pédagogiques et leur accompagnement tout au long de ces années ont grandement contribué à ma formation.

*Enfin, je souhaite adresser mes chaleureux remerciements à l'ensemble de mes collègues de la **promotion Hydraulique Urbaine**, avec qui j'ai partagé des moments précieux tout au long de notre parcours. Leur camaraderie, leur soutien et leur esprit d'équipe ont grandement contribué à rendre cette aventure humaine plus riche et plus agréable. Je leur souhaite à tous une réussite éclatante, tant sur le plan professionnel que personnel.*

Dédicaces

***J**e dédie ce travail*

À la mémoire de ma chère mère, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Son amour inconditionnel, ses prières constantes et ses encouragements tout au long de sa vie ont été ma lumière et ma force. Même en son absence physique, sa voix continue de résonner dans mon cœur, me guidant et m'inspirant chaque jour. C'est en pensant à elle que j'ai trouvé le courage d'avancer et d'atteindre cette étape importante.

À mon père bien-aimé, dont le soutien indéfectible, les sacrifices silencieux et la présence rassurante m'ont accompagné à chaque pas. Je lui suis profondément reconnaissante pour sa sagesse, sa patience et son amour. Que Dieu lui accorde une longue vie, une santé florissante et toute la paix qu'il mérite.

À ma tante maternelle, dont les mots d'encouragement, la générosité de cœur et le soutien affectueux m'ont porté, malgré la distance géographique. Sa tendresse et sa bienveillance m'ont toujours réconforté. Que Dieu la protège et veille sur elle.

À mes tantes paternelles, pour leur gentillesse constante, leur affection sincère et leur présence réconfortante dans ma vie. Elles ont su créer autour de moi une atmosphère d'amour familial et de soutien, que j'estime profondément. Que Dieu les bénisse et les garde.

À ma sœur jumelle Hadjer, ma complice de toujours, qui partage mes joies, mes peines et mes espoirs. Son soutien moral, sa patience et son écoute attentive m'ont été d'un grand réconfort. Je lui souhaite un avenir radieux, rempli de bonheur et de succès.

À mes frères Hassan et Mohamed, qui, chacun à sa manière, m'ont toujours entouré d'amour, de respect et d'encouragement. Leur présence à mes côtés a été essentielle pour surmonter les épreuves et partager les moments de joie.

À mes chers cousins, ces rayons de soleil dans ma vie, qui ne manquent jamais une occasion d'alléger mon quotidien par leur joie de vivre, leur humour et leur attachement sincère. À vous tous, je dis du fond du cœur : je vous aime, et je vous remercie pour cette belle énergie que vous m'apportez.

HAMMADI Fatma

Résumé

Les inondations représentent des phénomènes naturels ou anthropiques potentiellement dangereux, engendrant des dégâts considérables, notamment lorsqu'elles résultent de fortes précipitations combinées à des caractéristiques topographiques particulières.

Ce travail vise à étudier les risques d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Mekerra, situé dans le Nord ouest de l'Algérie, au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès. Ce bassin couvre une superficie d'environ 3616 km² et se divise en trois sous-bassins : le Mekerra amont, le Mekerra moyen et le Mekerra aval. Il prend sa source dans les hauteurs de Ras El Ma. Le bassin se caractérise par un climat semi-aride et un relief montagneux qui favorisent un ruissellement rapide et concentré vers le lit de l'oued, notamment en raison de pentes marquées et d'altitudes variant entre 470 m et 1700 m dans les montagnes du Djebel Tessala. Cette configuration topographique accentue le risque de crues soudaines et intenses.

Pour évaluer ces risques, nous avons adopté la méthode FIGUSED, qui intègre plusieurs paramètres tels que l'accumulation des flux, la géologie, l'occupation du sol, l'intensité des précipitations, la pente, ainsi que la proximité du réseau hydrographique. L'analyse spatiale a été réalisée à l'aide du logiciel Arcgis, permettant ainsi de cartographier les zones les plus vulnérables aux inondations.

Les différentes couches d'information ont été analysées et pondérées à l'aide de la méthode FIGUSED pour produire une carte de risque classant les zones en six niveaux : critique, très élevé, élevé, modéré, faible et très faible.

Les résultats obtenus ont permis de localiser les secteurs à haut risque, notamment dans les zones densément urbanisées et proches du lit majeur de l'oued. Ces informations sont essentielles pour orienter les politiques d'aménagement, de protection civile et de sensibilisation de la population face au danger d'inondation.

Mots clés : Sidi Bel Abbès, Oued Mekerra, crue, risques d'inondation, Cartographie, méthode FIGUSED.

Abstract

Floods are natural events or anthropiques, and they can create serious dangers, often leading to significant destruction, especially when heavy rainfall meets certain geographical features.

This study focuses on evaluating flood risks in the Oued Mekerra watershed, which is situated in northwestern Algeria, close to the city of Sidi Bel Abbès. Covering an area of about 3616km², this watershed is split into three sub-basins: Upper Mekerra, Middle Mekerra, and Lower Mekerra. Its origins are found in the highlands of Ras El Ma. The region experiences a semi-arid climate and has a mountainous landscape, which leads to quick and concentrated surface runoff towards the riverbed, particularly because of the steep slopes and elevation variations ranging from 470 m to 1700 m in the Djebel Tessala Mountains. This configuration topography greatly heightens the risk of sudden and severe flooding.

To assess these risks, we have adopted the FIGUSED method. This technique combines various factors, such as flow accumulation, geology, land use, rainfall intensity, slope, as well as the proximity of the hydrographic network. They conducted spatial analysis with Arcgis software, which helped in mapping out the area's most susceptible to flooding.

The various information layers were analyzed and weighted using the FIGUSED method to produce a risk map classifying the areas into six levels: critical, very high, high, moderate, low, and very low.

The results made it possible to identify high-risk areas, particularly in densely urbanized zones and those located near the main riverbed of the Wadi. This information is essential for guiding land-use planning policies, civil protection strategies, and public awareness efforts in the face of flood hazards.

Keywords: Sidi Bel Abbès, Oued Mekerra, flood, flood risk, mapping, FIGUSED method.

ملخص

تمثل الفيضانات ظواهر طبيعية أو بشرية المنشأ قد تكون خطيرة، حيث تُحدث أضرار وخيمة، قد تكون ناتجة عن هطول أمطار غزيرة متزامنة مع خصائص طبوغرافية معينة. يهدف هذا البحث إلى دراسة مخاطر الفيضانات ضمن حوض وادي ميكيرا الواقع في شمال غرب الجزائر، وتحديدًا على مستوى مدينة سيدي بلعباس. يمتد هذا الحوض على مساحة تُقدَّر بحوالي 3616 كم²، ويتكوّن من ثلاثة أحواض فرعية: حوض ميكيرا العلوي، ميكيرا الأوسط، وميكيرا السفلي. ينبع الوادي من مرتفعات رأس الماء، ويتميز بمناخ شبه جاف وتضاريس جبلية تُعزز من سرعة الجريان وتركيزه في قاع الوادي، وذلك بسبب الانحدارات الشديدة والارتفاعات التي تتراوح بين 470 و1700 متر في سلسلة جبال تسالة. تسهم هذه الخصائص الطبوغرافية في زيادة احتمال وقوع فيضانات مفاجئة وعنيفة.

ولغرض تقييم هذه المخاطر، تم اعتماد منهجية تعتمد على تحليل عدة معايير، منها تراكم الجريان، طبيعة التربة والجيولوجيا، استخدامات الأراضي، كثافة التساقطات، الانحدارات، وقرب المواقع من الشبكة الهيدرولوجية. تم تنفيذ التحليل المكاني باستخدام برنامج الأركجيس من خلال تطبيق طريقة فيقوساد فيه مما أتاح إعداد خريطة دقيقة تبرز المناطق الأكثر عرضة للفيضانات. تم تحليل وتقييم الطبقات المختلفة من المعلومات باستخدام طريقة فيقوساد لإنتاج خريطة للمخاطر تصنف المناطق إلى ستة مستويات: حرجة، عالية جدًا، عالية، متوسطة، ضعيفة، ضعيفة جدًا.

وقد مكنت النتائج المحصل عليها من تحديد المناطق ذات الخطورة العالية، لا سيما في المناطق الحضرية الكثيفة والقريبة من مجرى الوادي الرئيسي. تعد هذه المعلومات ضرورية لتوجيه سياسات التخطيط، والحماية المدنية، وتوعية السكان بمخاطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية: سيدي بلعباس، وادي ميكيرا، فيضانات، مخاطر الفيضانات، رسم الخرائط، طريقة فيقوساد.

Table des matières

Remerciements	
Dédicaces	
Résumé	
Table des matières	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1

Chapitre 1 : les inondations : typologie, risques et stratégies de gestion

I. Introduction.....	3
I.1. Causes des inondations.....	3
I.2. Causes et types d'inondations catastrophiques en Algérie.....	4
▪ Causes météorologiques.....	4
▪ Causes anthropiques.....	4
▪ Causes topographiques.....	4
▪ Les inondations causées par des crues torrentielles.....	4
▪ Les inondations des grands bassins versants.....	5
I.3. Risques majeurs liés aux inondations.....	5
I.3.1. Risques naturels ou environnementaux.....	5
- Perte de biodiversité.....	5
❖ Dégradation des écosystèmes.....	6
❖ Pollution des sols et des eaux.....	6
❖ Érosion et affaissement des sols.....	6
I.3.2. Risques humains.....	6
❖ Pertes en vies humaines.....	6
❖ Propagation de maladies.....	6
❖ Souffrance psychologique.....	7

I.3.3. Risques matériels et économiques.....	7
❖ Pertes économiques directes.....	7
❖ Dommages aux infrastructures.....	7
❖ Atteinte aux secteurs productifs.....	7
I.3.4. Risques sociaux et logistiques.....	7
❖ Déplacements de population.....	7
❖ Perturbation des services essentiels.....	7
I.4. Incertitudes dans l'évaluation de l'Aléa.....	8
I.5. Evaluation de la vulnérabilité.....	8
I.6. Origine et nature des inondations.....	9
I.7. Inondations des plaines.....	9
I.8. Conclusion.....	10

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

II. Introduction.....	11
II.1. Présentation de la zone d'étude.....	11
II.2. Caractéristiques physiques du bassin versant.....	12
II.3 Caractéristiques physiques du bassin versant.....	12
II.3.1. Caractéristiques de forme.....	12
II.3.1.1. Coefficient de compacité K_c	12
II.3.1.2. Rectangle équivalent.....	13
II.3.2. Etude de relief.....	13
II.3.2.1. Courbe hypsométrique.....	13
II.3.2.2. Altitudes caractéristiques.....	14
- L'altitude moyenne.....	14
- L'altitude la plus fréquente.....	14
- L'altitude de fréquence.....	14
II.3.2.3. Indice de pente (I_p).....	15
II.3.2.4. Indice de pente global (I_g).....	15
II.3.2.5. Dénivelée spécifique.....	15
II.3.2.6. Pente moyenne du bassin versant.....	16
II.3.3. Etude de quelques paramètres du réseau hydrographique.....	17

II.3.3.1. Densité de drainage (Dd).....	18
II.3.3.2. Fréquence des cours d'eau ou Densité hydrographique.....	18
II.3.3.3. Coefficient de Torrentialité.....	19
II.3.3.4. Temps de concentration.....	19
a- Formule de KIRPICH (1940)	19
b- Formule de CALIFORNIA.....	19
c- Formule de GIANDOTTI (1937)	19
II.3.3.5 Occupation du sol.....	20
II.4. Conclusion.....	22

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

III. Introduction.....	23
III.1. Etude de précipitations.....	24
III.1.1. Précipitation moyenne annuelles.....	24
III.1.1.1. Station de Haçaiba.....	24
III.1.1.2. Station de Sidi Bel Abbès.....	25
III.1.1.3. Station de Sidi Ali Benyoub.....	26
III.1.1.4. Station moyenne.....	27
III.1.2. Précipitations moyennes mensuelles.....	29
III.1.2.1. Station de Haçaiba.....	29
III.1.2.2. Station de Sidi Bel Abbès.....	30
III.1.2.3. Station de Sidi Ali Benyoub.....	31
III.1.2.4. Station moyenne.....	32
III.1.3. Précipitation moyenne saisonnières.....	33
III.1.3.1. Station de Haçaiba.....	33
III.1.3.2. Station de Sidi Bel Abbès.....	34
III.1.3.3. Station de Sidi Ali Benyoub.....	35
III.1.3.4. Station moyenne.....	36
III.2. Etude des températures.....	36
III.2.1. Variation des températures moyennes interannuelles.....	37
III.2.1.1. Station de Haçaiba.....	37
III.2.1.2. Station de Sidi Bel Abbès.....	38

III.2.1.3. Station de Sidi Ali Benyoub.....	39
III.2.2. Variation des températures moyennes mensuelles.....	40
III.2.3. Variation des températures moyennes saisonnières.....	41
III.3. Etude du climat.....	42
III.3.1. Courbe pluviothermique.....	42
III.3.2. Indice d'aridité de De Martonne.....	44
III.4. Etude des débits.....	45
III.4.1 Variation interannuelle des débits.....	46
III.4.2. Variation des débits moyens mensuels.....	47
III.4.3. Variation des débits moyens saisonniers.....	48
III.4. 4. Corrélation pluie-débit au niveau de la Mékerra.....	49
III.5. Conclusion.....	50

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

IV. Introduction.....	52
IV.1. Relation entre la cartographie et la modélisation dans la gestion des risques d'inondation.....	52
IV.1.1. Modélisation : outil d'analyse prédictive.....	52
IV.1.2. Cartographie : outil de communication et d'aide à la décision.....	53
IV.1.3. Une relation complémentaire et dynamique.....	53
IV.1.3.1. La modélisation comme base scientifique de la cartographie.....	53
IV.1.3.2. La cartographie comme outil de validation et d'appui au terrain.....	53
IV.1.3.3. Un processus itératif d'amélioration continue.....	53
IV.2. Méthodes de cartographie du risque d'inondation.....	54
IV.2.1. Méthode de cartographie utilisée au Canada-Québec.....	54
IV.2.2. Méthode américaine de cartographie du risque d'inondation.....	54
IV.2.3. Méthode d'inondabilité (France).....	55
IV.3. Outils utilisés pour l'aide à la cartographie du risque d'inondation.....	55
IV.3.1. Recours à la télédétection spatiale et aérienne.....	55
IV.3.2. Utilisation des modèles hydraulique et hydrologique.....	55
IV.3.3. Utilisation du système d'information géographique.....	56
IV.4. Le SIG, un outil stratégique pour la cartographie du risque d'inondation.....	57

IV.4.1. Composants d'un SIG.....	57
IV.4.2. Données dans un SIG.....	57
IV.4.2.1. Types de données dans un SIG.....	57
a- Données spatiales.....	58
b- Donnés attributaires.....	58
IV.4.2.2. Modes de représentation des données dans un SIG.....	58
a- Mode vecteur.....	58
b- Mode raster (ou trame).....	58
IV.4.2.3. Méthodes d'acquisition des données.....	58
a- Photogrammétrie aérienne.....	59
b- Images satellitaires (télédétection).....	59
c- Numérisation manuelle (digitalisation).....	59
d- Numérisation automatique (scannage électronique)	59
e- Importation de fichiers numériques.....	59
IV.5. Méthode FIGUSED pour la cartographie du risque d'inondation.....	60
a- Prise en compte de paramètres variés.....	60
b- Haute précision des résultats.....	60
c- Capacité d'adaptation.....	60
d- Dimension participative.....	61
IV.5.1. Paramètres pris en compte dans la méthode FIGUSED.....	61
IV.5.1.1. Accumulation de flux.....	61
a- Analyse de la topographie.....	62
- Zones de crête.....	62
- Vallées et dépressions.....	62
b- Identifier les lignes d'accumulation du flux.....	62
- Zones de convergence.....	62
- Concentration des lignes.....	62
c- Identifier les bassins versants.....	62
- Délimitation des bassins versants.....	62
- Taille des bassins versants.....	62
d- Analyser les flux d'eau.....	62
- Direction de l'écoulement.....	62
- Zones de concentration.....	62
IV.5.1.2. Intensité des précipitations.....	63

IV.5.1.3. Distance du réseau de drainage.....	63
IV.5.1.4. Elévation.....	64
IV.5.1.5. Pentas du terrain.....	64
IV.5.1.6. Utilisation des terres.....	64
IV.5.1.7. Géologie.....	64
IV.5.2. Interpolation des cartes.....	65
a- Détermination des seuils de classification.....	65
b- Réduction de l'hétérogénéité interne.....	65
c- Renforcement des contrastes entre classes.....	65
d- Découpage des données.....	65
e- Structuration en classes.....	65
IV.6. Conclusion.....	67

Chapitre 5 : Résultats et discussions

V. Introduction.....	68
V.1. Matériels et méthodes.....	68
V.2. Analyse des paramètres de la méthode.....	68
V.2.1. Accumulation de flux (F).....	68
V.2.2. Intensité des précipitations (I).....	71
V.2.3. Géologie (G).....	73
V.2.4. Utilisation des terres (U).....	75
V.2.5. Pente (Slope) (S).....	77
V.2.6. Elévation (E).....	79
V.2.7. Distance par rapport au réseau de drainage (D).....	82
V.3. Application de la méthode FIGUSED.....	83
❖ Étapes de traitement dans ArcGIS.....	84
a. Préparation des couches raster.....	84
b. Reclassification des rasters.....	84
c. Pondération et superposition.....	85

d. Production de la carte finale.....	85
V.4. Les résultats.....	85
V.5. Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	89
Références bibliographiques.....	92

Liste des abréviations

A : Superficie (Km^2)

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

Dd : Densité de Drainage

DEM : Digital Elevation Model

F : Flux

FEMA : Federal Emergency Management Agency

FHBM : Flood Hazard Boundary Map

FIRM : Flood Insurance Rate Map

IFM : Indice de Fournier modifié

Ig : Indice de pente Global

Ip : Indice de Pente

Ipm : Indice de Pente Moyenne

Kc : Indice de Compacité

L : Longueur (m)

l : largeur (m)

MNT : Modèle Numérique de Terrain

NFIP : National Flood Insurance Program

ONS : l'Office National de la Statistique

P : Périmètre (km)

PDAU : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme

PDCC : Programme de Détermination des Côtes de Crue

Pm : Pente moyenne

POS : Plan d'Occupation des Sols

Pp : Precipitations

S : Slope

SAB : Sidi Ali Benyoub

SBA : Sidi Bel Abbès

SFHA : Special Flood Hazard Areas

SIG : Système d'Information Géographique

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

T : Température (°C)

Tc : Temps de Concentration

USACE : United States Army Corps of Engineers

USGS : United States Geological Survey

m: mètre

s: seconde

Liste des figures

Page

Chapitre 1 : les inondations : typologie, risques et stratégies de gestion

Figure I.1	Inondation de Béchar le 08 Septembre 2024	5
Figure I.2	Différents lits d'une rivière	6
Figure I.3	Schéma d'explication des liens entre l'aléa, vulnérabilité des enjeux et risque	8
Figure I.4	Relations topographiques entre les composantes d'une plaine alluviale	10

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1	Localisation de la ville de Sidi Bel Abbes	11
Figure II.2	Localisation du terrain d'étude	12
Figure II.3	Carte hypsométrique et courbe correspondante du bassin de l'Oued Mekerra	14
Figure II.4	Carte des pentes du bassin versant de la Mekerra	17
Figure II.5	Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Mekerra	18
Figure II.6	Répartition spatiale des différentes occupations des sols du bassin de la Mekerra	21

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

Figure III.1	Localisation des stations pluviométriques de bassin versant de Mekerra	24
Figure III.2	Variation interannuelle des précipitations à la station de Haçaiba	25
Figure III.3	Variation interannuelle des précipitations à la station de Sidi Bel Abbès	26
Figure III.4	Variation interannuelle des précipitations à la station de Sidi Ali Benyoub	27
Figure III.5	Variations interannuelles des précipitations au niveau du bassin de la Mekerra	29
Figure III.6	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Haçaiba	30
Figure III.7	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès	31

Figure III.8	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Ali Benyoub	32
Figure III.9	Précipitations moyennes mensuelles au niveau du bassin de la Mekerra	33
Figure III.10	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Haçaiba	34
Figure III.11	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbes	35
Figure III.12	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Ali Benyoub	35
Figure III.13	Précipitations moyennes saisonnières de la station moyenne	36
Figure III.14	Variation interannuelle des températures à la station de Haçaiba	38
Figure III.15	Variation interannuelle des températures à la station de Sidi Bel Abbès	39
Figure III.16	Variation interannuelle des températures à la station de Sidi Ali Benyoub	40
Figure III.17	Variation mensuelle des températures au niveau des trois stations	41
Figure III.18	Variation saisonnière des températures pour les trois stations	42
Figure III.19	Diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gausсен	44
Figure III.20	Classification du climat selon l'abaque de Martonne	45
Figure III.21	Débits moyens annuels à la station de Sidi Bel Abbès	47
Figure III.22	Débits moyens mensuels à la station de Sidi Bel Abbès	48
Figure III.23	Débits moyens saisonniers à la station de Sidi Bel Abbès	49
Figure III.24	Précipitations et débits moyens mensuels au niveau du bassin de la Mekerra	50

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

Figure IV.1	Composantes d'un Système d'Information Géographique (SIG)	57
Figure IV.2	Facteurs intervenant dans la méthode FIGUSED	66
Figure IV.3	Organigramme des étapes de la méthode FIGUSED	67

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Figure V.1	Cartographie de l'accumulation de flux (F) du bassin versant de la Mekerra	70
------------	--	----

Figure V.2	Répartition de l'indice de flux du bassin versant de la Mekerra	70
Figure V.3	Cartographie de l'intensité des précipitations (I) du bassin versant de la Mekerra	72
Figure V.4	Répartition de l'indice de l'intensité des précipitations dans le bassin versant de la Mekerra	72
Figure V.5	Cartographie de formations géologiques (G) du bassin versant de la Mekerra	74
Figure V.6	Répartition de l'indice de Géologie (G) dans le bassin de la Mekerra	74
Figure V.7	Cartographie d'utilisation des sols (U) du bassin versant de la Mekerra	75
Figure V.8	Répartition de l'indice d'utilisation des terres (U) du bassin versant de la Mekerra	76
Figure V.9	Cartographie de la répartition des pentes (S) de bassin versant de la Mekerra	78
Figure V.10	Répartition de l'indice de pente (S) dans le bassin de la Mekerra	79
Figure V.11	Cartographie de la répartition des altitudes (E) de bassin versant de la Mekerra	80
Figure V.12	Répartition de l'indice d'élévation (E) de bassin versant de la Mekerra	81
Figure V.13	Cartographie de la Distance par rapport au drainage (D) de bassin versant de la Mekerra	82
Figure V.14	Répartition de l'indice de distance par rapport au drainage dans le bassin de la Mekerra	83
Figure V.15	Carte du risque d'inondation du bassin versant de Mekerra par la méthode FIGUSED	89

Liste des tableaux

Page

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1	Classification du relief selon l'indice de pente global (Ig) d'après l'ORSTOM	15
Tableau II.2	Classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique (Ds)	16
Tableau II.3	Résultats d'estimation du temps de concentration	20
Tableau II.4	Récapitulatif des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant de la Mekerra	22

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

Tableau III.1	Caractéristiques des stations pluviométriques choisies pour l'étude	23
Tableau III.2	Précipitations moyennes annuelles à la station de Haçaiba	25
Tableau III.3	Précipitations moyennes annuelles à la station de Sidi Bel Abbès	26
Tableau III.4	Précipitations moyennes annuelles à la station de Sidi Ali Benyoub	27
Tableau III.5	Précipitations moyennes annuelles calculées à partir des trois stations	28
Tableau III.6	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Haçaiba	29
Tableau III.7	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès	30
Tableau III.8	Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Ali Benyoub	31
Tableau III.9	Précipitations moyennes mensuelles de la station moyenne	32
Tableau III.10	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Haçaiba	33
Tableau III.11	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbès	34
Tableau III.12	Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Ali Benyoub	35
Tableau III.13	Précipitations moyennes saisonnières au niveau du bassin de la Mekerra	36
Tableau III.14	Températures moyennes annuelles à la station de Haçaiba	38
Tableau III.15	Températures moyennes annuelles à la station de Sidi Bel Abbès	38
Tableau III.16	Températures moyennes annuelles à la station de Sidi Ali Benyoub	39

Tableau III.17	Température moyennes mensuelles pour les trois stations	41
Tableau III.18	Température moyennes saisonnières pour les trois stations	42
Tableau III.19	Précipitations et températures moyennes des trois stations	43
Tableau III.20	Indice de De Martonne calculé au niveau du bassin de la Mekerra	44
Tableau III.21	Classification du climat suivant l'indice de De Martonne	45
Tableau III.22	Débits moyens annuels à la station de Sidi Bel Abbès	46
Tableau III.23	Débits moyens mensuels à la station de Sidi Bel Abbès	47
Tableau III.24	Débits moyens saisonniers à la station de Sidi Bel Abbès	48
Tableau III.25	Précipitations et débits moyens mensuels au niveau du bassin de la Mekerra	49

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

Tableau IV.1	Synthèse des outils de cartographie du risque d'inondation	56
Tableau IV.2	Méthodes d'acquisition des données pour un SIG	60
Tableau IV.3	Synthèse de la méthode FIGUSED	61
Tableau IV.4	Synthèse des concepts de l'identification des points de rupture et la classification des données	66

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Tableau V.1	Classes des paramètres de la méthode FIGUSED et valeurs correspondantes	84
-------------	---	----

Introduction générale

Introduction générale

Parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus destructrices à l'échelle mondiale, les inondations occupent une place prépondérante. Elles surviennent généralement lorsqu'un cours d'eau déborde, entraînant l'immersion temporaire de zones normalement sèches. Ce phénomène peut résulter de divers facteurs, notamment des précipitations intenses, la rupture d'ouvrages hydrauliques tels que les digues, ou encore la fonte rapide des neiges et des glaces.

Au cours des dernières décennies, la fréquence et l'intensité des inondations ont connu une augmentation notable, sous l'effet combiné du changement climatique, de l'urbanisation non maîtrisée, de la déforestation et de la dégradation des zones humides. Ces dynamiques contribuent à amplifier les impacts de ces événements, tant sur le plan humain que socio-économique et environnemental : pertes en vies humaines, dégâts matériels, perturbations des activités économiques, dégradation des terres et contamination des ressources en eau.

L'Algérie, bien qu'elle se caractérise par un climat majoritairement aride à semi-aride, n'est pas à l'abri de ce type de risque. Certaines régions du Nord du pays sont particulièrement vulnérables, connaissant régulièrement des épisodes de pluies soudaines et intenses qui provoquent des crues violentes. La ville de Sidi Bel Abbès, traversée par l'oued Mekerra, est l'un des territoires exposés à ces aléas. Les inondations qui y surviennent sont parfois très destructrices, comme en témoignent les événements marquants de 1940 ayant coûté 40 milliards de dinars. La crue du mois d'Octobre 1986 a eu pour dégât un mort, 530 personnes sans abris et 200 familles sinistrées. Quant à la crue du mois de Septembre, elle a causé deux morts, 22 familles sinistrées et des dégâts matériels. La crue enregistrée durant l'année 1994 peut être considérée comme exceptionnelle ($350 \text{ m}^3/\text{s}$) et peut être qualifiée comme une crue éclair au vu de la rapidité de montée des eaux tant sur le bassin versant (Meddi et al., 2007)

Le bassin versant de l'oued Mekerra, localisé dans le Nord ouest de l'Algérie, constitue la zone d'étude de ce travail. Ce bassin présente une diversité topographique marquée, allant des reliefs accidentés des monts de Tessala à des plaines plus propices à l'agriculture et à l'urbanisation, comme celle de Sidi Bel Abbès. Cette hétérogénéité morphologique influence fortement les dynamiques d'écoulement et favorise l'apparition de crues rapides, notamment lors d'épisodes pluvieux extrêmes.

Face à cette vulnérabilité croissante, la mise en œuvre de méthodes efficaces de diagnostic et de prévention devient une nécessité. L'évaluation précise des zones à risque est un préalable essentiel pour orienter les politiques d'aménagement et réduire les impacts des inondations. Dans ce contexte, la présente étude mobilise la méthode multicritère FIGUSED, intégrant des paramètres géomorphologiques, hydrologiques, climatiques et anthropiques, afin de produire une cartographie fiable des zones exposées au risque d'inondation dans le bassin versant de

l'oued Mekerra. L'analyse a été menée à l'aide des outils géomatiques, en particulier le logiciel Arcgis.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 1 : Présente les différents types d'inondations, les risques associés et les stratégies de gestion mises en œuvre à l'échelle internationale et locale.

Chapitre 2 : Décrit la zone d'étude en mettant en lumière les caractéristiques physiques, du bassin versant de l'oued Mekerra.

Chapitre 3 : Propose une analyse hydro-climatique basée sur les données disponibles pour mieux comprendre le comportement du bassin face aux précipitations.

Chapitre 4 : Expose la méthodologie adoptée pour la cartographie du risque d'inondation, avec un focus sur la méthode FIGUSED et les outils utilisés.

Chapitre 5 : Présente les résultats de l'application de la méthode au bassin étudié, suivis d'une discussion critique des principales observations.

La conclusion générale viendra synthétiser les apports de ce travail, en mettant en évidence les perspectives offertes pour une gestion intégrée et préventive des risques d'inondation dans cette région vulnérable.

**Chapitre 1 : Les inondations : typologie,
risques et stratégies de gestion**

I. Introduction

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

L'Algérie fait face de manière récurrente à des inondations aux conséquences particulièrement graves. Si ces phénomènes touchaient historiquement les grandes plaines agricoles en raison des crues des principaux cours d'eau, les deux dernières décennies ont vu une recrudescence notable de leur impact dans les zones urbaines, entraînant des pertes humaines significatives et d'importants dommages matériels. Dans un contexte marqué par une intensification et une multiplication des événements climatiques extrêmes, il devient impératif de mobiliser l'ensemble des ressources technologiques disponibles afin de renforcer la résilience du territoire et d'assurer une gestion efficace de ces risques.

Chaque épisode d'inondation en Algérie entraîne de lourdes conséquences, tant sur le plan matériel que psychologique. Il est donc essentiel d'adopter une approche préventive, en sensibilisant les populations, en assurant une gestion efficace des ressources en eau, et surtout en réalisant une analyse rigoureuse des risques d'inondation.

Ce chapitre a pour objectif d'identifier les causes des inondations, qu'elles soient d'origine naturelle ou humaine, directes ou indirectes, en mettant un accent particulier sur le contexte algérien. Il vise également à analyser les principaux risques d'inondation en lien avec les notions d'aléa et de vulnérabilité, en se basant sur les origines spécifiques des inondations observées dans notre cas d'étude.

I.1. Causes des inondations

Les inondations résultent de divers facteurs, que l'on peut regrouper comme suit :

- Causes naturelles : Elles sont principalement liées aux phénomènes météorologiques et climatiques, tels que les précipitations intenses, le relief et la topographie du terrain, la fonte des neiges, ainsi que les crues des rivières et des fleuves.
- Causes humaines directes : Ces causes incluent l'urbanisation excessive, la déforestation, une gestion inefficace des barrages et digues, ainsi que des systèmes de drainage inadaptés ou mal entretenus.
- Causes humaines indirectes : Elles sont liées à des facteurs globaux tels que la pollution et le réchauffement climatique, qui accentuent les déséquilibres environnementaux et augmentent la fréquence des événements extrêmes.

I.2. Causes et types d'inondations catastrophiques en Algérie

L'Algérie fait partie des pays exposés aux phénomènes de crues et d'inondations, souvent d'une grande intensité et aux conséquences désastreuses. Le régime des précipitations y est marqué par une forte irrégularité, tant d'une année à l'autre qu'au cours des saisons. Cette variabilité entraîne à la fois des périodes d'étiage très sévères et des crues soudaines provoquant des inondations aux impacts humains et matériels importants. La formation des crues et leurs effets sur l'environnement varient selon les régions, en fonction des conditions géographiques, climatiques et de l'occupation du sol propres à chaque zone (Merabet., 2006).

En Algérie, les causes des inondations peuvent généralement être regroupées en trois Grandes catégories :

- **Causes météorologiques** : Elles sont liées à des événements climatiques extrêmes caractérisés par de fortes précipitations. C'est le cas, par exemple, des inondations de 1997 dans le bassin de la Mekerra à Sidi Bel Abbès, de celles de Décembre 1957 dans les bassins du Mazafran (Kabylie et Mitidja) et du Sebaou (Ouest d'Alger) (Merabet., 2006 ; Oufella., 2003 et Bahlouli., 2001).
- **Causes anthropiques** : Ces causes sont liées à l'impact direct des activités humaines, notamment à la défaillance des réseaux d'assainissement et de drainage des eaux pluviales, ainsi qu'à l'obstruction des oueds par des déchets et des débris. Ces facteurs aggravent considérablement les effets des pluies saisonnières, comme c'est le cas à Tiaret, régulièrement inondée chaque hiver, ou dans la plaine du Mزاب, où des inondations surviennent en moyenne tous les deux à trois ans.
- **Causes topographiques** : Certaines régions présentent un environnement géographique particulièrement vulnérable, notamment les villes traversées par des oueds (Bordj Bou Arréridj, Oued R'hiou, Sidi Bel Abbès) ou situées au pied de massifs montagneux (Aïn Defla, Batna, Médéa). Ces agglomérations, souvent marquées par une urbanisation rapide, désordonnée et non réglementée, sont fortement exposées aux inondations. Même les crues légères y provoquent régulièrement des pertes humaines et des dégâts matériels importants (Abdelbaki et al., 2012).

Selon les caractéristiques des crues, leur intensité, durée et étendue, les inondations peuvent être classées en deux types. L'un d'eux concerne :

- **Les inondations causées par des crues torrentielles** : Ces inondations touchent principalement les petits bassins versants, dont la superficie ne dépasse généralement que quelques dizaines de kilomètres carrés. Elles sont souvent provoquées par des précipitations localisées et intenses, issues de phénomènes convectifs, notamment les tempêtes orageuses survenant en automne ou en été. Ce type de crue est particulièrement dangereux en raison de sa soudaineté : les ruissellements peuvent commencer moins d'une heure après le début des

précipitations, et les débits des oueds peuvent passer en deux ou trois heures de quelques mètres cubes par seconde à plusieurs milliers.

L'inondation de la ville d'Oued R'hiou, survenue le 20 Octobre 1993, illustre parfaitement ce phénomène, en seulement 20 minutes de pluie, la crue a causé 23 morts, 20 blessés et plusieurs disparus (Merabet., 2006).

Plus récemment, le 8 Septembre 2024, les localités de Béchar, Taghit, Lhmar, Kenadza et Abadla ont été touchées par de violentes crues torrentielles provoquées par les oueds Guir et Béchar, causant d'importants dégâts (fig. I.1).



Figure I.1 : Inondation de Béchar le 08 Septembre 2024(Djebli.,2024)

▪ **Les inondations des grands bassins versants** : Ces inondations sont généralement causées par des précipitations abondantes et étendues, s'étalant sur de vastes zones et pouvant durer entre 10 et 15 jours. Elles se caractérisent par des crues massives, lentes et dont l'évolution est, en règle générale, prévisible. Toutefois, leur intensité peut être soudainement aggravée par l'apport rapide d'affluents plus courts situés en aval. En Algérie, ce type d'inondation survient le plus souvent en hiver, entre les mois de Décembre et Mai (Merabet., 2006).

I.3. Risques majeurs liés aux inondations

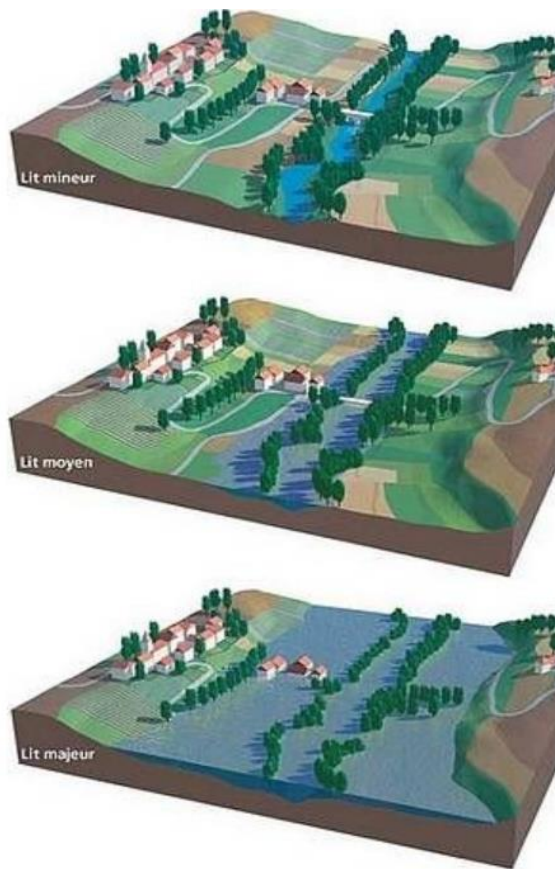
Les inondations constituent des événements naturels dangereux aux conséquences potentiellement dévastatrices. Ces risques peuvent être regroupés en quatre grandes catégories

I.3.1. Risques naturels ou environnementaux

- **Perte de biodiversité**

❖ **Dégradation des écosystèmes** : mortalité de la faune aquatique, destruction des zones humides, perturbation des cycles biologiques.

- ❖ **Détérioration du couvert végétal et des sols** : arrachage des arbres et des plantes, érosion des berges, modification du lit des rivières, accumulation excessive de sédiments.



Lit mineur : lit ordinaire du cours d'eau. C'est un espace fluvial formé d'un chenal, de bancs de sables et/ou de galets, recouverts par les eaux.

Lit moyen : espace soumis à de fréquentes inondations, avec des périodes de retour de 1 à 10 ans.

La vitesse de l'eau y est forte et le lit moyen est soumis à une forte érosion et à un important transport de matériaux solides. Il est naturellement occupé par la ripisylve (végétation abondante qui borde

Lit majeur : espace occupé temporairement par un cours d'eau en période de très hautes eaux. Ses limites externes sont celles de la plus grande crue historique répertoriée (100 ans).

Figure I.2 : Différents lits d'une rivière (Merabet., 2006).

- ❖ **Pollution des sols et des eaux**: L'eau des inondations peut transporter divers polluants, notamment des métaux lourds et des substances toxiques, entraînant la contamination des cours d'eau, des nappes phréatiques et des sources d'eau potable.

- ❖ **Érosion et affaissement des sols**: Les inondations accentuent l'érosion des sols et peuvent provoquer des affaissements, augmentant ainsi le risque de glissements de terrain.

I.3.2. Risques humains

- ❖ **Pertes en vies humaines** : les inondations peuvent entraîner des blessures graves, des noyades, des électrocutions, et parfois des décès.

- ❖ **Propagation de maladies**: l'eau stagnante favorise l'apparition de maladies hydriques telles que le choléra ou la leptospirose.

- ❖ **Souffrance psychologique**: ces événements extrêmes peuvent provoquer du stress, des traumatismes profonds et des états d'anxiété prolongés.

I.3.3. Risques matériels et économiques

- ❖ **Pertes économiques directes** : destruction partielle ou totale d'habitations, nécessitant des réparations onéreuses ; inondation de bâtiments, détérioration de stocks, dommages aux équipements, interruption temporaire des activités industrielles, commerciales et de services.
- ❖ **Domages aux infrastructures** : dégradation des routes, ponts, réseaux électriques, systèmes d'alimentation en eau et d'assainissement.
- ❖ **Atteinte aux secteurs productifs** : pertes importantes dans le commerce, l'agriculture (cultures ravagées) et l'élevage.

I.3.4. Risques sociaux et logistiques

- ❖ **Déplacements de population** : les inondations peuvent entraîner l'évacuation temporaire ou permanente des habitants, parfois dans des conditions précaires.
- ❖ **Perturbation des services essentiels** : les infrastructures vitales telles que les hôpitaux, les établissements scolaires et les réseaux de transport peuvent être gravement affectés, compromettant leur fonctionnement.

Dans le domaine de la gestion des risques, la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel est appelée aléa. Étudier un aléa consiste à caractériser ce phénomène selon plusieurs paramètres essentiels : sa fréquence d'apparition, son intensité destructrice et l'étendue géographique de son impact.

Dans le cas des inondations, l'intensité est généralement exprimée, pour un lieu donné, à travers la hauteur d'eau, la durée de submersion et la vitesse du courant. Ces données sont généralement disponibles, avec une précision variable, pour l'ensemble d'une zone inondable selon la fréquence d'une crue donnée (Ledoux., 2006).

L'aléa désigne donc le phénomène naturel lui-même, comme le débordement d'un cours d'eau et la surface affectée par l'inondation.

La vulnérabilité, en revanche, correspond à la sensibilité des territoires et des sociétés face à cet aléa. Elle dépend notamment de l'usage du sol, de la densité de population, des infrastructures présentes et de leur capacité de résilience (Pottier., 1998).

Le risque résulte de la combinaison entre l'aléa et la vulnérabilité. On peut ainsi le représenter de manière générale par la relation :

$$\text{Risque} = F(\text{aléa}, \text{vulnérabilité})$$

Où :

F : Fonction dépendant du contexte et de la nature du phénomène étudié.

On peut représenter l'aléa et la vulnérabilité par le schéma d'explication suivant :

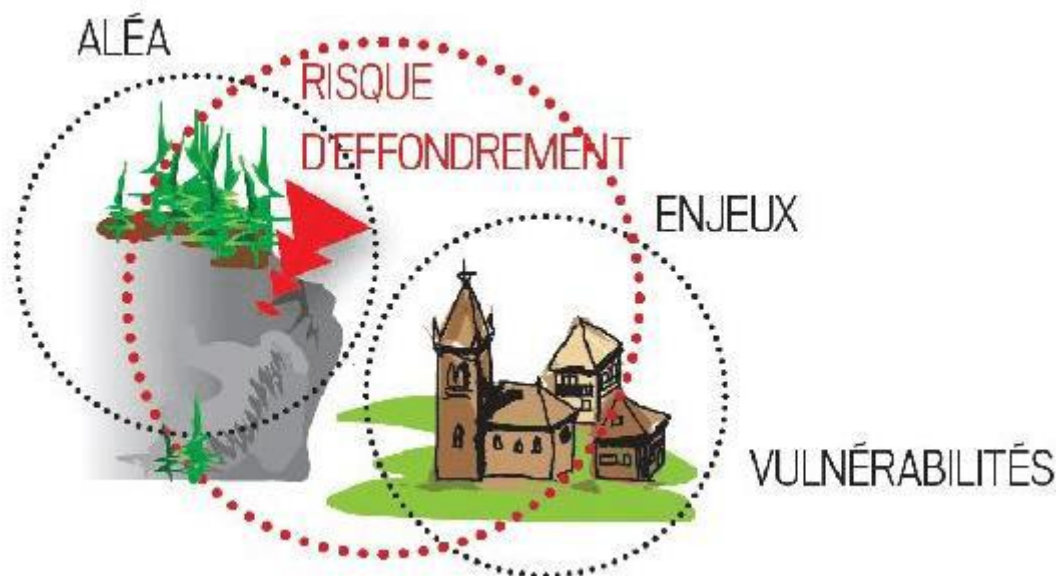


Figure I.3 : Schéma d'explication des liens entre l'aléa, vulnérabilité des enjeux et risque (Thomas et al., 2019)

I. 4. Incertitudes dans l'évaluation de l'Aléa

L'évaluation d'une crue en cas d'inondation nécessite une série d'études et de choix méthodologiques. À chaque étape du processus, des incertitudes apparaissent, rendant complexe l'estimation de l'incertitude globale. En général, l'incertitude mentionnée dans les modèles de crue ne prend en compte que celle liée aux données utilisées. Or, d'autres sources d'incertitude existent : le choix du modèle statistique, mais aussi les modèles hydrauliques eux-mêmes, qui reposent sur des données également sujettes à l'imprécision.

Ainsi, l'erreur globale dans l'évaluation d'une crue reste difficile à quantifier avec précision. Ce constat pourrait expliquer le faible nombre d'études portant spécifiquement sur cette question, malgré l'abondance de recherches focalisées sur certaines étapes isolées, comme le choix du modèle statistique (Barocca., 2006).

I.5. Evaluation de la vulnérabilité

L'évaluation de la vulnérabilité face aux risques d'inondation repose sur une combinaison de critères physiques, économiques, sociaux et environnementaux. Elle débute par l'analyse de l'exposition des populations et des infrastructures situées dans les zones potentiellement inondables, à l'aide de cartes de risque et de relevés topographiques.

Ensuite, la sensibilité des éléments exposés est examinée, en tenant compte notamment de la résistance des bâtiments, de la robustesse des réseaux de transport, ainsi que de la capacité des services essentiels à fonctionner en situation de crue.

Un autre facteur déterminant est la capacité d'adaptation, qui inclut les dispositifs de prévention, les systèmes d'alerte précoce et la résilience des communautés face aux catastrophes naturelles.

Pour une évaluation plus précise et opérationnelle, une approche intégrée est privilégiée, elle combine données géospatiales, analyses hydrologiques et enquêtes socio-économiques. Cette démarche permet non seulement de mieux comprendre la vulnérabilité, mais aussi d'orienter efficacement les stratégies de gestion et de réduction des risques d'inondation.

I.6. Origine et nature des inondations

Une inondation se définit comme l'immersion, soudaine ou progressive, d'une zone normalement sèche. Ce phénomène peut prendre plusieurs formes, englobant notamment :

- Les débordements de cours d'eau,
- Les remontées de nappes phréatiques,
- Les ruissellements causés par des pluies orageuses intenses,
- Les inondations liées à la rupture d'ouvrages de protection (comme des digues ou barrages),
- Ainsi que les inondations estuariennes, résultant de la conjonction de marées exceptionnelles, de conditions météorologiques dépressionnaires et de crues fluviales (Freddy., 2010).

I.7. Inondations des plaines

Les inondations touchant les plaines alluviales sont généralement causées par des précipitations intenses et prolongées, mais aussi par la remontée des nappes phréatiques. Une infiltration excessive d'eau peut en effet entraîner une élévation du niveau des nappes souterraines, provoquant des inondations en surface comme c'est le cas dans notre étude.

Ces inondations se manifestent principalement par le débordement d'un cours d'eau hors de son lit mineur, envahissant ainsi son lit majeur.

Ce dernier peut être défini comme : « la terre bordant un cours d'eau, constituée de sédiments déposés lors des débordements, et naturellement sujette à l'inondation en période de crue » (Ledoux., 2006).

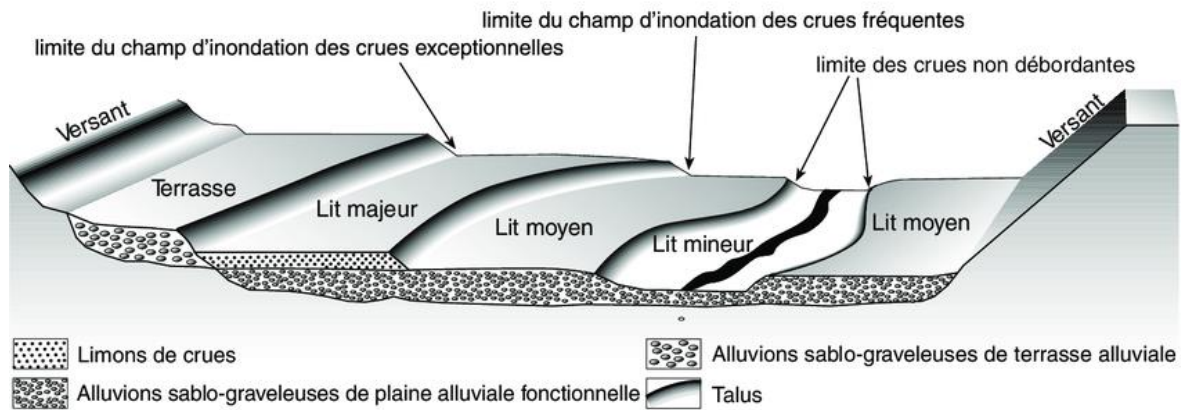


Figure I.4 : Relations topographiques entre les composantes d'une plaine alluviale (Ballais et al., 2007)

I.8. Conclusion

Les risques d'inondation constituent une menace importante pour les populations, les infrastructures et les écosystèmes. Ils résultent de divers facteurs, tels que les crues fluviales, les tempêtes, la montée du niveau de la mer, ou encore l'urbanisation excessive, qui réduit la capacité naturelle d'infiltration de l'eau.

Face à ces risques, il est indispensable de mettre en place des mesures de prévention et d'adaptation. Celles-ci comprennent l'aménagement raisonné du territoire, la construction d'infrastructures spécifiques (digues, bassins de rétention), le développement de systèmes d'alerte efficaces, ainsi que des campagnes de sensibilisation auprès des populations. De plus, une gestion durable des ressources en eau et la préservation des milieux naturels — tels que les zones humides et les forêts sont des leviers essentiels pour limiter les impacts des inondations.

En somme, bien que les inondations soient parfois inévitables, une approche proactive, intégrée et coordonnée permet de réduire significativement leurs conséquences. C'est précisément dans cette optique que s'inscrit le chapitre 2, qui portera sur l'étude approfondie de notre cas et les stratégies proposées pour y remédier.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

II. Introduction

Les inondations dans la wilaya de Sidi Bel Abbès sont principalement provoquées par les crues de l'Oued Mekerra, un cours d'eau majeur du réseau hydrographique régional. Ces crues sont souvent la conséquence de précipitations intenses, de l'expansion urbaine non maîtrisée et de l'insuffisance des infrastructures de drainage. La ville de Sidi Bel Abbès se révèle particulièrement vulnérable face à ces événements, subissant régulièrement des pertes humaines et des dégâts matériels importants lors de fortes pluies.

Située au Nordouest de l'Algérie, à environ 75 kilomètres au Sud d'Oran, la ville est bordée par la wilaya d'Oran au Nord, Aïn Témouchent au Nordouest, Mascara au Nord Est, Tlemcen à l'Ouest, Saïda à l'Est, et enfin Naâma et El Bayadh au Sud (fig.II.1).

Cette ville, à dominance agricole et dotée de quelques infrastructures industrielles, s'étend sur une superficie d'environ 2 273 hectares. Sa population était estimée à près de 753 917 habitants en 2008(Office National de la Statistique, ONS). En raison de sa situation géographique et de la dynamique de l'Oued Mekerra, elle reste exposée de manière récurrente aux risques d'inondation (Baba Hamed et al., 2008).

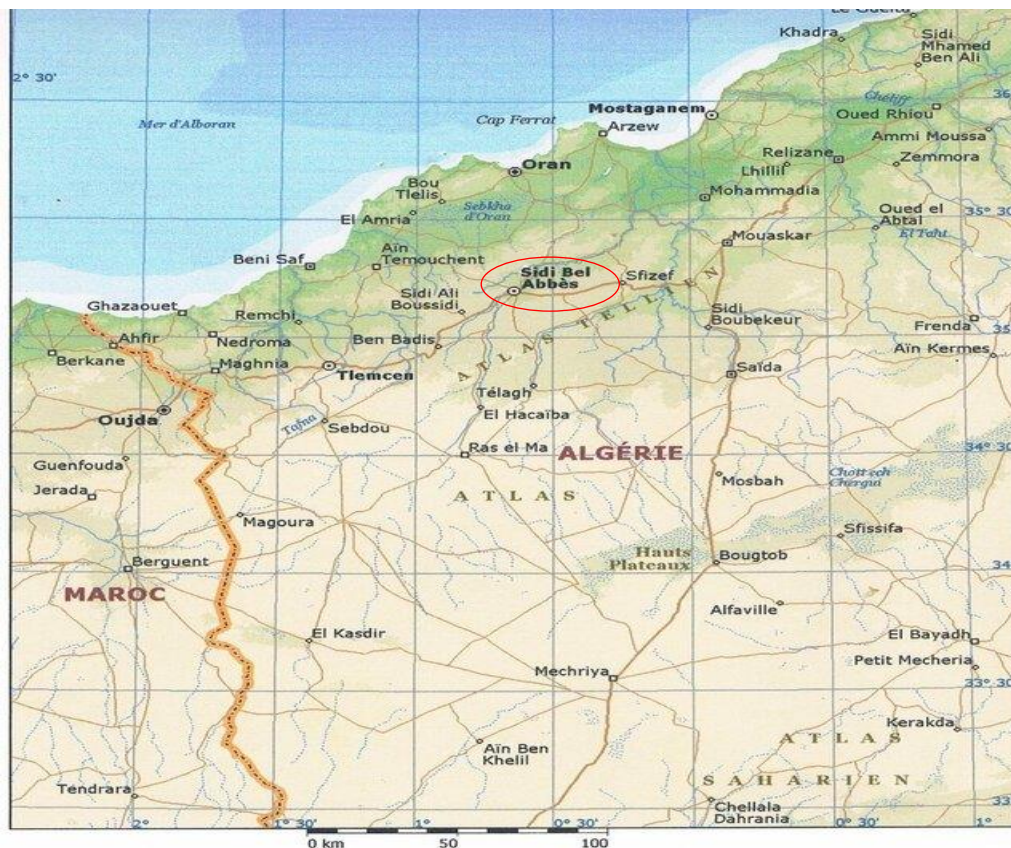


Figure II.1: Localisation de la ville de Sidi Bel Abbès (Encarta., 2008).

II.1. Présentation de la zone d'étude

Notre étude porte sur le bassin versant de l'Oued Mekerra, qui fait partie du grand bassin de la Macta. Il est situé au Nord-ouest de l'Algérie, entre les latitudes 34°31' N et 35°21' N, et

les longitudes 1°16' O et 0°58' O. Ce bassin, nommé d'après son oued principal, couvre une superficie de plus de 3616 km². En raison de sa grande étendue et de sa forme allongée orientée du Sud vers le Nord, il se divise naturellement en trois sous-bassins : la haute Mekerra, la moyenne Mekerra et la basse Mekerra (fig.II.2). Ces sous-bassins occupent trois domaines géologiques distincts (Auclair et Biehler., 1967; Souriseau., 1973) :

- Au Nord, le domaine des nappes de charriage oligo-miocènes, représenté par les monts des Tessala.
- Au centre, le domaine des formations poli-quaternaires, formant la plaine alluviale de Sidi Bel Abbès.
- Au Sud, le domaine karstique jurassico-crétacé, fortement plissé et accidenté, correspondant aux monts de Saïda, Dhaya et Tlemcen.

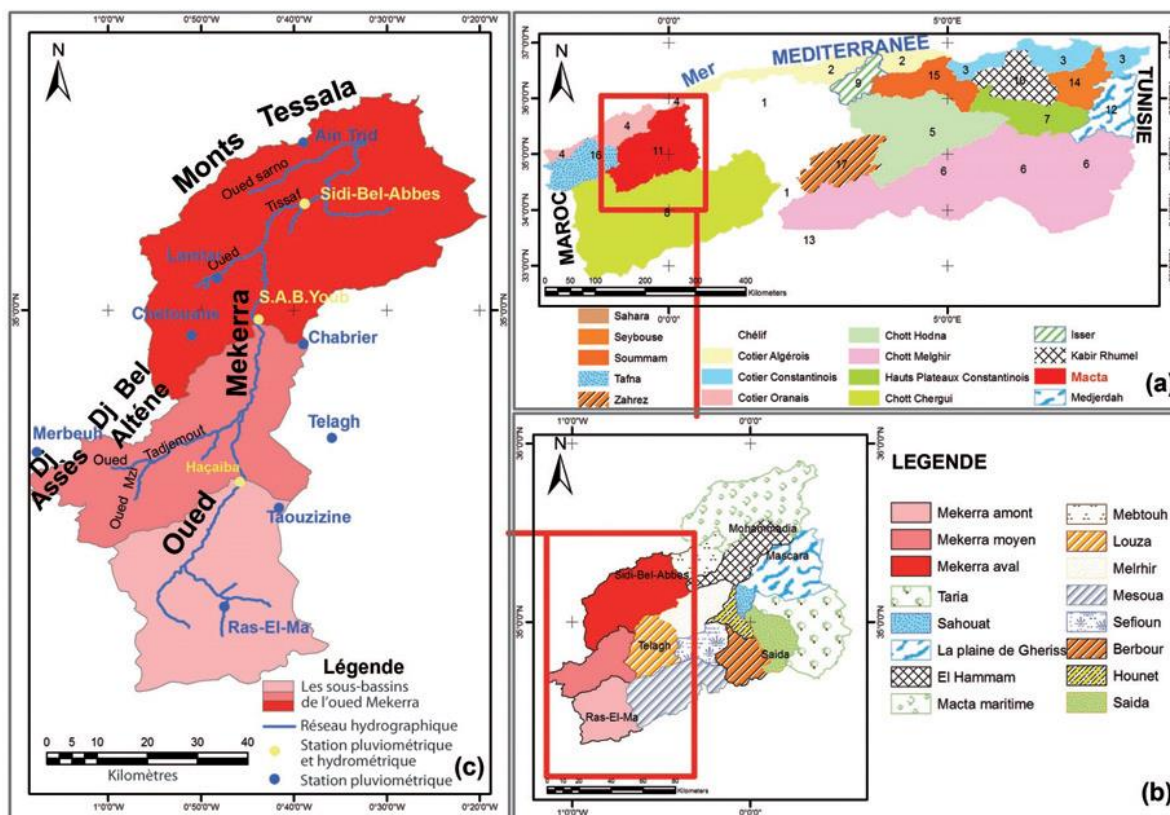


Figure II.2 : Localisation du terrain d'étude.

a : Situation du bassin de la Macta, b : Carte des sous bassins de la Macta, c : Sous bassins versants de l'oued Mekerra (Otmane et al., 2018)

II.3 Caractéristiques physiques du bassin versant

Les résultats présentés dans ce chapitre s'appuient sur les travaux antérieurs de Otmane et al., 2018 ainsi que de Otmane., 2019.

II.3.1. Caractéristiques de forme

II. 3.1.1. Coefficient de compacité Kc

Il est défini comme le rapport entre le périmètre du bassin et celui d'un cercle de même surface. Cet indice, qui permet de caractériser la forme du bassin versant, est exprimé par la relation suivante :

$$K_c = 0.28 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Eq.II.1})$$

P : Périmètre du bassin versant (km).

A : Surface du bassin versant (km²).

II.3.1.2. Rectangle équivalent

En se basant sur l'indice de compacité de Gravilius, la méthode de Roche permet de définir un rectangle représentatif du bassin versant :

$$L = \frac{\sqrt{A} \cdot K_c}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c} \right)^2} \right) \quad (\text{Eq.II.2})$$

L : Longueur du rectangle équivalent (km).

A : Superficie du bassin versant (km²).

K_c : Coefficient de compacité

l : Largeur du rectangle équivalent (A/L)

II.3.2. Etude du relief

La relation entre le relief et le débit s'explique aisément par l'influence de plusieurs facteurs hydrométéorologiques, notamment les précipitations et les températures, dont la répartition varie en fonction de l'altitude. Par ailleurs, la pente du terrain constitue un paramètre déterminant, car elle conditionne la vitesse d'écoulement des eaux de surface, impactant ainsi directement le régime hydrologique du bassin versant.

II.3.2.1. Courbe hypsométrique

La courbe hypsométrique constitue un outil d'analyse synthétique de la topographie d'un bassin versant, en mettant en relation sa surface et son élévation. Elle permet de décrire la répartition spatiale des surfaces en fonction de l'altitude : l'axe des abscisses représente la surface cumulée (ou le pourcentage de la surface totale) située au-dessus (ou en dessous) d'une altitude donnée, tandis que l'axe des ordonnées indique l'altitude correspondante. La forme de la courbe renseigne sur la distribution altitudinale des différentes zones du bassin ainsi que sur la dynamique des pentes, éléments essentiels pour l'évaluation du potentiel érosif. La construction de la courbe hypsométrique repose sur la mesure planimétrique des superficies délimitées entre les courbes de niveau successives. Elle offre ainsi une vision intégrée du relief, utile pour les études hydrologiques, géomorphologiques et environnementales (fig.II.3).

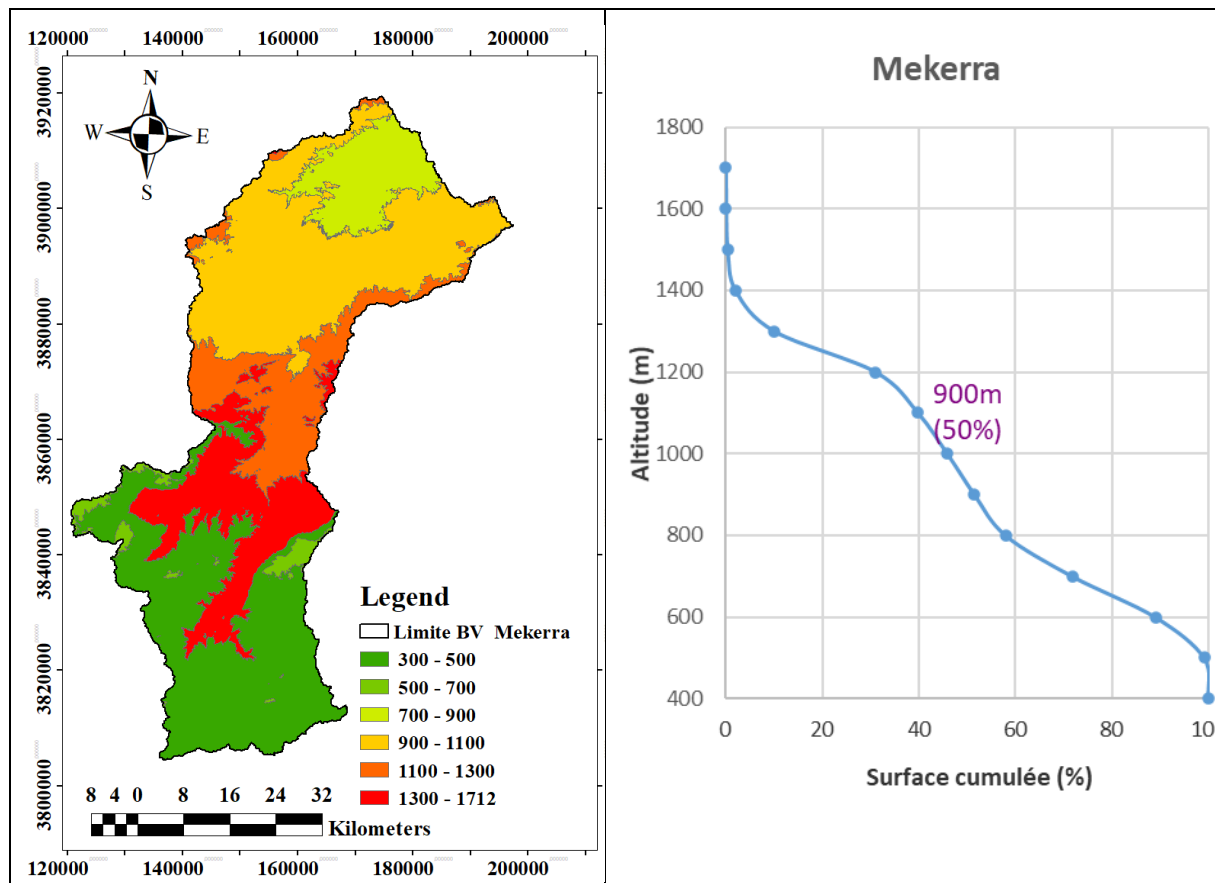


Figure II.3 : Carte hypsométrique et courbe correspondante du bassin de l'Oued Mekerra (Otmane.,2019)

II.3.2.2. Altitudes caractéristiques

Afin de caractériser les bassins versants, certaines altitudes de référence sont définies. Celles-ci permettent de décrire la structure altitudinale du bassin et d'analyser des paramètres essentiels tels que l'amplitude du relief, la répartition des surfaces selon l'altitude, ou encore le potentiel d'érosion et d'écoulement.

- **L'altitude moyenne**, c'est l'altitude qui correspond à la moyenne de la courbe hypsométrique.

$$H_{moy} = \sum \frac{A_i \times B_i}{A} \quad (\text{Eq.II.3})$$

H_{moy} : Altitude moyenne du bassin (m)

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (m²)

H_i : Altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m)

A : Superficie totale du bassin versant (km²)

- **L'altitude la plus fréquente**, c'est le maximum de la courbe des fréquences altimétriques.
- **L'altitude de fréquence ½**, c'est l'altitude qui correspond au point d'abscisse ½ de la Courbe hypsométrique.

II.3.2.3. Indice de pente (I_p)

L'indice de pente est déterminé à partir du rectangle équivalent du bassin versant. Il est défini comme la somme des racines carrées des pentes moyennes de chaque élément, pondérées par la surface correspondante. Cet indice permet de caractériser de manière intégrée la déclivité globale du bassin, en tenant compte de l'hétérogénéité topographique.

$$I_p = \frac{1}{L} \sum X_i \cdot \sqrt{\frac{d}{X_i}} \quad (\text{Eq. II.4})$$

I_p : Indice de pente (%)

L: Longueur du rectangle (m)

X_i : Distance qui sépare deux courbes sur la longueur du rectangle (m) (la largeur du rectangle étant constante, cette distance est égale au facteur de pondération).

d: Distance entre 2 courbes de niveau successives (peut être variable) (m).

$\frac{d}{X_i}$: Pente moyenne de l'élément.

II.3.2.4. Indice de pente global (I_g)

Le relief constitue un facteur clé dans le contrôle de l'aptitude au ruissellement des terrains. Son influence peut être quantifiée à travers l'indice de pente global (I_g), dont le calcul est donné par la relation suivante :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (\text{Eq. II.5})$$

I_g : Indice global de Roche.

L : Longueur du rectangle équivalent (m).

D : Dénivelée (m) avec $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

Sur la courbe hypsométrique déjà tracée, on prend les points tels que la surface supérieure ou inférieure soit égale à 5% de la surface totale. $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$ sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

Tableau II.1: Classification du relief selon l'indice de pente global (I_g) d'après l'ORSTOM (in Bouanani., 2004).

Relief très faible	$I_g < 0.002 \text{ m/Km}$
Relief faible	$0.002 < I_g < 0.005$
Relief assez faible	$0.002 < I_g < 0.01$
Relief modéré	$0.01 < I_g < 0.02$
Relief assez fort	$0.02 < I_g < 0.05$
Relief fort	$0.05 < I_g < 0.5$
Relief très fort	$0.5 \text{ m/Km} < I_g$

II.3.2.5. Dénivelée spécifique

L'indice de pente global (I_g) tend à décroître avec l'augmentation de la surface d'un bassin, ce qui complique la comparaison entre bassins de tailles différentes. Pour pallier cette

limitation, la dénivelée spécifique (D_s) est utilisée. Elle dérive de l'indice I_g , corrigé de l'effet de surface supposé inversement proportionnel à A , et s'exprime par :

$$D_s = I_g \cdot \sqrt{A} \quad (\text{Eq. II.6})$$

Tableau II.2: Classification du relief en fonction de la dénivelée spécifique (D_s), exprimée en mètres (*in*Bouanani.,2004).

Relief très faible	$D_s < 10$
Relief faible	$10 < D_s < 25$
Relief assez faible	$25 < D_s < 50$
Relief modéré	$50 < D_s < 100$
Relief assez fort	$100 < D_s < 250$
Relief fort	$250 < D_s < 500$
Relief très fort	$500 < D_s$

II.3.2.6. Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne, indicateur clé de la topographie du bassin versant, influence à la fois le temps de concentration (T_c) et le débit de pointe en cas de précipitation intense. Elle peut être estimée de manière approchée par la relation suivante :

$$I_{moy} = \frac{D \cdot L}{A} \quad (\text{Eq. II. 7})$$

I_{moy} : Pente moyenne (m/km ou%).

L: Longueur totale des courbes de niveau (km).

D : Équidistance entre deux courbes de niveau (m).

A: Surface du bassin versant (km²).

La pente est un paramètre fondamental dans l'étude hydrologique d'un bassin versant, car elle influence directement le ruissellement, l'érosion des sols, la vitesse d'écoulement et le risque d'inondation. La carte (fig.II.4), illustre la répartition spatiale des pentes (en degrés) dans le bassin versant de l'oued Mekerra, à l'aide d'une classification en six classes.

L'analyse révèle que les zones de faible pente (0 à 5°), représentées en vert, couvrent une grande partie centrale du bassin, notamment au niveau de la plaine de Sidi Bel Abbès. Ces zones, propices à l'agriculture et à l'urbanisation, sont également très sensibles aux inondations en raison de leur faible capacité d'évacuation des eaux en période de fortes pluies.

Les pentes modérées (5 à 13°), figurant en jaune, sont situées autour de la zone centrale et dans certaines parties intermédiaires du bassin. Elles présentent un risque modéré de ruissellement et d'érosion, surtout en l'absence de couverture végétale ou de pratiques agricoles adaptées.

Les pentes fortes à très fortes (13 à plus de 20°), visibles en orange et rouge, se concentrent principalement dans les zones périphériques du bassin, en particulier au Sudouest et au Nord, où se trouvent les chaînes montagneuses telles que le Djebel Tessala. Ces secteurs sont les plus vulnérables à l'érosion hydrique et au ruissellement intense. Lors d'épisodes pluvieux, ces

pentent favorisent une concentration rapide des écoulements vers le lit principal de l'oued Mekerra, contribuant à la formation de crues soudaines.

Ainsi, la topographie du bassin, marquée par un fort contraste entre les zones de montagne et la plaine, constitue un facteur clé dans la dynamique des inondations. Cette hétérogénéité morphologique justifie l'intégration de la pente comme critère déterminant dans l'évaluation du risque d'inondation selon la méthode FIGUSED.

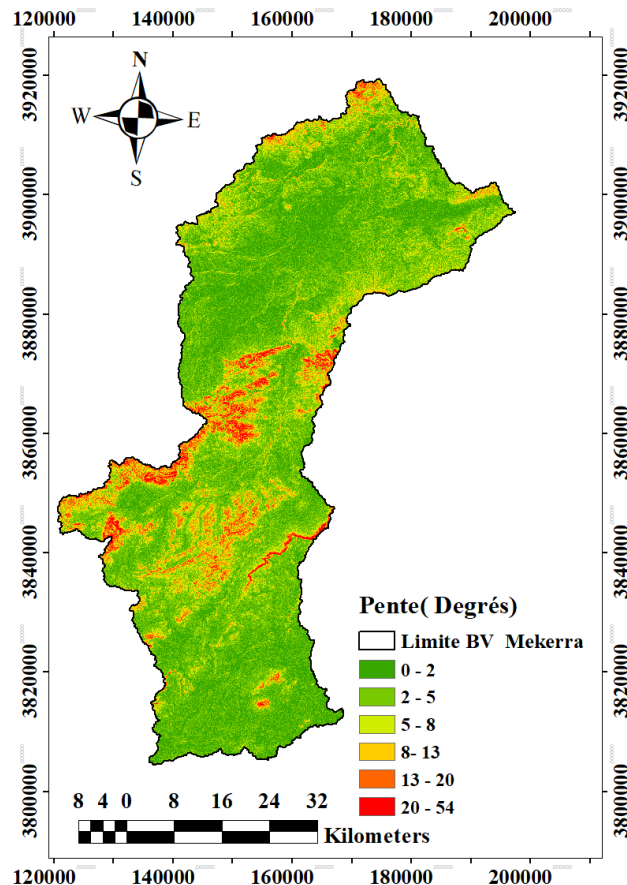


Figure II.4 : Carte des pentes du bassin versant de la Mekerra établie par Hammadi, 2025

II.3.3. Etude de quelques paramètres du réseau hydrographique

La carte du réseau hydrographique du bassin versant de l'oued Mekerra (fig.II.5) montre une structure ramifiée et hiérarchisée, classée selon la méthode de Strahler. Les ruisseaux cours d'eau d'ordre 1, présents dans les zones montagneuses, alimentent progressivement le réseau en se rejoignant pour former des cours d'eau de plus en plus importants jusqu'au cours principal d'ordre 6. Cette organisation reflète une forte connectivité hydrologique et une dynamique de ruissellement active, en particulier dans les zones amont. Le caractère dense du réseau indique une réponse hydrologique rapide du bassin en cas de fortes précipitations, rendant certaines zones, notamment les secteurs urbanisés en aval, particulièrement exposés aux inondations.

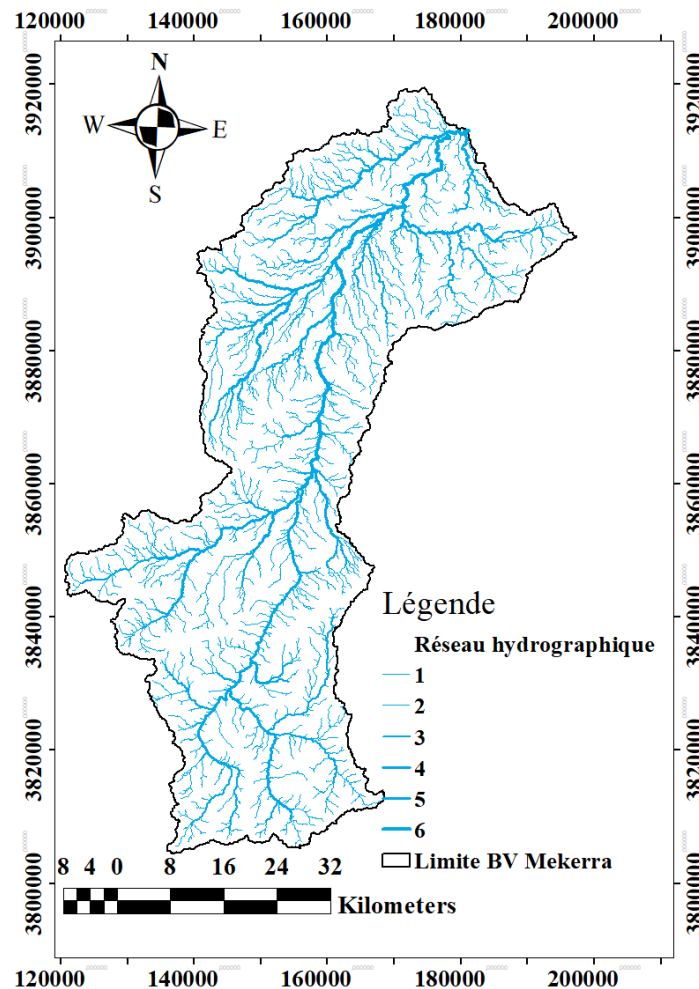


Figure II.5 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de la Mekerra établie par Hammadi, 2025

II.3.3.1. Densité de drainage (Dd)

La densité de thalwegs, également désignée comme la densité de drainage, est définie comme le rapport entre la somme des longueurs des cours d'eau de tous les ordres et la surface totale du bassin versant. Cet indice permet d'évaluer l'intensité du réseau hydrographique et son efficacité à drainer la surface du bassin.

$$Dd = \frac{\sum L_i}{A} \quad (\text{Eq.II.8})$$

Dd: Densité de drainage (km/km²).

L : Longueur cumulée de tous les thalwegs du bassin (km).

A : Surface du bassin (km²).

II.3.3.2. Fréquence des cours d'eau ou Densité hydrographique

Elle représente le nombre des canaux d'écoulement par unité de surface.

$$F = \frac{\sum L_i}{A} \quad (\text{Eq.II.9})$$

F : Densité du réseau hydrographique (km/km²).

A : Surface du bassin versant (km²).

II.3.3.3. Coefficient de Torrentialité

C'est un coefficient qui tient compte à la fois de la densité des thalwegs élémentaires par la densité de drainage.

$$C_t = D_d \cdot F \quad (\text{Eq.II.10})$$

D_d : Densité de drainage (km/km²).

F : Fréquence des thalwegs élémentaires.

II.3.3.4. Temps de concentration

Le temps de concentration (T_c) désigne le temps nécessaire à une particule d'eau pour parcourir la distance entre la zone la plus éloignée du bassin versant et son exutoire. Sur le plan théorique, il est défini comme la période s'étendant de la fin de la pluie nette à la fin du ruissellement. En pratique, le temps de concentration peut être mesuré directement sur le terrain, en suivant l'évolution du ruissellement à partir de l'événement pluvieux. Alternativement, il peut être estimé à l'aide de formules empiriques qui intègrent divers paramètres tels que la pente du terrain, la surface du bassin, et les caractéristiques du réseau de drainage (Bouanani., 2004).

a- Formule de KIRPICH (1940)

$$T_c = 0,6615 \cdot L^{0,77} \cdot I_g^{0,385} \quad (\text{Eq.II.12})$$

T_c: Temps de concentration (heure).

L:Longueur du bassin versant (km).

I_g : Indice de la pente globale.

b- Formule de CALIFORNI

$$T_c = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot H^{0,385} \quad (\text{Eq.II.13})$$

T_c : Temps de concentration (heure).

L : Longueur du thalweg principal (132,64km).

H : Dénivelée entre le point le plus haut et l'exutoire (m).

c- Formule de GIANDOTTI (1937)

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{Eq.II.14})$$

T_c : Temps de concentration (heure).

A :Superficie du bassin (km²).

L : longueur du thalweg principal (km).

H_{moy} : Altitude moyenne (m).

H_{min} : Altitude minimale (m).

Les résultats d'estimation du temps de concentration de bassin versant de la Mekerra selon les différentes méthodes sont représentés sur le tableau qui suit :

Tableau II. 3: Résultats d'estimation du temps de concentration

Formules	Temps de concentration (Tc)
KIRPICH (1940)	30,62
CALIFORNIA	13,59
GIANDOTTI (1937)	23,83

II.3.3.5 Occupation du sol

La couverture du sol joue un rôle essentiel dans les mécanismes de ruissellement sur les versants ainsi que dans l'infiltration des eaux de pluie vers les zones non saturées. À caractéristiques pédologiques égales, le comportement hydrologique d'un sol peut varier considérablement selon son type d'occupation. Un couvert végétal dense contribue positivement à l'équilibre hydrologique du bassin versant, tandis qu'une végétation clairsemée ou absente favorise une réponse hydrique rapide et intense, en particulier sur les pentes fortes ou les sols vulnérables à l'écoulement de surface. En effet, la végétation influe directement sur la vitesse du ruissellement, le niveau d'évaporation ainsi que la capacité du sol à retenir l'eau. Ainsi, elle agit comme un véritable régulateur hydrologique, atténuant l'intensité des crues et prolongeant leur durée (Otmene, 2019).

Dans cette étude, la carte d'occupation du sol du bassin versant de l'Oued Mekerra (fig. II.6) a été élaborée à l'aide du logiciel Arcgis 10.8, en se basant sur un Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu d'un tutoriel.

L'analyse de la carte (fig.II.6), met en évidence une dominance des zones de parcours, représentées en jaune clair, qui s'étendent sur la majeure partie du bassin versant, notamment dans sa moitié sud et centrale. Ces espaces sont généralement constitués de végétation clairsemée ou de formations steppiques, souvent soumises à une exploitation pastorale. Bien que ces surfaces présentent une certaine couverture végétale, leur capacité à freiner le ruissellement reste limitée, surtout sur des pentes modérées à fortes, ce qui peut favoriser une réponse hydrologique rapide en cas de fortes précipitations.

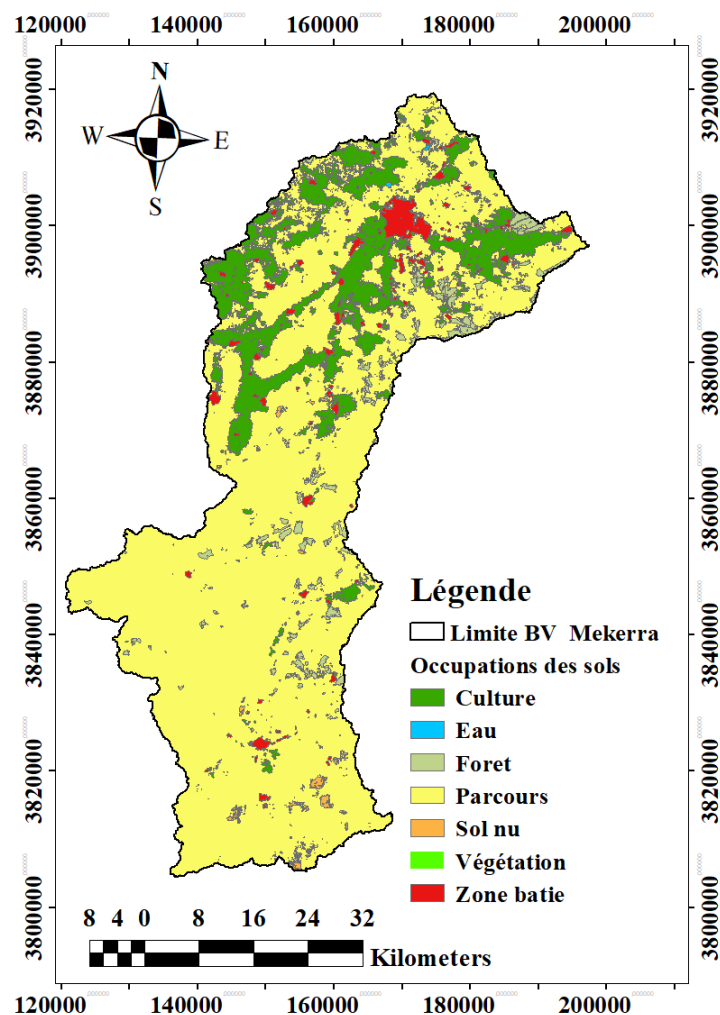
Les zones de végétation dense (en vert foncé), incluant la forêt et les formations naturelles, sont principalement localisées dans la partie nord et nord-est du bassin. Elles jouent un rôle essentiel dans la régulation du cycle hydrologique en favorisant l'infiltration, en réduisant le ruissellement de surface et en protégeant les sols contre l'érosion.

Les zones bâties (en rouge), bien que peu étendues, sont concentrées dans les environs de Sidi Bel Abbès. Leur présence augmente considérablement l'imperméabilisation des sols et accentue le risque d'inondation localement, en réduisant les capacités naturelles d'infiltration.

Les sols nus (en orange), bien que moins répandus que les zones de parcours, sont présents de manière ponctuelle. Ils constituent des secteurs critiques en matière d'érosion et de génération de ruissellement direct.

Enfin, les zones en eau sont très limitées en superficie, et leur rôle dans le stockage ou la régulation des eaux reste localisée.

En résumé, l'occupation du sol du bassin versant de l'oued Mekerra est caractérisée par une prédominance des parcours, avec une couverture végétale peu dense, exposant ainsi le territoire à un risque accru de ruissellement et d'inondation, notamment en combinaison avec les fortes pentes observées localement. La gestion durable de ces espaces, notamment par le reboisement ou la restauration des sols, pourrait permettre d'améliorer significativement la stabilité hydrologique du bassin.



FigureII.6 : Répartition spatiale des différentes occupations des sols du bassin de la Mekerra établie par Hammadi, 2025

II.4. Conclusion

Tableau II.4 : Récapitulatif des caractéristiques morphométriques et hydrographiques du bassin versant de la Mekerra (Otmane., 2019) :

Caractéristiques		Symboles	Unité	Valeurs
Superficie de B V		A	Km ²	3616,66
Périmètre de B V		P	Km	414,99
Indice de compacité		K _C	/	1,93
Altitude	Maximal	H _{max}	m	1695
	Moyenne	H _{moy}	m	848,5
	Minimal	H _{min}	m	317
	Médiane	H _{med}	m	900
Indice de pente	De roche	I _{Pr}	%	4,44
	Global	I _g	%	0,43
	Moyenne	I _{pm}	%	0,74
Dénivelée spécifique		D _s	m	259,38
Densité de drainage		Dd	Km/Km ²	0,222
Coefficient de torrentialité		C _t	/	0,005
Pente moyenne du thalweg principal		P _m	%	0,57
Rectangle équivalente	Longueur	L	Km	186,39
	Largeur	l	Km	19,40

L'analyse des caractéristiques géomorphologiques du bassin versant de la Mekerra met en évidence une superficie importante de 3616km², avec une forme allongée, comme le confirme un indice de compacité de 1,93. L'altitude varie sensiblement, allant de 317 à 1695 mètres. Bien que certaines zones présentent des pentes rocheuses plus marquées (4,44 %), la pente moyenne globale du bassin reste faible (0,43 %), tandis que la dénivelée spécifique est modérée (259,38 m). La densité du réseau de drainage est relativement basse (0,222 km/km²) et le coefficient de torrentialité, très faible (0,005), indique une faible tendance aux écoulements torrentiels. Ainsi, le bassin versant de la Mekerra combine des secteurs relativement abrupts avec une étendue globale plutôt plane, un réseau hydrographique peu développé et une dynamique torrentielle faible. La pente moyenne du thalweg principal est également très faible (0,57 %), ce qui traduit une inclinaison réduite du cours d'eau dominant. Par ailleurs, ce bassin a une forme proche d'un rectangle de 186,39 km de longueur sur 19,40 km de largeur, soulignant la forte différence entre ces dimensions et confirmant la configuration allongée. Cette morphologie favorise une concentration progressive des eaux vers l'aval, en accord avec l'indice de compacité. La faible pente du thalweg suggère par ailleurs une vitesse d'écoulement modérée dans le cours d'eau principal.

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

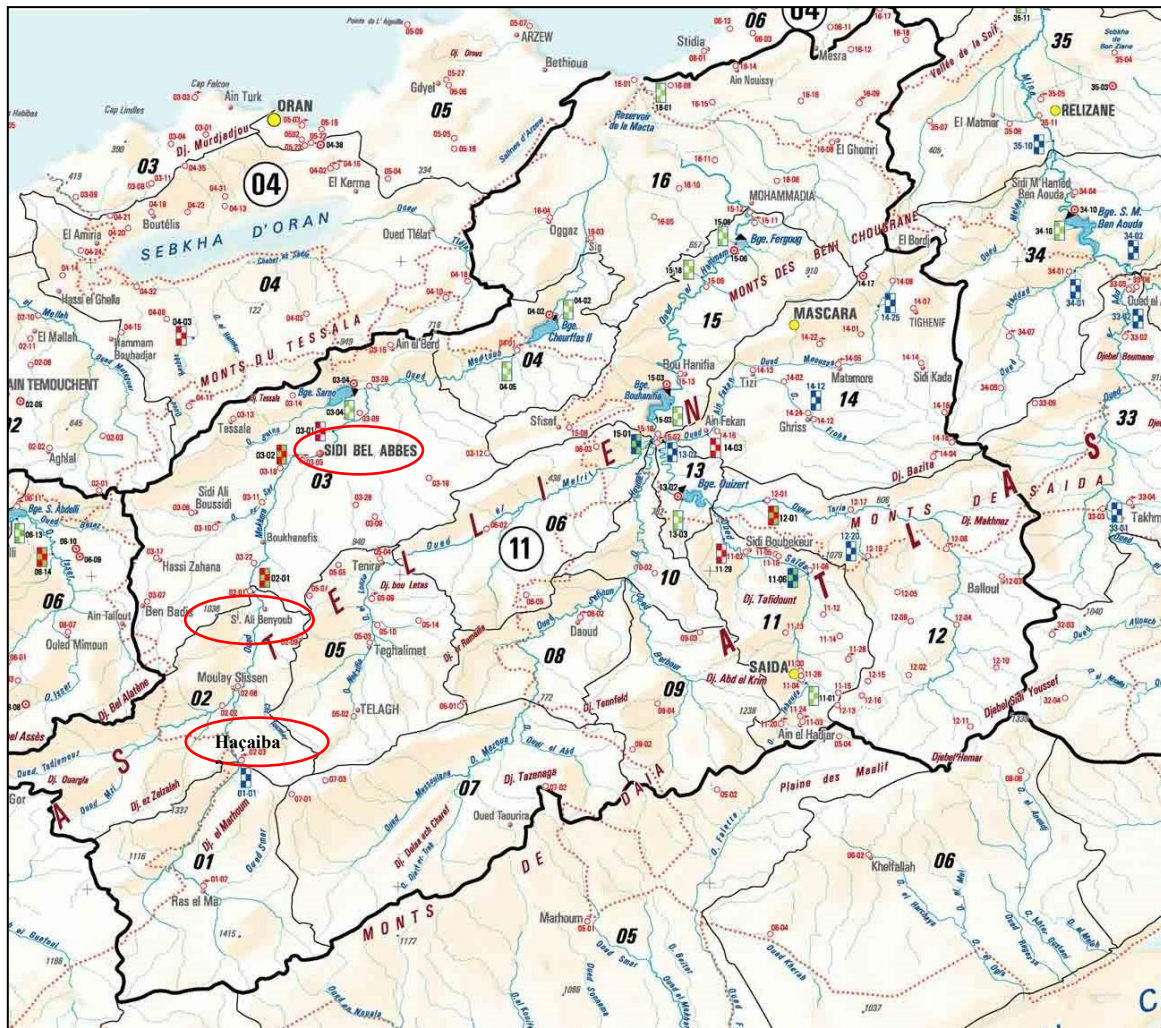
III. Introduction

L'étude hydro-climatique joue un rôle essentiel dans la compréhension des interactions entre les conditions climatiques et le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. Elle permet d'analyser les effets du climat sur les régimes d'écoulement, la disponibilité des ressources en eau, les processus d'érosion ainsi que sur la recharge des nappes phréatiques. Dans le contexte du bassin versant de la Mekerra, cette analyse est particulièrement importante pour évaluer la vulnérabilité du territoire face aux événements hydrologiques extrêmes. L'objectif de ce chapitre est d'examiner les principaux paramètres climatiques (précipitations, température) et hydrologiques (débits, ruissellement) afin d'identifier les dynamiques susceptibles de conduire à des inondations. Une meilleure connaissance de ces facteurs constitue un préalable indispensable à toute stratégie de gestion durable et de prévention des risques liés à l'eau dans cette région.

Dans le cadre de cette étude, trois stations climatiques (Haçaïba, Sidi Ali Benyoub et Sidi Bel Abbes et une station hydrométrique (Sidi Bel Abbes) ont été sélectionnées afin de disposer de données fiables et représentatives du bassin versant de la Mekerra. Le choix de ces stations repose sur leur localisation stratégique dans le bassin, la durée et la continuité des séries chronologiques disponibles, ainsi que la qualité des observations enregistrées. Les stations pluviométriques permettent d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des précipitations, tandis que la station hydrométrique fournit des informations essentielles sur le régime des écoulements et les réponses hydrologiques du bassin aux apports climatiques (tableau III.1 & fig. III.1).

Tableau III.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques choisies pour l'étude

	Haçaïba	Sidi Ali Benyoub	Sidi Bel Abbes
Code de la station	110203	110201	110305
X (km)	183.300	186.500	194.250
Y (km)	161.600	192.200	215.600
Z (m)	950	635	485
Période d'enregistrement	Précipitations : (1970/1971 –2023/2024)		
	Température : (1970/1971 –2023/2024)		



○ : Station de mesure

Figure III .1 : Localisation des stations pluviométriques de bassin versant de l’Oued Mekerra (tiré de la carte du réseau hydro-climatologique et la surveillance de la qualité des eaux ANRH, 2005).

III.1. Etude de précipitations

III.1.1. Précipitation moyenne annuelles

L’étude de la variabilité pluviométrique annuelle a été réalisée à partir des séries de précipitations mensuelles enregistrées dans les stations de Haçaiba, Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub. Ces données couvrent une période de 54 ans.

III.1.1.1. Station de Haçaiba

Au cours des 54 années d’observation (voir tableau III.2 et figure III.2), les précipitations annuelles ont montré une forte variabilité. L’année la plus humide a été 1976/1977, avec un cumul annuel de 450 mm, nettement supérieur à la moyenne. Par contre, l’année la plus sèche a été 2023/2024, avec un total de seulement 186,2 mm, bien en dessous de la moyenne annuelle.

Tableau III.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Haçaiba (1970/1971–2023/2024)

Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)
1970-1971	465.1	1984-1985	293.6	1998-1999	217.1	2012-2013	507.9
1971-1972	540.3	1985-1986	387.7	1999-2000	265.5	2013-2014	373.3
1972-1973	491.5	1986-1987	398.6	2000-2001	354.0	2014-2015	427.2
1973-1974	528.7	1987-1988	315.2	2001-2002	385.2	2015-2016	297.0
1974-1975	481.0	1988-1989	301.5	2002-2003	356.6	2016-2017	349.4
1975-1976	499.7	1989-1990	319.8	2003-2004	446.6	2017-2018	441.9
1976-1977	450.0	1990-1991	407.9	2004-2005	305.8	2018-2019	322.5
1977-1978	319.5	1991-1992	480.6	2005-2006	368.0	2019-2020	300.3
1978-1979	330.8	1992-1993	250.1	2006-2007	313.9	2020-2021	226.7
1979-1980	449.1	1993-1994	285.0	2007-2008	355.1	2021-2022	249.8
1980-1981	456.0	1994-1995	315.3	2008-2009	528.3	2022-2023	256.2
1981-1982	224.5	1995-1996	460.8	2009-2010	449.9	2023-2024	186.2
1982-1983	260.2	1996-1997	260.1	2010-2011	366.6	P _{moyenne} = 362,7 mm	
1983-1984	279.1	1997-1998	327.5	2011-2012	355.2		

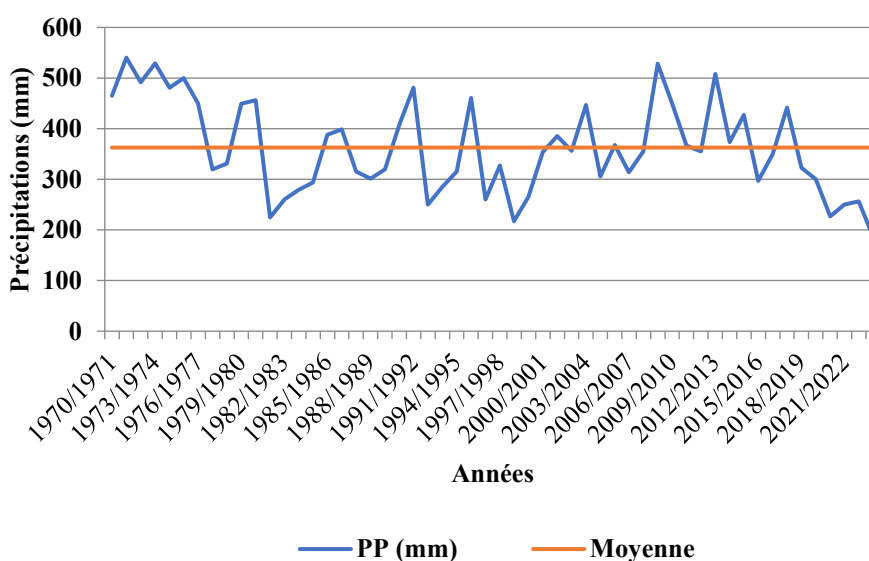


Figure III.2: Variation interannuelle des précipitations à la station de Haçaiba (1970/1971–2023/2024)

III.1.1.2. Station de Sidi Bel Abbès

Le régime pluviométrique interannuel dans cette station présente une forte irrégularité d'une année à l'autre au cours de la période d'étude de 54 ans (tabl. III.3 et fig. III.3). L'année la plus humide a été 2008/2009, avec un cumul pluviométrique maximal de 621,8 mm, tandis que l'année la plus sèche a été 2023/2024, avec un minimum de 217 mm.

Tableau III.3: Précipitations moyennes annuelles à la station de Sidi Bel Abbès (1970/1971–2023/2024)

Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)
1970-1971	551.9	1984-1985	346.3	1998-1999	275.0	2012-2013	592.4
1971-1972	620.4	1985-1986	443.4	1999-2000	308.4	2013-2014	427.9
1972-1973	543.1	1986-1987	415.5	2000-2001	437.5	2014-2015	482.3
1973-1974	608.3	1987-1988	367.0	2001-2002	410.6	2015-2016	312.7
1974-1975	540.3	1988-1989	306.7	2002-2003	401.6	2016-2017	400.5
1975-1976	505.7	1989-1990	388.2	2003-2004	481.5	2017-2018	499.9
1976-1977	484.4	1990-1991	458.0	2004-2005	376.9	2018-2019	362.2
1977-1978	363.3	1991-1992	461.0	2005-2006	416.3	2019-2020	341.2
1978-1979	359.2	1992-1993	283.1	2006-2007	393.9	2020-2021	285.3
1979-1980	537.9	1993-1994	317.8	2007-2008	384.0	2021-2022	328.6
1980-1981	499.2	1994-1995	327.8	2008-2009	621.8	2022-2023	273.3
1981-1982	236.2	1995-1996	527.4	2009-2010	479.9	2023-2024	217.0
1982-1983	309.7	1996-1997	292.8	2010-2011	393.1	P _{moyenne} = 409,3 mm	
1983-1984	338.2	1997-1998	348.4	2011-2012	416.0		

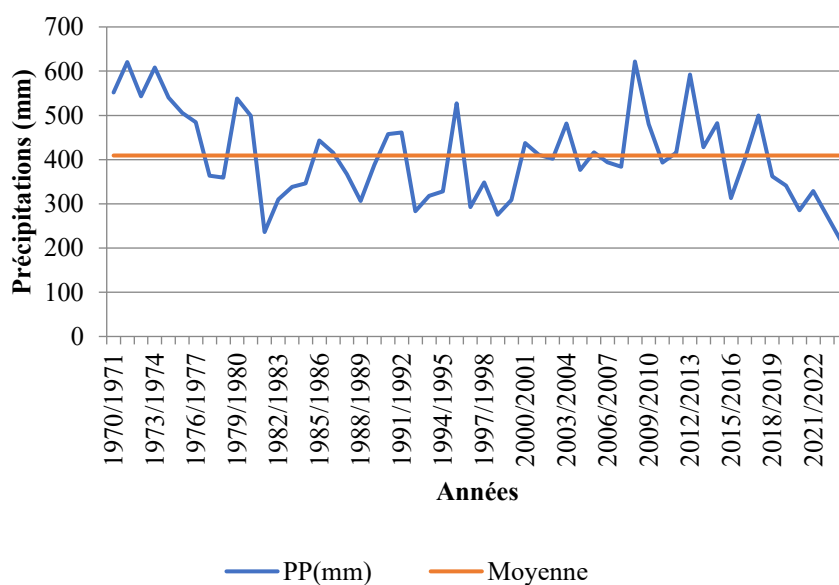


Figure III.3: Variation interannuelle des précipitations à la station de Sidi Bel Abbès (1970/1971–2023/2024)

III.1.1.3. Station de Sidi Ali Benyoub

L'enregistrement des précipitations annuelles dans cette station (tabl. II.4 et fig.III.4) révèle d'importantes fluctuations interannuelles. Des pics marqués sont observés, notamment en 1971/1972 avec un maximum de 661,7 mm, tandis qu'une baisse significative est enregistrée en 2023/2024, année de sécheresse, avec seulement 214,6 mm.

Tableau III.4: Précipitations moyennes annuelles à la station de Sidi Ali Benyoub (1970/1971–2023/2024)

Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)	Année	P (mm)
1970-1971	526.5	1984-1985	332.1	1998-1999	262.7	2012-2013	569.1
1971-1972	611.7	1985-1986	437.2	1999-2000	299.8	2013-2014	421.5
1972-1973	551.3	1986-1987	426.6	2000-2001	416.5	2014-2015	482.0
1973-1974	603.6	1987-1988	350.6	2001-2002	407.8	2015-2016	313.7
1974-1975	521.2	1988-1989	311.3	2002-2003	403.0	2016-2017	399.6
1975-1976	519.1	1989-1990	364.2	2003-2004	481.6	2017-2018	493.8
1976-1977	486.8	1990-1991	451.5	2004-2005	362.0	2018-2019	354.4
1977-1978	356.0	1991-1992	477.9	2005-2006	404.4	2019-2020	334.6
1978-1979	362.9	1992-1993	277.9	2006-2007	366.1	2020-2021	267.7
1979-1980	519.2	1993-1994	318.6	2007-2008	376.8	2021-2022	289.3
1980-1981	506.5	1994-1995	333.9	2008-2009	604.6	2022-2023	260.0
1981-1982	238.5	1995-1996	517.1	2009-2010	484.9	2023-2024	214.6
1982-1983	296.8	1996-1997	284.8	2010-2011	386.2	P moyenne = 402,1 mm	
1983-1984	322.6	1997-1998	352.7	2011-2012	397.3		

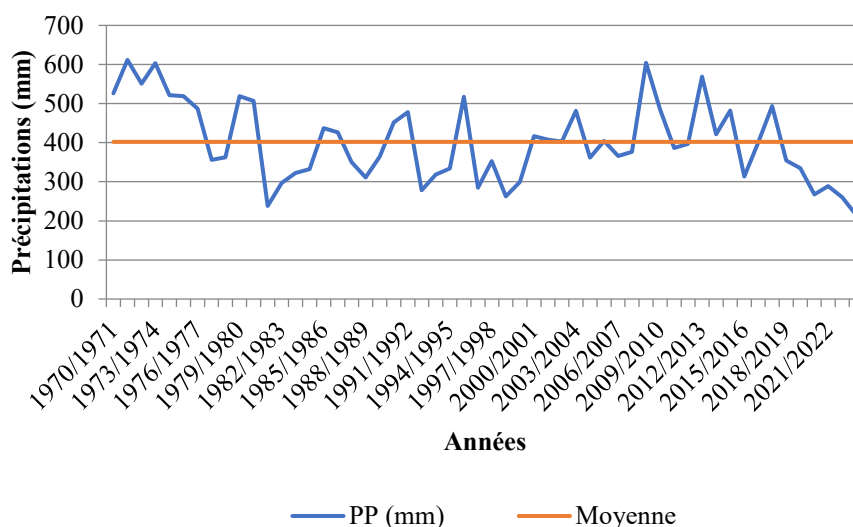


Figure III.4: Variation interannuelle des précipitations à la station de Sidi Ali Benyoub (1970/1971–2023/2024)

III.1.1.4. Station moyenne

Faute de disposer d'un nombre suffisant de stations couvrant l'ensemble du bassin avec des séries de données homogènes et de même durée, l'utilisation de la méthode de Thiessen n'a pas été possible. Nous avons donc opté pour le calcul de la moyenne arithmétique simple des précipitations enregistrées dans les trois stations disponibles (tabl.III.5 et fig.III.5).

Tableau III.5: Précipitations moyennes annuelles calculées à partir des trois stations (1970/1971–2023/2024)

Années	1970/1971	1971/1972	1972/1973	1973/1974	1974/1975	1975/1976	1976/77	1977/1978	1978/1979
Haçaiba	465.1	540.3	491.5	528.7	481.0	499.7	450.0	319.5	330.8
SBA	551.9	620.4	543.1	608.3	540.3	505.7	484.4	363.3	359.2
SAB	526.5	611.7	551.3	603.6	521.2	519.1	486.8	356.0	362.9
Station moyenne	514.5	590.8	528.6	580.2	514.2	508.2	473.7	346.3	351.0
Années	1979/1980	1980/1981	1981/1982	1982/1983	1983/1984	1984/1985	1985/1986	1986/1987	1987/1988
Haçaiba	449.1	456.0	224.5	260.2	279.1	293.6	387.7	398.6	315.2
SBA	537.9	499.2	236.2	309.7	338.2	346.3	443.4	415.5	367.0
SAB	519.2	506.5	238.5	296.8	322.6	332.1	437.2	426.6	350.6
Station moyenne	502.1	487.2	233.1	288.9	313.3	324.0	422.8	413.6	344.3
Années	1988/1989	1989/1990	1990/1991	1991/1992	1992/1993	1993/1994	1994/1995	1995/1996	1996/1997
Haçaiba	301.5	319.8	407.9	480.6	250.1	285.0	315.3	460.8	260.1
SBA	306.7	388.2	458.0	461.0	283.1	317.8	327.8	527.4	292.8
SAB	311.3	364.2	451.5	477.9	277.9	318.6	333.9	517.1	284.8
Station moyenne	306.5	357.4	439.1	473.2	270.4	307.1	325.7	501.8	279.2
Années	1997/1998	1998/1999	1999/2000	2000/2001	2001/2002	2002/2003	2003/2004	2004/2005	2005/2006
Haçaiba	327.5	217.1	265.5	354.0	385.2	356.6	446.6	305.8	368.0
SBA	348.4	275.0	308.4	437.5	410.6	401.6	481.5	376.9	416.3
SAB	352.7	262.7	299.8	416.5	407.8	403.0	481.6	362.0	404.4
Station moyenne	342.9	251.6	291.2	402.7	401.2	387.1	469.9	348.2	396.2
Années	2006/2007	2007/2008	2008/2009	2009/2010	2010/2011	2011/2012	2012/2013	2013/2014	2014/2015
Haçaiba	313.9	355.1	528.3	449.9	366.6	355.2	507.9	373.3	427.2
SBA	393.9	384.0	621.8	479.9	393.1	416.0	592.4	427.9	482.3
SAB	366.1	376.8	604.6	484.9	386.2	397.3	569.1	421.5	482.0
Station moyenne	358.0	372.0	584.9	471.6	382.0	389.5	556.5	407.6	463.8
Années	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020	2020/2021	2021/2022	2022/2023	2023/2024
Haçaiba	297.0	349.4	441.9	322.5	300.3	226.7	249.8	256.2	186.2
SBA	312.7	400.5	499.9	362.2	341.2	285.3	328.6	273.3	217.0
SAB	313.7	399.6	493.8	354.4	334.6	267.7	289.3	260.0	214.6
Station moyenne	307.8	383.2	478.5	346.4	325.4	259.9	289.2	263.2	205.9

Nous pouvons tirer plusieurs observations concernant la moyenne interannuelle des précipitations entre les trois stations (Haçaiba, SBA et SAB) représentée par la courbe jaune (fig.III.5) :

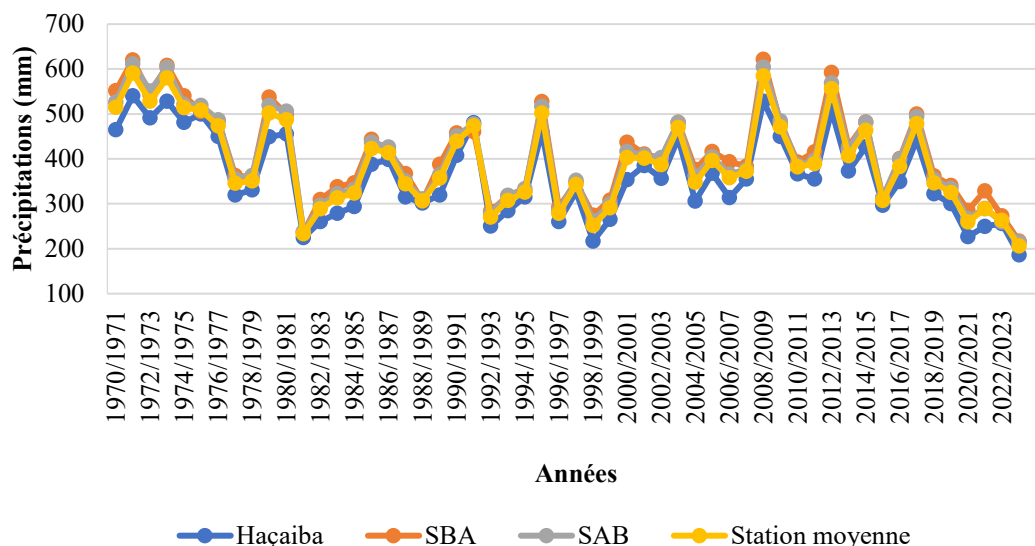


Figure III.5: Variations interannuelles des précipitations au niveau du bassin de la Mekerra (1970/1971–2023/2024)

Nous y observons une diminution progressive des précipitations moyennes sur l’ensemble de la période (1970/71 à 2022/23), suggérant une tendance vers un climat plus sec, liée possiblement à la variabilité climatique régionale.

Bien que la moyenne suive une tendance décroissante, elle reste marquée par des fluctuations d’une année à l’autre. On note des pics élevés autour de 1971–1975, 1995/1996, 2008/2009 et 2012/2013, et des creux prononcés notamment en 1982/1983, 1998/1999, et 2023/2024. La période la plus récente (2019/2020 à 2023/24) montre une nette diminution des précipitations moyennes, avec des valeurs parmi les plus basses de toute la série. Cela confirme une accentuation de la sécheresse dans les dernières années.

Les trois stations suivent globalement le même rythme de variation, ce qui renforce la fiabilité de la moyenne interannuelle comme indicateur régional de la pluviométrie.

III.1.2. Précipitations moyennes mensuelles

III.1.2.1. Station de Haçaiba

Les données des précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Haçaiba durant la période 1970/1971 à 2023/2024 sont présentées dans le tableau III.6.

Tableau III.6: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Haçaiba (1970/1971- 2023/2024)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
PP(mm)	24.8	31.7	47.5	40.1	43.3	39.9	38.9	30.4	35.4	18.5	5.4	6.9

La répartition mensuelle des précipitations à la station de Haçaiba (fig.III.6) met en évidence un régime pluviométrique typiquement méditerranéen. Les précipitations sont concentrées entre les mois d’Octobre et Mai, avec un maximum observé en Novembre, alors que la période estivale, notamment Juillet et Août, est marquée par un net déficit pluviométrique, avec des valeurs mensuelles inférieures à 10 mm. Cette saisonnalité accentuée souligne l’importance de la période hivernale dans l’apport en eau pour la région.

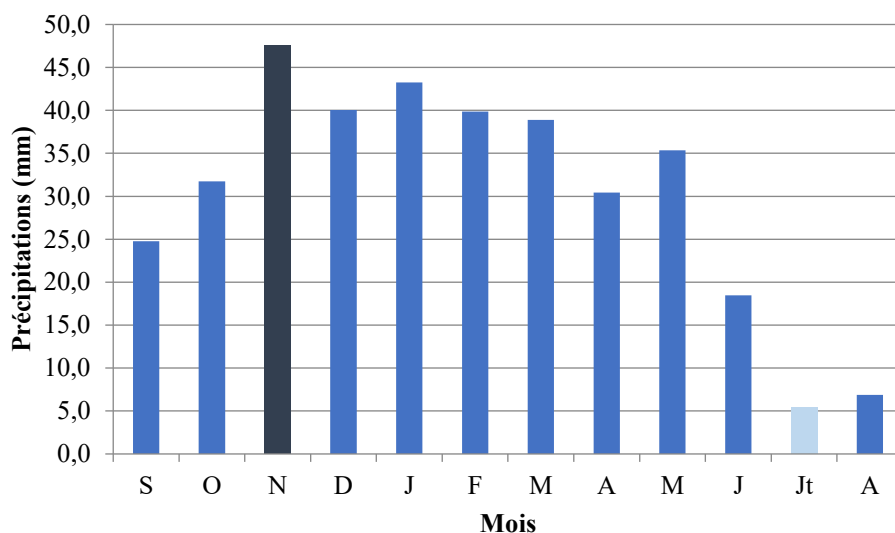


Figure III.6 : Précipitations moyennes mensuelles à la station deHaçaiba (1970/1971- 2023/2024)

III.1.2.2. Station de Sidi Bel Abbès

Les données des précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Sidi Bel Abbès durant la période (1970/1971- 2023/2024) sont reportées sur le tableau III.7:

Tableau III.7: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès (1970/1971- 2023/2024)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
PP (mm)	15.9	38.6	51.1	62.8	63.5	47.5	40.5	41.3	32.7	9.9	1.8	3.6

La répartition moyenne mensuelle des précipitations (fig.III.7) met en évidence un régime climatique fortement saisonnier. Les précipitations maximales sont enregistrées en hiver, avec un pic Janvier, suivies de valeurs élevées en Décembre et Février. À l’inverse, l’Eté est marqué par une quasi-absence de précipitations, notamment en Juillet et Août. Ce profil confirme la dominance d’un régime pluviométrique de type méditerranéen, où la ressource en eau est fortement concentrée sur quelques mois de l’année.

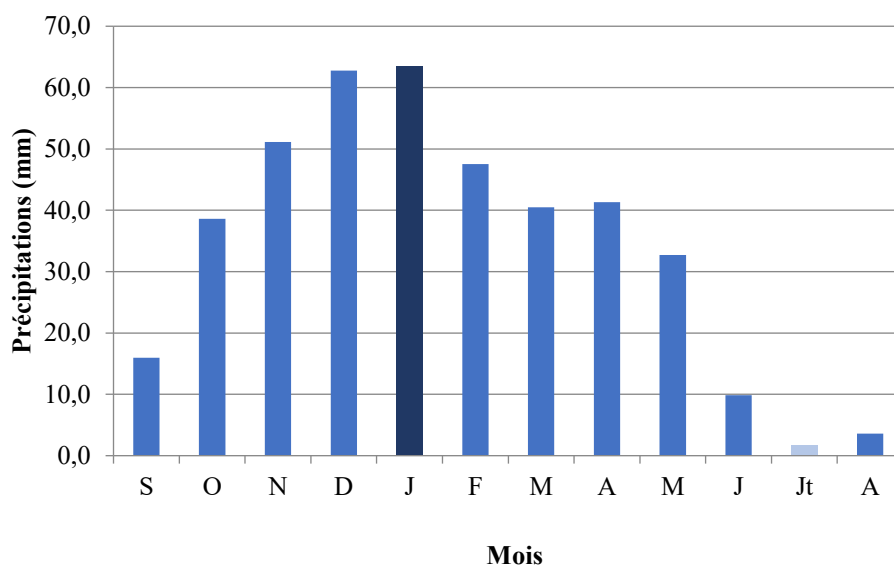


Figure III.7 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Bel Abbès
(1970/1971- 2023/2024)

III.1.2.3. Station de Sidi Ali Benyoub

Les données des précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Sidi Ali Benyoub durant la période (1970/1971- 2023/2024) sont reportées sur le tableau III.8:

Tableau III.8: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Ali Benyoub
(1970/1971- 2023/2024)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
PP (mm)	20.1	35.6	52.1	56.6	58.0	49.1	40.5	35.8	32.8	14.1	2.7	4.7

Le régime pluviométrique moyen mensuel à la station de Sidi Ali Benyoub (fig.III.8), montre une forte saisonnalité, typique du climat méditerranéen. Les précipitations sont principalement concentrées entre Novembre et Mars, avec un maximum enregistré en Janvier. Par contre, la période estivale, notamment Juillet et Août, est marquée par une sécheresse quasi-totale. Cette répartition confirme la dépendance de la ressource en eau aux précipitations hivernales et souligne la vulnérabilité de la région face aux épisodes de sécheresse estivale.

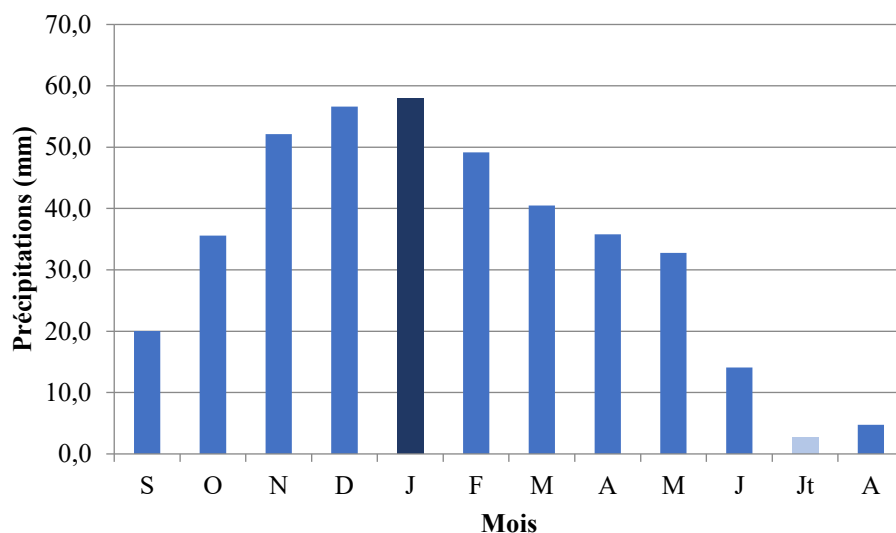


Figure III.8 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Sidi Ali Benyoub (1970/1971- 2023/2024)

III.1.2.4. Station moyenne

Tableau III.9: Précipitations moyennes mensuelles de la station moyenne (1970/1971- 2023/2024)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Haçaiba	24.8	31.7	47.5	40.1	43.3	39.9	38.9	30.4	35.4	18.5	5.4	6.9
SBA	15.9	38.6	51.1	62.8	63.5	47.5	40.5	41.3	32.7	9.9	1.8	3.6
SAB	20.1	35.6	52.1	56.6	58.0	49.1	40.5	35.8	32.8	14.1	2.7	4.7
Station moy	20.3	35.3	50.3	53.1	54.9	45.5	40.0	35.8	33.6	14.2	3.3	5.1

L'analyse comparative des précipitations mensuelles moyennes des stations de Haçaiba, Sidi Bel Abbès (SBA) et Sidi Ali Benyoub (SAB) (fig.III.9), met en évidence un régime pluviométrique typiquement méditerranéen, caractérisé par une forte saisonnalité. Les précipitations sont concentrées principalement entre Novembre et Avril, période correspondant à la saison humide. La station de Sidi Bel Abbès enregistre les valeurs les plus élevées, avec un maximum observé en Janvier, suivie de près par Sidi Ali Benyoub. La station de Haçaiba, quant à elle, se distingue par des précipitations globalement plus faibles, avec un pic plus précoce en Novembre. À partir de Mai, les précipitations diminuent progressivement dans l'ensemble des stations, annonçant la transition vers une saison sèche marquée. Durant les mois d'été, notamment en Jet Août, les précipitations deviennent faibles dans les trois stations, accentuant ainsi la sécheresse estivale. Cette répartition souligne la forte dépendance hydrologique de la région aux apports hivernaux et met en lumière sa vulnérabilité face aux épisodes de sécheresse, notamment en période estivale.

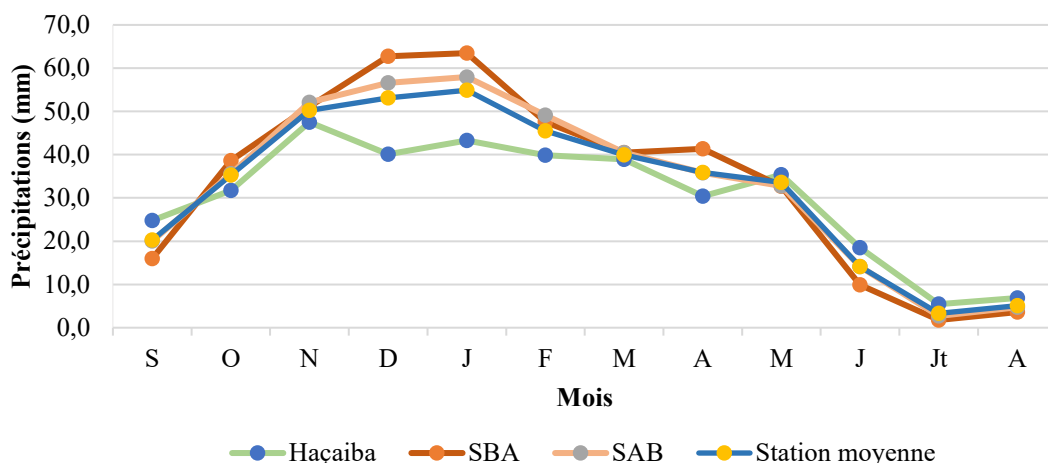


Figure III.9 : Précipitations moyennes mensuelles au niveau du bassin de la Mekerra (1970/1971- 2023/2024)

III.1.3. Précipitation moyenne saisonnières

III.1.3.1. Station de Haçaiba

Les données de précipitations enregistrées dans cette station au cours des quatre saisons sont présentées dans le tableau III.10 suivant :

Tableau III.10: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Haçaiba (1970/1971- 2023/2024)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
PP (mm)	104	123.2	104.7	30.8

Les précipitations enregistrées dans cette station (fig.III.10), présentent une forte variabilité saisonnière. La saison hivernale est la plus humide avec 123,2 mm, suivie de près par le printemps et l’automne (104 mm), alors que la saison estivale, se caractérise par un déficit marqué, avec seulement 30,8 mm de précipitations. Cette distribution saisonnière met en évidence un régime pluviométrique de type méditerranéen, marqué par des hivers humides et des étés secs.

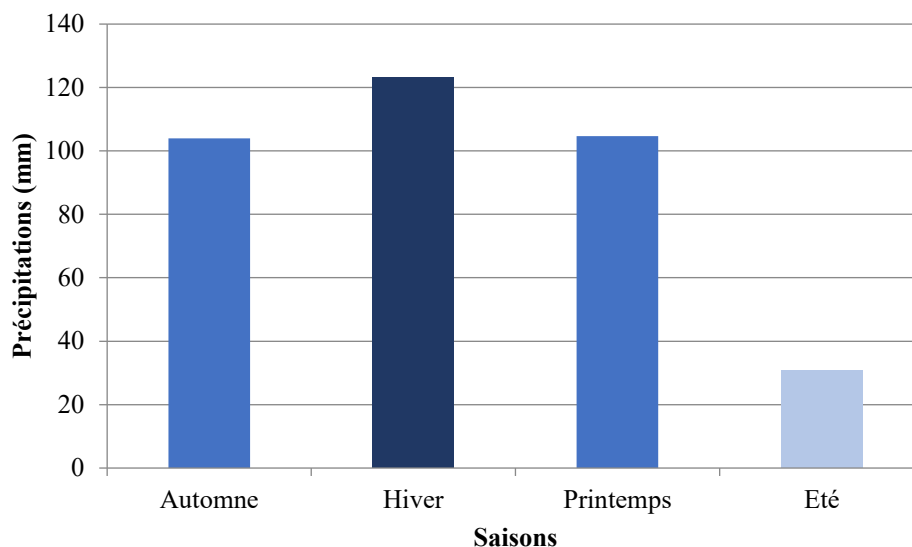


Figure III.10 : Précipitations moyennes saisonnières à la station de Haçaiba (1970/1971- 2023/2024)

III.1.3.2. Station de Sidi Bel Abbès

Tableau III.11: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbès (1970/1971- 2023/2024)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
PP (mm)	105.7	173.8	114.5	15.3

La distribution saisonnière des précipitations (fig.III.11) révèle une prédominance marquée de la saison hivernale, qui concentre à elle seule plus de 40 % des apports annuels (173,8 mm). Le Printemps (114,5 mm) et l'Automne (105,7 mm) contribuent également de manière significative aux précipitations totales, contrairement à l'été qui est très faiblement arrosé avec seulement 15,3 mm, traduisant une période de sécheresse marquée. Ce régime pluviométrique saisonnier est typique d'un climat méditerranéen, caractérisé par des hivers humides et des étés secs.

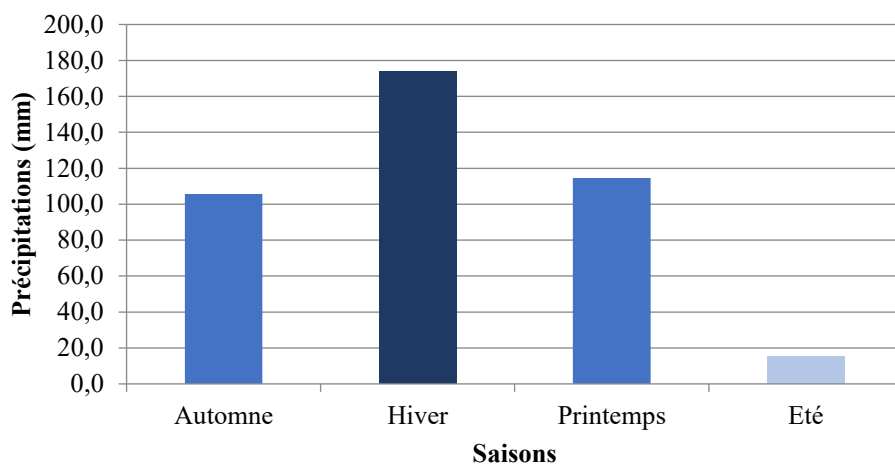


Figure III.11 : Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Bel Abbas
(1970/1971- 2023/2024)

III.1.3.3. Station de Sidi Ali Benyoub

Tableau III.12: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Ali Benyoub
(1970/1971- 2023/2024)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
PP (mm)	107.8	163.7	109.0	21.6

Le régime pluviométrique est là aussi fortement saisonnier, avec un maximum en Hiver et un minimum marqué en Eté (fig.III.12). Cette distribution est classique dans les régions méditerranéennes et influence directement la disponibilité en eau, la végétation, et les débits des cours d'eau, notamment dans le bassin étudié.

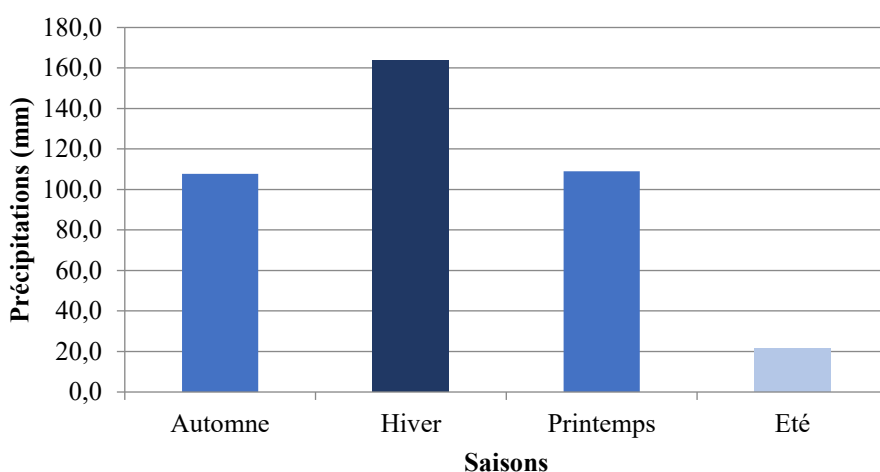


Figure III.12 : Précipitations moyennes saisonnières à la station de Sidi Ali Benyoub
(1970/1971- 2023/2024)

III.1.3.4. Station moyenne

Tableau III.13: Précipitations moyennes saisonnières au niveau du bassin de la Mekerra (1970/1971- 2023/2024)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Haçaiba	104.0	123.2	104.7	30.8
SBA	105.7	173.8	114.5	15.3
SAB	107.8	163.7	109.0	21.6
Station moyenne	105.8	153.6	109.4	22.5

L'examen de la figure III.13 et le tableau précédent confirment que le régime pluviométrique est typiquement méditerranéen à semi-aride, avec un maximum hivernal, surtout marqué à Sidi Bel Abbès. Des saisons intermédiaires (Automne/Printemps) sont assez équilibrées. Nous notons un minimum estival prononcé, surtout à SBA. Cette dernière semble la station la plus exposée aux perturbations hivernales. Haçaiba reçoit des précipitations plus faibles en Hiver, mais légèrement plus en été que les autres peut être dues à des orages estivaux plus fréquents.

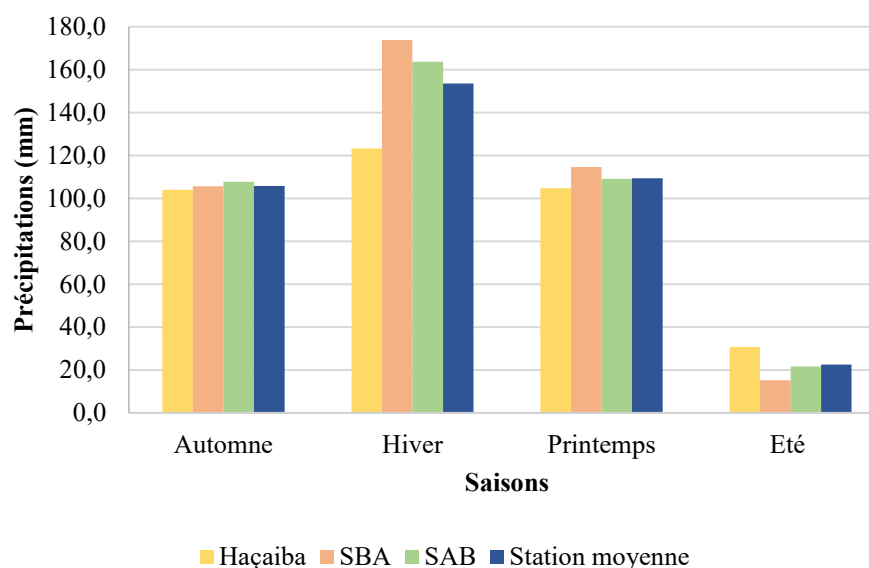


Figure III.13 : Précipitations moyennes saisonnières de la station moyenne (1970/1971- 2023/2024)

III.2. Etude des températures

L'analyse des températures dans le bassin versant de la Mekerra, à partir des stations pluviométriques de Haçaiba, Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub, constitue une étape

fondamentale pour mieux appréhender le fonctionnement hydrologique de la région. Bien que ces stations soient principalement utilisées pour la mesure des précipitations, elles sont généralement dotées de capteurs permettant également d'enregistrer la température de l'air. Ces données thermiques sont indispensables pour étudier les variations saisonnières et interannuelles de la température, ainsi que leur influence sur des processus tels que l'évapotranspiration et les régimes d'écoulement.

III.2.1. Variation des températures moyennes interannuelles

Les données de température exploitées dans cette étude proviennent de la plateforme Climate Toolbox, couvrant la période allant de 1970/1971 à 2023/2024.

III.2.1.1. Station de Haçaiba

La variation des températures moyennes annuelles enregistrée à cette station au cours de la période 1970/1971–2023/2024 (tabl.14 et fig.III.14) révèle une moyenne annuelle de 14,94 °C. La température la plus élevée a été observée en 2023/2024 avec 17,18 °C, tandis que la plus basse a été enregistrée en 1971/1972, atteignant 13,57 °C.

Tableau III.14: Températures moyennes annuelles à la station de Haçaiba (1970/1971–2023/2024)

Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)
1970-1971	13.92	1984-1985	14.53	1998-1999	14.68	2012-2013	14.68
1971-1972	13.57	1985-1986	14.65	1999-2000	15.09	2013-2014	15.12
1972-1973	13.79	1986-1987	14.67	2000-2001	15.36	2014-2015	15.72
1973-1974	14.15	1987-1988	15.21	2001-2002	14.76	2015-2016	15.65
1974-1975	13.95	1988-1989	14.92	2002-2003	15.44	2016-2017	15.99
1975-1976	13.82	1989-1990	15.69	2003-2004	14.90	2017-2018	14.85
1976-1977	13.94	1990-1991	14.48	2004-2005	14.61	2018-2019	15.36
1977-1978	14.46	1991-1992	14.07	2005-2006	14.99	2019-2020	16.14
1978-1979	14.81	1992-1993	14.36	2006-2007	15.23	2020-2021	16.38
1979-1980	14.41	1993-1994	14.82	2007-2008	15.00	2021-2022	16.00
1980-1981	14.23	1994-1995	14.94	2008-2009	14.78	2022-2023	16.88
1981-1982	15.47	1995-1996	14.91	2009-2010	15.56	2023-2024	17.18
1982-1983	14.20	1996-1997	14.71	2010-2011	15.26	T _{moyenne} = 14,94 °C	
1983-1984	14.64	1997-1998	15.25	2011-2012	14.86		

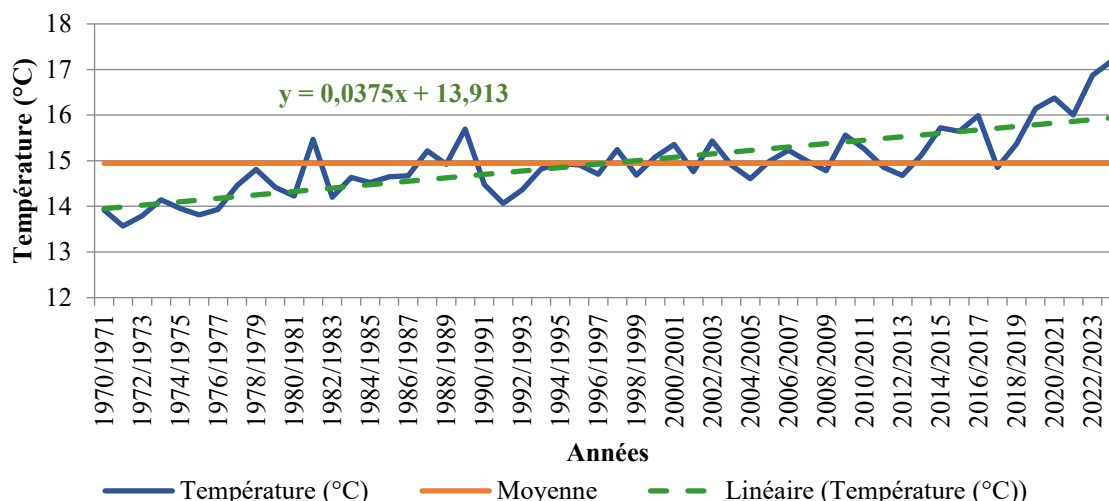


Figure III.14 : Variation interannuelle des températures à la station de Haçaiba (1970/1971–2025/2024)

III.2.1.2. Station de Sidi Bel Abbès

L'analyse de la variation des températures moyennes annuelles à la station de Sidi Bel Abbès sur la période 1970/1971–2023/2024 (tabl.III.15 et fig.III.15) montre une moyenne annuelle de 17,05 °C. La température la plus élevée a été enregistrée en 2022/2023 avec 19,13 °C, tandis que la plus basse a été observée en 1971/1972 avec 15,71 °C.

Tableau III.15: Températures moyennes annuelles à la station de Sidi Bel Abbes (1970/1971–2023/2024)

Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)
1970-1971	16.05	1984-1985	16.65	1998-1999	16.82	2012-2013	16.81
1971-1972	15.71	1985-1986	16.78	1999-2000	17.21	2013-2014	17.29
1972-1973	15.88	1986-1987	16.81	2000-2001	17.48	2014-2015	17.87
1973-1974	16.26	1987-1988	17.36	2001-2002	16.86	2015-2016	17.74
1974-1975	16.04	1988-1989	17.06	2002-2003	17.57	2016-2017	18.15
1975-1976	15.92	1989-1990	17.81	2003-2004	17.06	2017-2018	16.99
1976-1977	16.04	1990-1991	16.61	2004-2005	16.73	2018-2019	17.33
1977-1978	16.56	1991-1992	16.19	2005-2006	17.09	2019-2020	18.08
1978-1979	16.92	1992-1993	16.50	2006-2007	17.37	2020-2021	18.28
1979-1980	16.53	1993-1994	16.96	2007-2008	17.12	2021-2022	17.87
1980-1981	16.33	1994-1995	17.06	2008-2009	16.93	2022-2023	19.13
1981-1982	17.58	1995-1996	17.04	2009-2010	17.68	2023-2024	18.94
1982-1983	16.31	1996-1997	16.84	2010-2011	17.37	T _{moyenne} = 17,05 °C	
1983-1984	16.74	1997-1998	17.36	2011-2012	16.98		

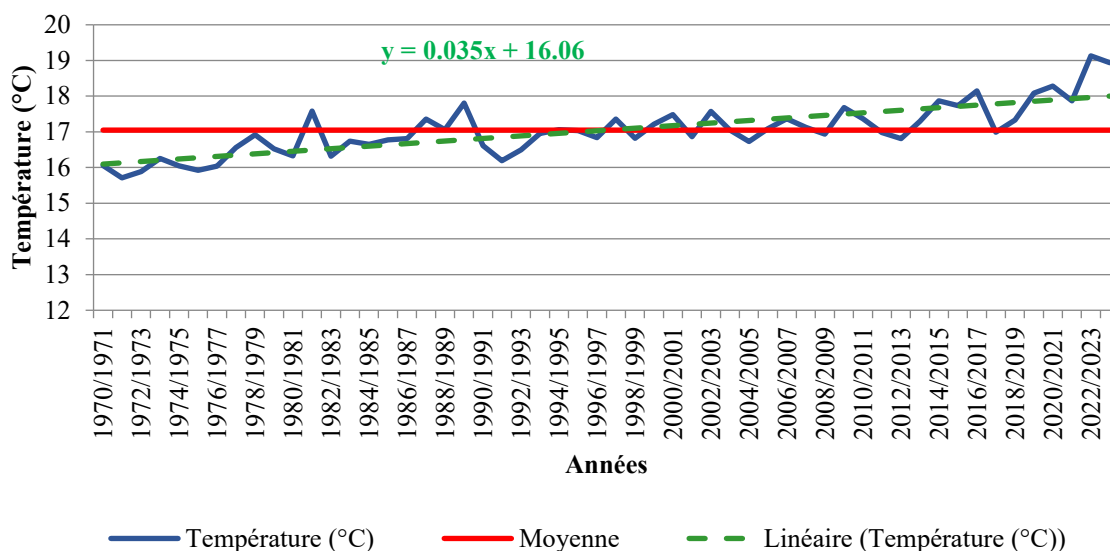


Figure III.15 : Variation interannuelle des températures à la station de Sidi Bel Abbès (1970/1971–2023/2024)

III.2.1.3. Station de Sidi Ali Benyoub

D’après les données présentées dans le tableau III.16 et la figure III.16, les températures moyennes annuelles enregistrées à cette station entre 1970/1971 et 2023/2024 affichent une moyenne de 15,87 °C. La valeur maximale, atteignant 17,929 °C, a été relevée au cours de l’année 2022/2023, tandis que la valeur minimale, 14,52 °C, remonte à l’année 1971/1972.

Tableau III.16: Températures moyennes annuelles à la station de Sidi Ali Benyoub (1970/1971–2023/2024)

Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)	Année	T (°C)
1970-1971	14.86	1984-1985	15.46	1998-1999	15.62	2012-2013	15.61
1971-1972	14.52	1985-1986	15.58	1999-2000	16.02	2013-2014	16.07
1972-1973	14.71	1986-1987	15.61	2000-2001	16.29	2014-2015	16.67
1973-1974	15.08	1987-1988	16.16	2001-2002	15.68	2015-2016	16.59
1974-1975	14.88	1988-1989	15.86	2002-2003	16.37	2016-2017	16.93
1975-1976	14.74	1989-1990	16.62	2003-2004	15.85	2017-2018	15.78
1976-1977	14.86	1990-1991	15.41	2004-2005	15.54	2018-2019	16.19
1977-1978	15.38	1991-1992	15.00	2005-2006	15.91	2019-2020	16.96
1978-1979	15.74	1992-1993	15.30	2006-2007	16.17	2020-2021	17.21
1979-1980	15.35	1993-1994	15.76	2007-2008	15.93	2021-2022	16.79
1980-1981	15.15	1994-1995	15.87	2008-2009	15.72	2022-2023	17.93
1981-1982	16.40	1995-1996	15.84	2009-2010	16.49	2023-2024	17.88
1982-1983	15.13	1996-1997	15.64	2010-2011	16.19	T _{moyenne} = 15,87 °C	
1983-1984	15.57	1997-1998	16.17	2011-2012	15.78		

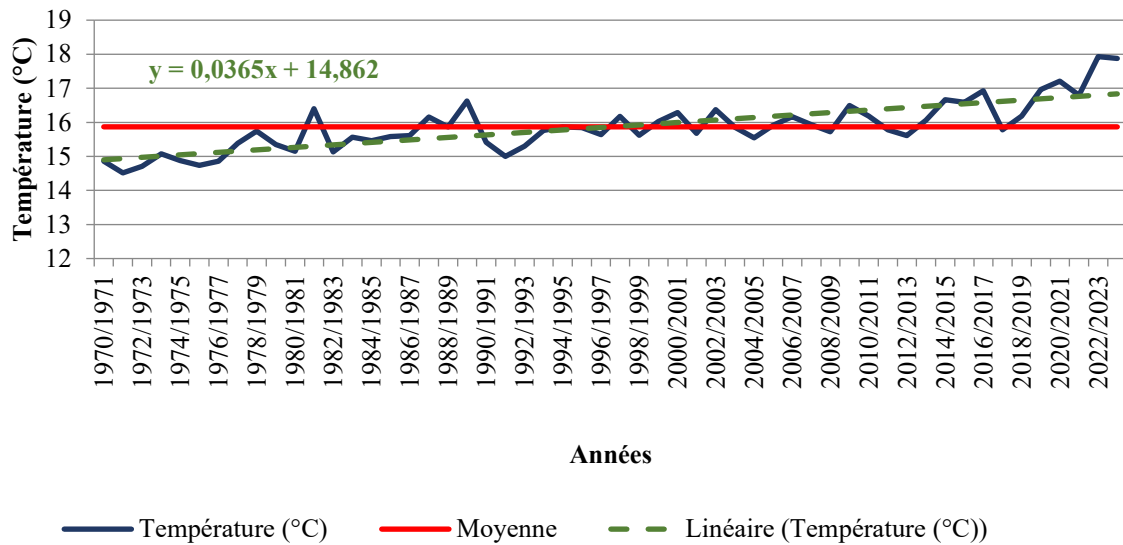


Figure III.16 : Variation interannuelle des températures à la station de Sidi Ali Benyoub (1970/1971–2023/2024)

L'analyse des températures moyennes annuelles sur la période 1970/1971–2023/2024 pour les trois stations révèle une tendance générale à la hausse, avec des valeurs maximales récentes et des valeurs minimales concentrées en début de période.

Nous observons une diminution progressive de la température avec l'augmentation de l'altitude. La station de Heçaiba, la plus élevée (950 m), enregistre la température moyenne annuelle la plus basse (14,94 °C), tandis que Sidi Bel Abbès, située à plus basse altitude (485 m), présente la moyenne la plus élevée (17,05 °C).

Cette tendance est conforme au gradient thermique vertical, qui indique que la température de l'air diminue généralement d'environ 0,6 à 1 °C tous les 100 mètres de dénivelé, selon les conditions locales. La différence de température moyenne entre Sidi Bel Abbès et Heçaiba est d'environ 2,1 °C pour un écart d'altitude de 465 m, ce qui correspond bien à ce gradient.

Les températures maximales ont été enregistrées très récemment (2022/2023 et 2023/2024), ce qui illustre un réchauffement marqué au cours des dernières décennies. À l'inverse, les températures minimales sont toutes observées en 1971/1972, confirmant une élévation des températures sur le long terme.

Cette évolution témoigne d'un réchauffement climatique régional progressif, cohérent avec les tendances globales observées à l'échelle du bassin méditerranéen.

III.2.2. Variation des températures moyennes mensuelles

Le tableau III.17 et la figure III.17 représentent l'évolution mensuelle des températures moyennes pour les trois stations climatiques : Haçaiba (950 m), Sidi Ali Benyoub (635 m) et Sidi Bel Abbès (485 m).

La courbe présente une forme parabolique inversée, typique des climats méditerranéens, avec des températures minimales en Hiver (de Décembre à Février) et maximales en Eté (de Juin à Août). Pour chaque mois, Sidi Bel Abbès enregistre systématiquement les températures les plus élevées, suivie de Sidi Ali Benyoub, puis de Haçaiba, qui présente les valeurs les plus faibles. L'écart de température entre les stations est plus marqué en Hiver (jusqu'à 4 °C de différence), tandis qu'il tend à se réduire en Eté, notamment entre Juin et Août.

Tableau III.17: Température moyennes mensuelles pour les trois stations (1970/1971- 2023/2024)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Haçaiba	21.09	16.15	10.23	6.93	6.19	7.58	10.05	12.89	16.58	21.01	25.10	25.55
SBA	22.58	18.89	13.49	10.47	9.24	10.31	12.18	14.74	18.04	22.53	25.95	26.17
SAB	21.6	17.8	12.0	8.9	8.0	8.9	10.9	13.7	16.9	21.2	25.1	25.5

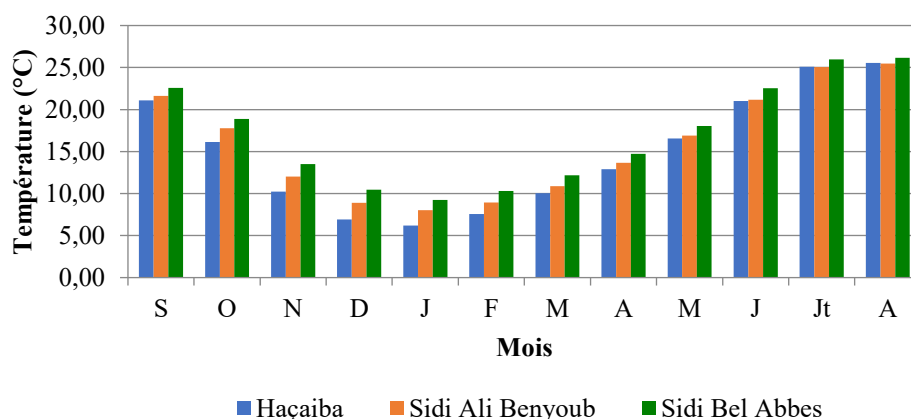


Figure III.17: Variation mensuelle des températures au niveau des trois stations (1970/1971 – 2023/2024)

III.2.3. Variation des températures moyennes saisonnières

Le tableau III.18 et la figure III.18 montrent une variation saisonnière typique d'un climat semi-aride à méditerranéen. Sidi Bel Abbès présente un profil thermique légèrement plus chaud que les deux autres stations, probablement en lien avec des différences géographiques locales (altitude, urbanisation, continentalité, etc.). Haçaiba semble plus influencée par des conditions plus fraîches, en particulier en Hiver.

Les écarts de température entre les stations sont plus marqués en Hiver (≈ 3 °C) qu'en Eté ($\approx 0,5$ °C), ce qui peut confirmer cet effet d'altitude ou de continentalité plus fort en Hiver.

Tableau III.18: Température moyennes saisonnières pour les trois stations
(1970/1971- 2023/2024)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Haçaiba	15.82	6.90	13.17	23.89
SBA	18.32	10.01	14.98	24.88
SAB	17.14	8.62	13.82	23.89

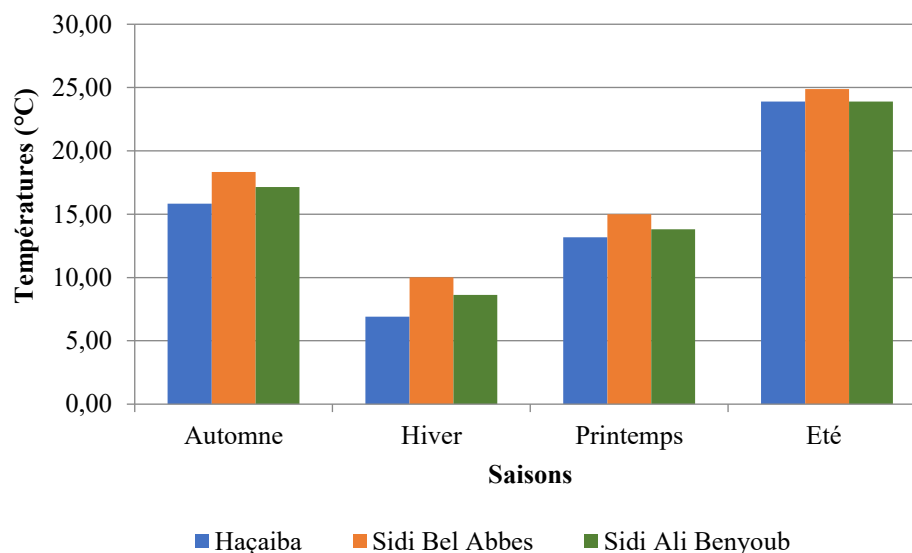


Figure III.18: Variation saisonnière des températures pour les trois stations
(1970/1971 – 2023/2024)

III.3. Etude du climat

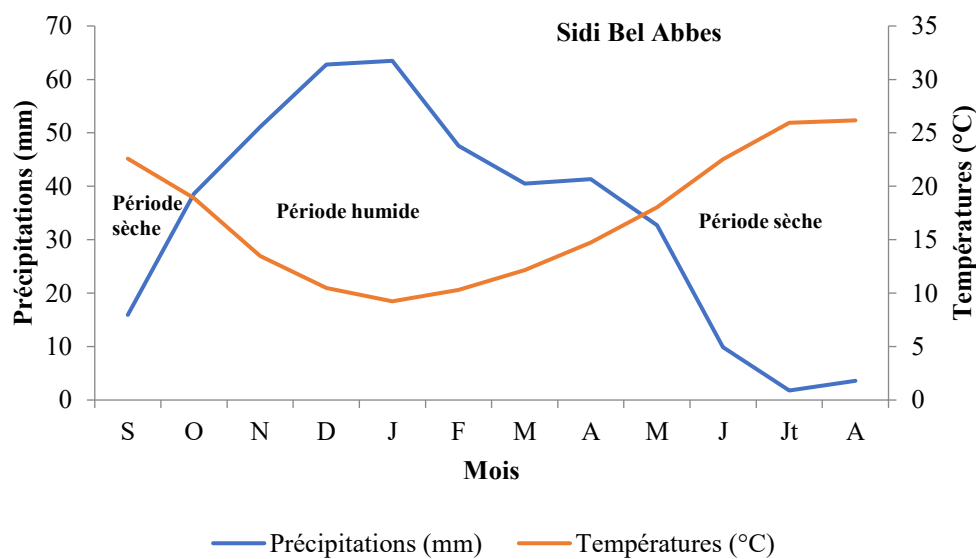
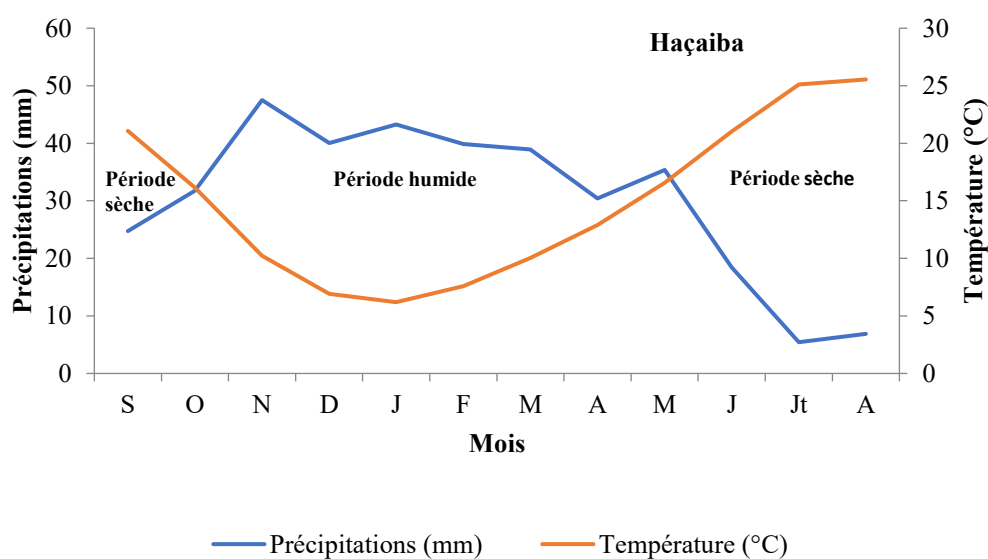
Pour analyser le climat du bassin versant de l'Oued Mekerra, il est essentiel de prendre en compte plusieurs paramètres, notamment la courbe pluviothermique ainsi que différents indices climatiques.

III.3.1. Courbe pluviothermique

La courbe ombrothermique de Bagnouls et Gausson est un outil graphique qui permet de représenter simultanément les températures et les précipitations mensuelles d'une région. Elle repose sur le critère $P < 2T$, qui permet de détecter les périodes de sécheresse. Ces informations sont particulièrement utiles dans les régions semi-arides pour anticiper les périodes critiques, notamment les épisodes de sécheresse ou les risques de crue. Dans le cas du bassin versant de l'Oued Mekerra, cette représentation (fig.III.19) permet d'identifier les mois durant lesquels le sol est sec, ce qui implique une faible capacité de ruissellement. Les résultats pour cette étude sont illustrés sur le tableau qui suit :

Tableau III. 19 : Précipitations et températures moyennes des trois stations (1970/1971- 2023/2024)

Stations	Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Haçaiba	PP (mm)	24.8	31.7	47.5	40.1	43.3	39.9	38.9	30.4	35.4	18.5	5.4	6.9
	T (°C)	21.09	16.15	10.23	6.93	6.19	7.58	10.05	12.89	16.58	21.01	25.10	25.55
SBA	PP (mm)	15.9	38.6	51.1	62.8	63.5	47.5	40.5	41.3	32.7	9.9	1.8	3.6
	T (°C)	22.58	18.89	13.49	10.47	9.24	10.31	12.18	14.74	18.04	22.53	25.95	26.17
SAB	PP (mm)	20.1	35.6	52.1	56.6	58.0	49.1	40.5	35.8	32.8	14.1	2.7	4.7
	T (°C)	21.61	17.76	12.04	8.91	8.02	8.93	10.88	13.68	16.90	21.15	25.06	25.46



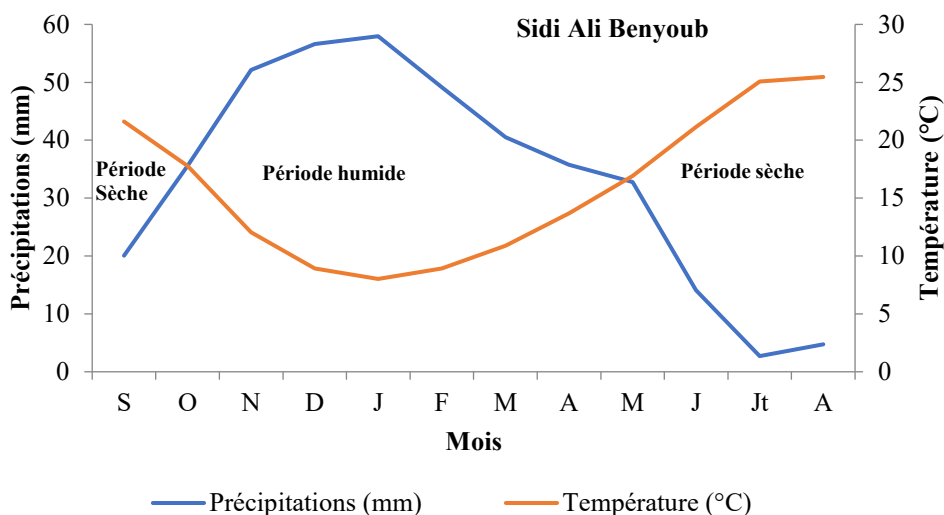


Figure III.19: Diagramme pluviothermique de Bagnouls et Gausсен
(1970/1971 – 2023/2024)

Les trois stations (Haçaiba, Sidi Bel Abbès et Sidi Ali Benyoub) présentent un régime climatique homogène, avec des hivers humides du mi Octobre au mi Mai et des étés chauds et secs. Ce cycle est typique du climat méditerranéen à influence semi-aride, dominant dans l'Ouest algérien. Quelques variations mineures en précipitations, probablement liées à leur microclimat local ou à l'altitude.

III.3.2. Indice d'aridité de De Martonne

Simple à calculer cet indice permet de caractériser le degré d'aridité ou d'humidité d'un climat (tabl.III.20 et III.21)

$$I = \frac{P}{T+10} \quad \text{Eq. III.1}$$

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

T : Températures moyennes annuelles (°C).

I : indice d'aridité

Tableau III.20: Indice de De Martonne calculé au niveau du bassin de la Mekerra
(1970/1971 – 2023/2024)

Stations	Précipitations (mm)	Température (°C)	Indice de De Martonne
Haçaiba	362.7	14.94	14.54
Sidi Bel Abbes	409.3	17.05	15.13
Sidi Ali Benyoub	402.1	15.87	15.54
Station moyenne	391.4	15.95	15.08

Tableau III.21: Classification du climat suivant l'indice de De Martonne
(Lebourgeois et al., 2005)

Indice I	Caractérisation du climat
$I < 5$	Hyper aride (Très sec, désertique, peu ou pas de végétation naturelle)
$5 < I < 10$	Aride (Sec, steppes ou prairies sèches, agriculture difficile sans irrigation)
$10 < I < 20$	Semi-aride (souvent méditerranéen sec, avec une saison sèche marquée)
$20 < I < 30$	Subhumide (Pluies suffisantes pour l'agriculture, végétation plus dense)
$I > 30$	Humide (Régions bien arrosées, forêts tempérées ou tropicales, cultures intensives)

L'indice de 15,08 place Mekerra dans la zone semi-aride, les précipitations sont modérées mais insuffisantes pour une agriculture pluviale stable sans apport d'eau (irrigation souvent nécessaire).

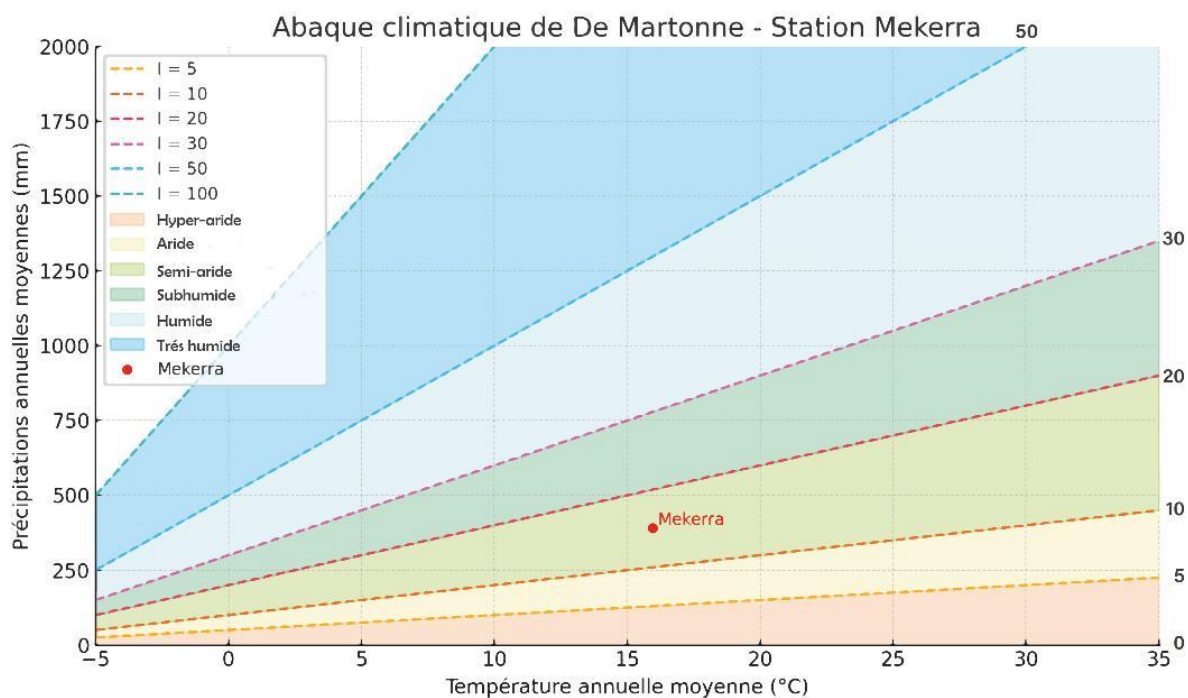


Figure III.20: Classification du climat selon l'abaque de Martonne.

III.4. Etude des débits

Dans le cadre de l'analyse hydrologique du bassin versant de la Mekerra, les données de débit utilisées proviennent de la station hydrométrique de Sidi Bel Abbès, qui constitue un principal point de mesure sur le cours principal de l'oued. Ces données, enregistrées sur une période de 38 ans (1974/1975 – 2011/2012), nous donne une idée sur la variabilité hydrologique et l'évaluation des ressources en eau dans cette région semi-aride.

III.4.1 Variation interannuelle des débits

Le débit moyen enregistré à la station de Sidi Bel Abbès (tabl.III.22 et fig.III.21) est de 0,80 m³/s. Les valeurs extrêmes observées durant la période d'étude varient entre un débit minimum de 0,27m³/s enregistré en (1998/1999) et un débit maximum de 1,8715 m³/s (2008/2009).

L'analyse des débits annuels observés à la station de Sidi Bel Abbès met en évidence une forte variabilité interannuelle, avec une majorité d'années déficitaires par rapport à la moyenne (26 années sur 38). Cette irrégularité, conjuguée à des valeurs extrêmes relativement éloignées, témoigne du caractère instable du régime hydrologique de l'oued Mekerra. Ces résultats sont caractéristiques des bassins versants situés en zone semi-aride, où les ressources en eau sont soumises à des pressions climatiques croissantes.

Tableau III.22 : Débits moyens annuels à la station de Sidi Bel Abbès
(1974/1975 – 2011/2012)

Année	Q (m ³ /s)	Année	Q (m ³ /s)	Année	Q (m ³ /s)
1974/1975	0.86	1987/1988	0.60	2000/2001	0.79
1975/1976	0.84	1988/1989	0.65	2001/2002	1.19
1976/1977	0.63	1989/1990	1.18	2002/2003	0.52
1977/1978	0.70	1990/1991	1.05	2003/2004	0.85
1978/1979	0.60	1991/1992	0.57	2004/2005	0.32
1979/1980	0.67	1992/1993	0.49	2005/2006	0.55
1980/1981	0.69	1993/1994	0.38	2006/2007	0.68
1981/1982	0.72	1994/1995	1.39	2007/2008	0.57
1982/1983	0.64	1995/1996	1.73	2008/2009	1.87
1983/1984	0.60	1996/1997	0.65	2009/2010	1.10
1984/1985	0.72	1997/1998	1.32	2010/2011	0.79
1985/1986	0.74	1998/1999	0.27	2011/2012	0.94
1986/1987	0.84	1999/2000	0.62	Q moyen = 0.80 m³/s	

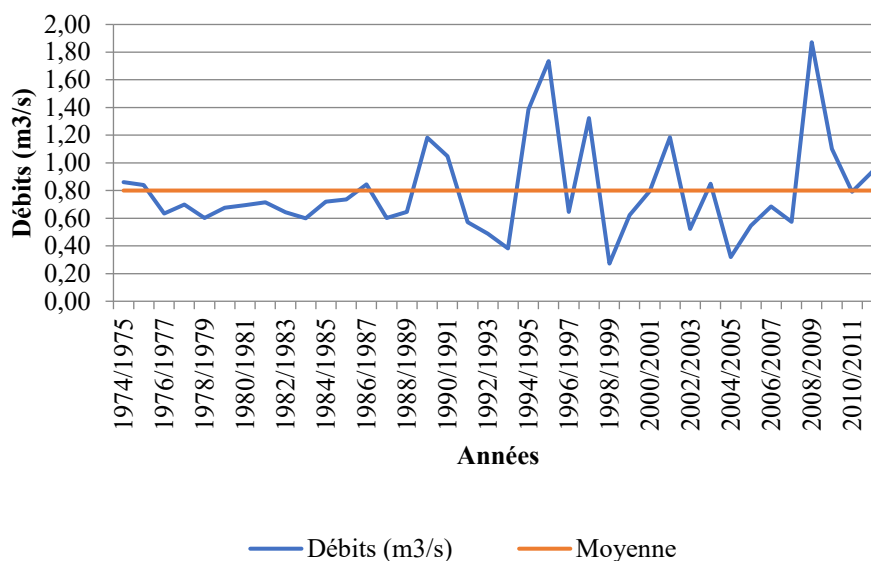


Figure III.21 : Débits moyens annuels à la station de Sidi Bel Abbès (1974/1975–2011/2012)

III.4.2. Variation des débits moyens mensuels

L'analyse des débits moyens mensuels observés à la station de Sidi Bel Abbès durant la période 1974/1975 – 2011/2012 (tabl.III.22 et fig.III.21) révèle une forte variabilité intra-annuelle. Le débit moyen le plus élevé est enregistré au mois d'Octobre, atteignant $1,47 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur élevée s'explique probablement par l'arrivée des premières pluies automnales après la saison sèche. Par opposition, le mois de Juillet présente le débit moyen le plus faible, avec seulement $0,47 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui peut être attribué à l'évaporation intense en période estivale ainsi qu'à l'absence quasi totale de précipitations durant cette période.

Cette variabilité mensuelle des débits reflète clairement l'influence du climat méditerranéen caractérisé par des hivers pluvieux et des étés secs. Le pic de débit en Octobre indique une réaction rapide du bassin versant aux premières pluies, ce qui pourrait également traduire un sol sec initialement peu apte à l'infiltration, favorisant ainsi l'écoulement de surface. À l'inverse, le creux estival de juillet témoigne d'un déficit hydrique important, aggravé par l'évaporation maximale et l'absence de recharge hydrologique.

Tableau III.23 : Débits moyens mensuels à la station de Sidi Bel Abbès (1974/1975 – 2011/2012)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Q(m ³ /s)	1.27	1.47	0.86	0.54	0.59	0.73	0.73	0.75	0.88	0.7	0.47	0.58

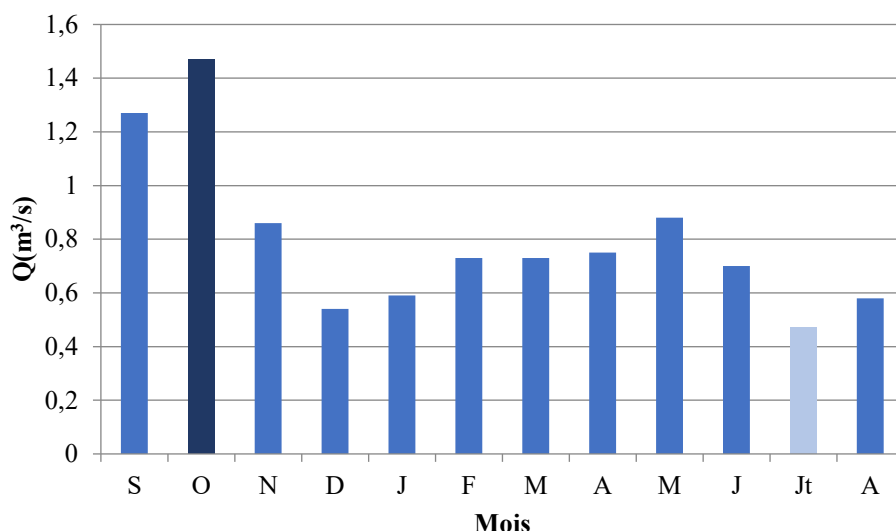


Figure III.22: Débits moyens mensuels à la station de Sidi Bel Abbès (1974/1975–2011/2012)

III.4.3. Variation des débits moyens saisonniers

L'analyse des débits moyens saisonniers mesurés à la station de Sidi Bel Abbès sur la période 1974/1975 – 2011/2012 (tabl.III.24 et fig.III.23) met en évidence une forte variabilité intersaisonnière des écoulements.

La saison automnale enregistre les débits moyens les plus élevés, atteignant 1,2 m³/s. Cette situation s'explique principalement par la reprise des précipitations après la sécheresse estivale. Les sols, souvent desséchés en fin d'Eté, favorisent le ruissellement immédiat, ce qui entraîne une augmentation significative des débits superficiels.

En Hiver, malgré des précipitations souvent abondantes, le débit moyen est modérément plus bas, avec une valeur de 0,62 m³/s. Cette situation peut s'expliquer par une infiltration plus importante des eaux dans le sol, réduisant ainsi la part du ruissellement immédiat. Il est probable que les sols redeviennent perméables à cette période, favorisant la recharge des nappes souterraines plutôt que l'écoulement de surface.

Le Printemps, avec un débit moyen de 0,79 m³/s, représente une période de transition. Les débits restent relativement soutenus en raison des précipitations résiduelles, mais commencent à diminuer progressivement avec la baisse des précipitations et la montée des températures.

Enfin, l'Eté affiche les valeurs les plus faibles, avec une moyenne de 0,58 m³/s. Cette période est marquée par un fort stress hydrique dû à la quasi-absence de précipitations et à une évaporation maximale sous l'effet des températures élevées. Ces conditions accentuent l'assèchement des cours d'eau et réduisent fortement les débits.

Tableau III.24 : Débits moyens saisonniers à la station de Sidi Bel Abbès (1974/1975 – 2011/2012)

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Q(m ³ /s)	1.2	0.62	0.79	0.58

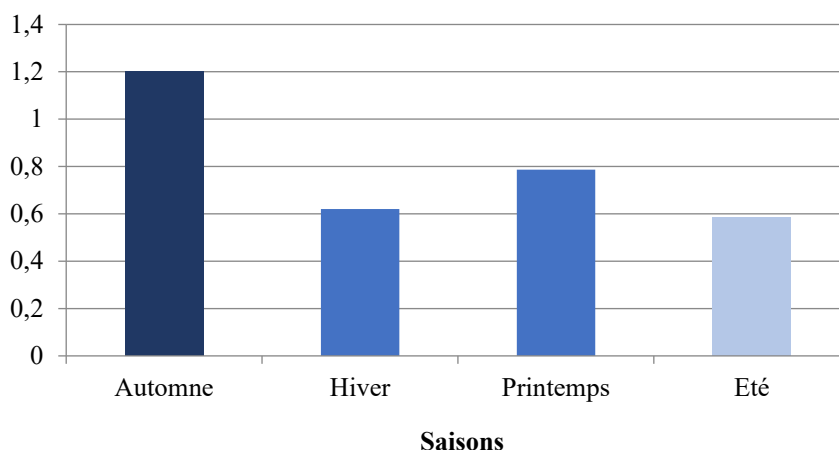


Figure III.23 : Débits moyens saisonniers à la station de Sidi Bel Abbès (1974/1975–2011/2012)

III.4. 4. Corrélation pluie-débit au niveau de la Mékerra

L'analyse de l'évolution mensuelle moyenne des précipitations et des débits dans le bassin versant de la Mekerra sur la période 1974/1975 – 2011/2012 (tabl.III.25 et fig.III.24) met en évidence un décalage temporel entre les pics pluviométriques et les pics de débits. Ce décalage traduit des dynamiques hydrologiques distinctes selon les saisons.

En Automne, les précipitations entraînent un ruissellement direct, provoquant une réponse hydrologique rapide et marquée des cours d'eau. À l'inverse, durant l'Hiver, bien que les précipitations soient encore présentes, une plus grande part de l'eau s'infiltré dans les sols, ce qui limite l'augmentation des débits. En Été, les écoulements atteignent leur niveau le plus bas, en raison d'une évaporation très élevée qui réduit considérablement la disponibilité en eau de surface.

En effet, cette figure montre un découplage partiel entre précipitations et débits, suggérant une forte capacité de régulation du bassin. Cela peut être lié à sa géologie, son occupation du sol, ou à des apports souterrains retardés. Il témoigne également d'un régime hydrologique de type méditerranéen, typique des régions d'Afrique du Nord.

Tableau III.25 : Précipitations et débits moyens mensuels au niveau du bassin de la Mekerra (1974/1975 – 2011/2012)

C	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
PP (mm)	20.3	35.3	50.3	53.1	54.9	45.5	39.9	35.8	33.6	14.2	3.3	5.1
Débit (m³/s)	1.27	1.47	0.86	0.54	0.59	0.73	0.73	0.75	0.88	0.7	0.47	0.58

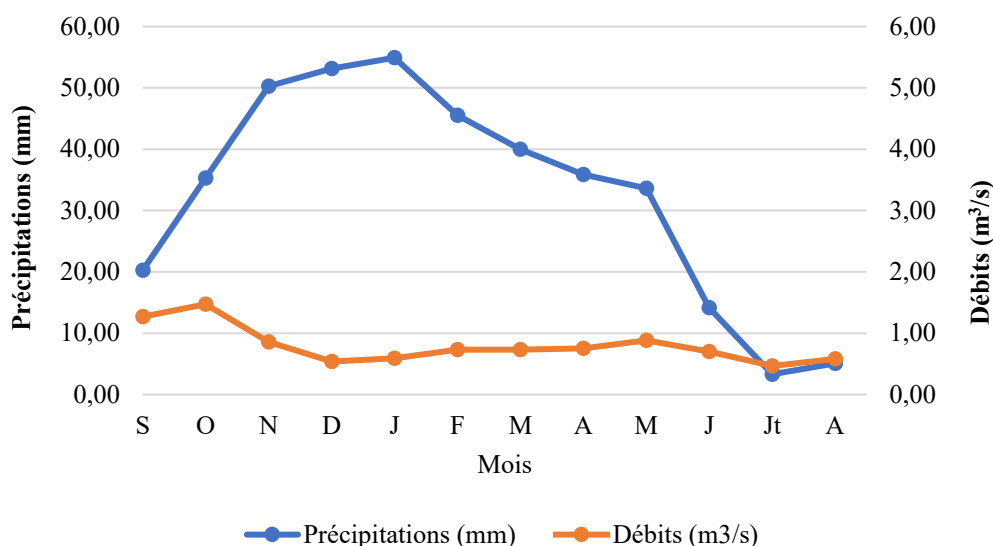


Figure III.24 : Précipitations et débits moyens mensuels au niveau du bassin de la Mekerra (1974/1975 – 2011/2012)

III.5. Conclusion

L'étude hydro-climatique menée sur le bassin versant de la Mekerra a permis de mieux appréhender les mécanismes hydrologiques et climatiques qui régissent la région de Sidi Bel Abbès. En exploitant les données hydro-climatiques disponibles, cette analyse a mis en évidence les grandes tendances en matière de précipitations, de températures et de régimes d'écoulement.

Il en ressort que le bassin évolue sous un climat de type semi-aride, caractérisé par des hivers humides et des étés secs. Cette configuration climatique induit une variabilité saisonnière marquée des débits, avec une alternance entre des périodes de crue automnale et de basses eaux estivales.

L'analyse des moyennes mensuelles de la pluie et du débit de la Mekerra (1974/1975-2011/2012) montre un décalage entre les périodes de forte pluie et celles où l'oued est en crue. Cela s'explique par le comportement différent du sol et de l'eau selon les saisons. En Automne, les premières pluies tombent sur des sols secs, ce qui provoque un ruissellement immédiat et donc les débits augmentent rapidement. En Hiver, même si les pluies continuent, l'eau pénètre davantage dans les sols et moins d'eau s'écoule donc en surface, ce qui réduit les débits. Par contre, en Été, l'évaporation est très forte et l'eau s'évapore avant même de rejoindre la surface du sol, d'où des débits très faibles.

Ce diagnostic s'est révélé essentiel pour la suite de l'étude, en particulier pour l'application de la méthode FIGUSED, utilisée dans le chapitre suivant pour l'identification et l'évaluation des zones à risque d'inondation. En fournissant une compréhension fine des régimes pluviométriques et hydrologiques à l'échelle du bassin, cette analyse a permis d'identifier les principaux facteurs naturels influençant la survenue des crues.

Les informations recueillies ont servi de fondement à l'approche multicritère intégrée de la méthode FIGUSED, qui vise à déterminer les zones les plus vulnérables aux inondations. Grâce

à la prise en compte de la variabilité spatio-temporelle des précipitations, de l'évolution thermique, et des caractéristiques de ruissellement propres au bassin de la Mekerra, l'évaluation du risque a pu être affinée. Cette approche va permettre une cartographie plus précise des zones exposées, combinant données objectives et dynamiques territoriales.

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

IV. Introduction

La cartographie constitue un domaine pluridisciplinaire englobant des études et actions scientifiques, techniques et artistiques. Elle repose sur des observations directes ou l'exploitation de données existantes afin de produire et d'interpréter des cartes, plans et représentations graphiques variées.

Dans le contexte spécifique de la cartographie des risques d'inondation, la diversité et le volume considérable de données à traiter — telles que les données topographiques, hydrauliques, hydrologiques, ou encore celles relatives à l'occupation du sol — complexifient l'analyse. Cette complexité appelle au développement d'interfaces performantes permettant aux utilisateurs d'interagir de manière efficace avec l'information pour mieux comprendre et gérer les situations de risque.

Face à ces enjeux, l'évolution des outils de cartographie automatique, en synergie avec les outils de modélisation hydraulique, s'impose comme une nécessité. Ces technologies permettent la production de cartes dynamiques et actualisables, devenues essentielles pour une gestion proactive et intégrée des risques d'inondation.

Ce chapitre a pour objectif principal de présenter les outils et techniques disponibles pour la cartographie du risque d'inondation en s'appuyant sur l'approche FIGUSED. Cette méthode permet une intégration des facteurs physiques, environnementaux et socio-économiques afin d'évaluer la vulnérabilité et l'exposition des territoires aux aléas liés aux inondations. Une attention particulière sera portée aux capacités offertes par les systèmes d'information géographique (SIG), notamment à travers l'utilisation du logiciel Arcgis.

IV.1. Relation entre la cartographie et la modélisation dans la gestion des risques d'inondation

La cartographie et la modélisation forment un couple d'outils indispensable pour comprendre et gérer les risques naturels tels que les inondations. En les associant, il devient possible de localiser les zones exposées et de reproduire différents scénarios d'événements futurs, contribuant ainsi à une meilleure anticipation et à une prise de décision adaptée.

IV.1.1. Modélisation : outil d'analyse prédictive

La modélisation repose sur l'utilisation de modèles numériques, qu'ils soient hydrologiques ou hydrauliques, afin de simuler le comportement des systèmes naturels face à des événements spécifiques.

Dans le cas des inondations, elle permet de prévoir la propagation de l'eau, la hauteur de submersion, la vitesse des courants, ainsi que la durée de l'événement, en tenant compte de paramètres tels que la topographie, le climat et les conditions hydrologiques. Ces simulations sont essentielles pour comprendre la dynamique de l'aléa, produire des données précises à intégrer dans les cartes de risque, et évaluer divers scénarios futurs. Elles offrent également la possibilité d'étudier l'impact de facteurs comme le changement climatique, l'évolution de l'occupation du sol ou les projets d'aménagement urbain.

IV.1.2. Cartographie : outil de communication et d'aide à la décision

La cartographie constitue un outil essentiel pour représenter visuellement les résultats issus de la modélisation, rendant leur interprétation plus accessible aux décideurs, aux urbanistes et au grand public. Elle permet de localiser avec précision les zones exposées aux aléas, de classer les niveaux de danger, et de croiser les données issues des phénomènes naturels avec celles relatives aux enjeux humains et matériels (tels que la population, les infrastructures ou les activités économiques). À partir de cette analyse croisée, il devient possible de produire des cartes thématiques – de vulnérabilité, de danger ou de risque – qui servent de support aux documents de planification urbaine, aux dispositifs de gestion et de prévention des risques, ainsi qu'aux systèmes d'alerte précoce. Ces cartes facilitent ainsi la prise de décision en matière d'aménagement du territoire et de gestion des crises.

IV.1.3. Une relation complémentaire et dynamique

La modélisation et la cartographie entretiennent une relation étroite et réciproque : les résultats issus de la modélisation alimentent la cartographie, tandis que cette dernière permet de repérer les zones nécessitant une modélisation plus détaillée. Ce croisement améliore la précision du diagnostic territorial et renforce l'efficacité des actions de prévention et d'aménagement.

IV.1.3.1. La modélisation comme base scientifique de la cartographie

La modélisation joue un rôle clé en fournissant les données quantitatives nécessaires à l'élaboration de cartes fiables. Elle permet notamment :

- de simuler l'étendue spatiale des inondations en fonction de différents scénarios (crues décennales, centennales ou extrêmes),
- d'estimer des paramètres hydrodynamiques tels que la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement et le temps de submersion,
- d'identifier les zones d'accumulation d'eau, les secteurs susceptibles de débordement ou encore les points de faiblesse des digues.

Les résultats issus de cette modélisation sont ensuite traduits en représentations cartographiques, généralement sous forme de cartes d'aléa hydrologique, organisées en couches superposables à d'autres données géographiques pour une analyse intégrée.

IV.1.3.2. La cartographie comme outil de validation et d'appui au terrain

La cartographie joue un rôle essentiel dans l'évaluation de la fiabilité des résultats issus de la modélisation, en les confrontant aux données observées sur le terrain (observations directes, images aériennes, enquêtes locales). Elle permet également de repérer les zones présentant des incertitudes ou des anomalies, facilitant ainsi les ajustements du modèle. Aussi, elle contribue à hiérarchiser les secteurs à fort enjeu, en orientant les efforts de modélisation vers les zones les plus sensibles ou critiques.

IV.1.3.3. Un processus itératif d'amélioration continue

Ce mécanisme repose sur une logique cyclique et progressive d'affinement :

- Une première phase de modélisation est réalisée à partir des données disponibles.
- Elle donne lieu à une première représentation cartographique.
- L'analyse de cette carte met en évidence les limites ou imprécisions du modèle (zones mal représentées, manque de détail, etc.).
- Ces constats permettent d'ajuster ou d'enrichir la modélisation.
- Une nouvelle cartographie est ensuite produite pour évaluer les améliorations.

Ce cycle est répété autant que nécessaire, jusqu'à obtenir un résultat jugé suffisamment fiable et précis selon les objectifs visés (planification urbaine, prévention des risques, aménagement du territoire, etc.).

La relation entre cartographie et modélisation illustre également l'importance de la pluridisciplinarité : les modélisateurs, les géomaticiens, les urbanistes, les hydrologues, et parfois les sociologues ou économistes doivent collaborer pour intégrer à la fois des données scientifiques, spatiales et humaines.

IV.2. Méthodes de cartographie du risque d'inondation

Il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous citons les plus connues :

IV.2.1. Méthode de cartographie utilisée au Canada-Québec

Cette approche, largement adoptée au Canada et plus particulièrement au Québec, est fréquemment mobilisée dans le cadre du Programme de Détermination des Côtes de Crue (PDCC) pour identifier les zones exposées au risque d'inondation.

Elle repose exclusivement sur des paramètres hydrologiques et hydrauliques, en évaluant l'aléa à travers son interaction avec le relief. L'analyse se concentre principalement sur deux périodes de retour standardisées : 20 ans et 100 ans, qui délimitent les zones inondables représentées sur les cartes. Cependant, cette méthode présente une limite importante : elle ne prend pas en considération les éléments liés à la vulnérabilité, tels que la nature des constructions existantes ou prévues. Or, ces facteurs sont essentiels pour une évaluation complète du risque, comme souligné par plusieurs auteurs (Barroca.,2006; Blin., 2001).

IV.2.2. Méthode américaine de cartographie du risque d'inondation

La méthode employée aux États-Unis présente des similitudes avec celle du Québec, notamment dans le fait que les cartes produites se limitent à délimiter les hauteurs d'eau associées à des probabilités d'occurrence données.

La gestion des inondations est confiée à la Federal Emergency Management Agency (FEMA), dans le cadre du National Flood Insurance Program (NFIP). Ce programme repose sur une collaboration entre les collectivités locales et l'État fédéral, avec pour objectif de limiter les impacts des inondations dans des zones identifiées comme Special Flood Hazard Areas (SFHA). En contrepartie de la mise en œuvre de mesures d'aménagement obligatoires dans ces zones, les résidents peuvent bénéficier d'une assurance couvrant les dommages liés aux inondations.

La cartographie de ces zones est assurée par le U.S. Army Corps of Engineers (USACE) et concerne principalement les plaines inondables ayant une période de retour de 100 ans. Deux types de cartes sont produits : la Flood Hazard Boundary Map (FHBM) et la Flood Insurance Rate Map (FIRM).

Bien que cette méthode prenne en compte différents critères, elle a surtout pour effet de rendre obligatoire la protection contre les crues centennales dans les zones identifiées à risque (Barroca., 2006 ; Blin., 2001).

IV.2.3. Méthode d'inondabilité (France)

En France, cette méthode repose sur une approche globale qui associe à la fois l'aléa et la vulnérabilité, conformément à la définition complète du risque. Pour assurer une cohérence dans l'analyse, une unité commune — exprimée sous forme de probabilité de dépassement — est utilisée pour représenter ces deux composantes.

L'évaluation mobilise des données issues de plusieurs sources : observations hydrologiques, caractéristiques topographiques et conditions climatiques. Les modèles développés dans ce cadre tiennent compte des fluctuations saisonnières ainsi que des phénomènes extrêmes afin de cartographier les zones les plus exposées aux inondations.

Cette méthode permet ainsi une représentation plus fine et réaliste du risque, en intégrant la complexité des territoires et leur sensibilité face aux crues (Barroca.,2006 ; Blin., 2001).

IV.3. Outils utilisés pour l'aide à la cartographie du risque d'inondation

La création de la carte du risque d'inondation nécessite des outils et des instruments performants et fiables comme :

IV.3.1. Recours à la télédétection spatiale et aérienne

La cartographie du risque d'inondation requiert des outils précis et performants, parmi lesquels la télédétection joue un rôle central. Celle-ci regroupe l'ensemble des méthodes et techniques permettant de collecter des informations sur les caractéristiques physiques et biologiques d'un objet ou d'une surface, à distance et sans contact direct.

En télédétection aérienne, les capteurs les plus anciens et les plus couramment utilisés sont les appareils photographiques, qui offrent des données précieuses pour l'identification des zones inondables (Raclot., 2003).

À partir des années 1970, les satellites d'observation de la Terre ont ouvert de nouvelles perspectives en fournissant des images objectives et régulières, permettant aussi bien de suivre l'évolution de l'occupation du sol (via des outils comme Google Maps ou Google Earth) que de détecter l'étendue des inondations sur de vastes territoires (Hostache., 2006).

IV.3.2. Utilisation des modèles hydraulique et hydrologique

Les modèles hydrologiques sont principalement utilisés pour estimer les débits de crue associés à différentes périodes de retour sur un territoire donné. De leur côté, les modèles hydrauliques permettent de simuler numériquement des scénarios de crues, qu'ils soient

hypothétiques ou basés sur des événements réels. Grâce à ces simulations, il est possible de représenter l'aléa de manière détaillée dans l'espace et le temps, en évaluant des paramètres comme la hauteur d'eau, la vitesse d'écoulement, le débit ou encore la durée de submersion.

Ces outils sont essentiels pour anticiper les impacts d'une inondation potentielle et fournir aux décideurs des éléments d'aide à la décision, tant pour la gestion de crise que pour la planification préventive. Toutefois, pour garantir la fiabilité des résultats, ces modèles nécessitent d'être calibrés et validés à partir de données issues d'événements réels, afin de s'ajuster aux conditions spécifiques du terrain et de vérifier la justesse des hypothèses retenues (Hostache., 2006).

IV.3.3. Utilisation du système d'information géographique

Les systèmes d'information géographique (SIG) jouent un rôle central dans l'élaboration des cartes de risque d'inondation. Ils permettent non seulement la production cartographique, mais aussi l'intégration de données variées (topographiques, hydrauliques, socio-économiques, etc.). Grâce à leurs capacités de visualisation, les SIG facilitent la représentation claire de différents scénarios d'inondation, l'analyse spatiale des enjeux, ainsi qu'une meilleure compréhension de l'étendue des solutions envisageables. Ils constituent ainsi un outil d'aide à la décision particulièrement puissant (Zerouali., 2005).

Le tableau suivant récapitule les outils de cartographie du risque d'inondation.

Tableau IV.1. : Synthèse des outils de cartographie du risque d'inondation

Outil	Fonction principale	Type de données utilisées	Apports dans la gestion du risque
Téledétection aérienne et spatiale	Observation à distance de la surface terrestre pour détecter les zones inondées et surveiller l'occupation du sol.	Images satellites, photos aériennes, données multi-spectrales.	- Suivi de l'évolution du territoire. - Détection des zones inondées sur de larges surfaces.
Modèles hydrologiques	Estimation des débits des cours d'eau selon différentes périodes de retour (ex. crues décennales, centennales).	Précipitations, débits mesurés, données météorologiques	- Prévision des crues - Analyse statistique des événements hydrologiques
Modèles hydrauliques	Simulation du comportement de l'eau sur le territoire en cas de crue (réelle ou hypothétique), pour évaluer l'aléa dans le temps et l'espace.	Données topographiques (MNT), paramètres de crues, données de terrain	- Cartographie des hauteurs d'eau, vitesses, zones inondables - Aide à la décision et prévention
Systèmes d'Information Géographique (SIG)	Intégration, gestion et visualisation de données spatiales pour produire des cartes, comparer des scénarios et analyser les impacts.	Données géographiques, modèles, couches thématiques diverses	- Centralisation de l'information - Représentation claire des scénarios - Aide à la décision et à la planification

IV.4. Le SIG, un outil stratégique pour la cartographie du risque d'inondation

Les grands défis auxquels nous avons à faire face aujourd'hui sont étroitement liés aux dimensions spatiales du territoire. Dans ce contexte, les systèmes d'information géographique

(SIG) jouent un rôle central, en facilitant la gestion et l'analyse d'un large éventail de données essentielles à la compréhension des phénomènes d'inondation. Ces données couvrent notamment la géographie physique, la morphologie du terrain, l'hydrologie, la topographie, ainsi que l'occupation du sol.

L'essor des bases de données géographiques a permis de consolider des sources auparavant disparates, renforçant la précision des cartographies de risque. Toutefois, les premières tentatives d'intégration du facteur spatial ont souvent été limitées par des contraintes techniques liées à la collecte, au traitement et à l'exploitation de ces informations géoréférencées (Zerouali., 2005 ; Raclot., 2003).

IV.4.1. Composants d'un SIG

Un système d'information géographique (SIG) est un outil conçu pour gérer des bases de données spatialisées. Il permet la saisie, le stockage, l'extraction, l'analyse et la représentation visuelle de données géo-localisées. Un SIG repose sur l'intégration de plusieurs composantes : une infrastructure matérielle (ordinateurs, serveurs), des logiciels spécifiques, des données géographiques, des utilisateurs formés, ainsi que des méthodes d'exploitation fondées sur des règles et procédures bien définies (voir fig. IV.1).

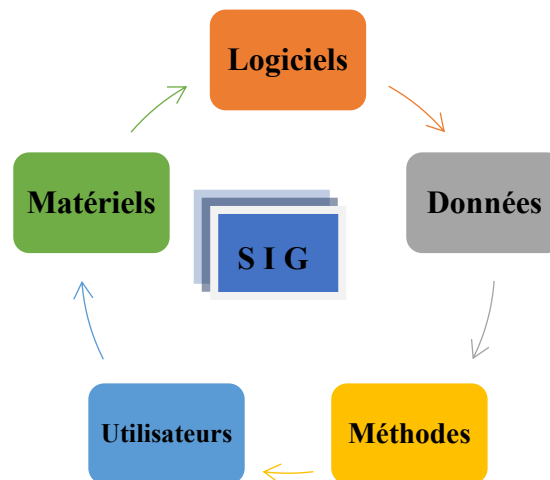


Figure IV.1 : Composantes d'un Système d'Information Géographique (SIG)

IV.4.2. Données dans un SIG

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

IV.4.2.1. Types de données dans un SIG

Les systèmes d'information géographique manipulent principalement deux grandes catégories de données :

a- Données spatiales

Ces informations décrivent les caractéristiques géographiques d'un objet, telles que sa localisation dans l'espace, sa forme géométrique (point, ligne ou polygone) ainsi que ses dimensions (longueur, surface, périmètre). Elles constituent la base de la représentation cartographique (Zerouali., 2005 ; Bob & Andy., 2001).

b- Données attributaires

Complémentaires aux données spatiales, elles fournissent des informations descriptives sur les objets représentés. Il peut s'agir de leur nom, type, usage, classification, ou toute autre donnée propre à chaque entité identifiée. Ces attributs enrichissent l'analyse géographique en associant des valeurs non spatiales à chaque élément cartographié (Zerouali., 2005 ; Bob & Andy., 2001).

IV.4.2.2. Modes de représentation des données dans un SIG**a- Mode vecteur**

Dans ce mode de représentation, les entités géographiques sont modélisées à l'aide de formes géométriques simples : points pour les objets ponctuels, lignes pour les éléments linéaires, et polygones pour les surfaces. Ce type de structuration se révèle particulièrement adapté pour décrire des objets tels que les routes, les rivières, ou les parcelles cadastrales. Parmi ses atouts, on note une grande précision dans la localisation, une extraction aisée des informations et une gestion simple des coordonnées géographiques. Cependant, il présente certaines limites, notamment lorsqu'il s'agit de réaliser des croisements complexes entre couches d'informations (Zerouali., 2005 ; Bob & Andy., 2001).

b- Mode raster (ou trame)

Aussi appelé mode matriciel, ce mode repose sur une division régulière de l'espace en cellules ou pixels, chacun associé à une valeur représentant une caractéristique de la zone (altitude, occupation du sol, etc.). Il est couramment utilisé dans le traitement des images issues de la télédétection ou des scanners.

Ce format est particulièrement efficace pour représenter des phénomènes continus sur de vastes surfaces, comme les températures, l'humidité des sols ou les zones inondables. Il peut toutefois nécessiter des capacités de traitement importantes en raison du volume de données générées (Zerouali., 2005 ; Bob & Andy., 2001).

IV.4.2.3. Méthodes d'acquisition des données

Les données exploitées dans un système d'information géographique (SIG) peuvent provenir de diverses sources : elles peuvent être relevées directement sur le terrain (par exemple via des levés topographiques), captées à distance à l'aide de photographies aériennes ou d'images satellites, ou encore numérisées à partir de cartes existantes. Étant donné la diversité

de leur origine, ces données varient considérablement en termes de qualité, de précision et de couverture spatiale. Pour les intégrer de manière cohérente dans un SIG, plusieurs méthodes d'acquisition et de traitement sont mises en œuvre (Zerouali., 2005).

a- Photogrammétrie aérienne

Cette technique est utilisée pour produire des cartes à moyenne échelle, notamment dans les zones où la cartographie est limitée ou obsolète. Elle constitue une solution efficace dans les contextes où les contraintes budgétaires restreignent la création de nouvelles données.

b- Images satellitaires (télédétection)

L'exploitation d'images issues de satellites ou de photographies aériennes permet d'analyser la géométrie du terrain et de localiser précisément des points caractéristiques. Cette méthode est largement utilisée pour l'observation à grande échelle.

c- Numérisation manuelle (digitalisation)

Elle consiste à utiliser un dispositif de pointage, tel qu'un curseur ou une souris, pour extraire manuellement les coordonnées géométriques d'une carte papier. Cette opération permet de reproduire fidèlement les contours et emplacements d'objets géographiques.

d- Numérisation automatique (scannage électronique)

Cette méthode, plus rapide que la digitalisation manuelle, utilise un scanner pour transformer une carte existante en image numérique, à partir de laquelle les informations géographiques peuvent être extraites.

e- Importation de fichiers numériques

L'intégration de données existantes sous forme de fichiers numériques permet de réduire le coût de la saisie manuelle. En convertissant ces fichiers dans des formats compatibles avec les SIG, on peut facilement enrichir la base de données à partir de sources variées, telles que des bibliothèques de données ou des institutions partenaires.

Nous avons résumé les différentes méthodes d'acquisition des données pour un SIG dans le tableau qui suit :

Tableau IV.2 : Méthodes d'acquisition des données pour un SIG

Méthode	Description	Avantages	Limites
Photogrammétrie aérienne	Exploitation de photos aériennes pour générer des cartes à moyenne échelle	Bonne précision, utile dans les zones peu cartographiées	Coût relativement élevé, nécessite un traitement spécialisé
Images satellitaires (télédétection)	Analyse de photos satellite pour extraire des données géo-spatiales	Couverture étendue, données récentes et régulières	Moins précis que les relevés terrestres, dépend des conditions atmosphériques
Numérisation manuelle	Relevé à l'aide d'un curseur pour capturer les éléments d'une carte papier	Bonne précision géométrique, méthode simple	Longue et fastidieuse, sujette aux erreurs humaines
Numérisation automatique (scannage)	Utilisation d'un scanner pour convertir une carte papier en image numérique	Rapide, réduit le travail manuel	Moins précise, nécessite un traitement pour l'extraction vectorielle
Importation de fichiers numériques	Conversion de fichiers existants en formats SIG	Gain de temps et de coût, intégration rapide de données fiables	Qualité dépendante de la source, parfois besoin de reformatage

IV.5. Méthode FIGUSED pour la cartographie du risque d'inondation

La méthode FIGUSED repose sur une démarche rigoureuse qui permet d'évaluer de manière approfondie les risques liés aux inondations à partir de multiples paramètres. Elle est privilégiée pour sa capacité à générer des cartes fiables, détaillées et adaptées à divers contextes. Son adoption s'explique par plusieurs atouts majeurs :

a- Prise en compte de paramètres variés

Cette approche intègre un large éventail de données, notamment hydrologiques, topographiques, climatiques et socio-économiques. Ce croisement d'informations permet d'obtenir une vision complète et nuancée du risque, en tenant compte des facteurs susceptibles d'influencer tant la probabilité que l'intensité des inondations.

b- Haute précision des résultats

Grâce à l'utilisation de données actualisées et de modèles d'analyse performants, la méthode FIGUSED permet de produire des cartes d'inondation à forte résolution. Elle tient compte des variations spatiales et temporelles des phénomènes hydriques, ce qui améliore la prévision des zones exposées.

c- Capacité d'adaptation

L'un des points forts de cette méthode est sa flexibilité. Elle peut être appliquée à différents environnements en s'ajustant aux caractéristiques locales. Elle offre aussi une grande

compatibilité avec diverses sources de données et outils d'analyse, ce qui en fait un cadre méthodologique adaptable à chaque situation.

d- Dimension participative

La méthode de FIGUSED encourage la collaboration avec les parties prenantes locales – populations, autorités, techniciens et experts en gestion des risques. Cette implication favorise une meilleure prise en compte des réalités du terrain et conduit à des mesures de prévention mieux adaptées aux besoins des communautés concernées.

Une synthèse de la méthode FIGUSED pour la cartographie du risque d'inondation est représentée sur le tableau IV.3

Tableau IV.3 : Synthèse de la méthode FIGUSED

Aspect	Description
Paramètres intégrés	Combine des données hydrologiques, topographiques, climatiques et socio-économiques pour une évaluation complète du risque d'inondation.
Fiabilité et précision	Utilise des données actualisées et des modèles performants permettant de représenter fidèlement la distribution spatiale et temporelle des inondations.
Flexibilité	Méthode adaptable à différents contextes géographiques et environnementaux, compatible avec plusieurs sources de données et outils d'analyse.
Approche participative	Favorise l'implication des communautés locales, autorités et experts, renforçant ainsi la pertinence et l'acceptabilité des mesures proposées.

IV.5.1. Paramètres pris en compte dans la méthode FIGUSED

Dans le cadre de cette approche de cartographie des risques d'inondation, divers paramètres sont pris en compte afin de permettre une évaluation précise et pertinente des zones exposées. Ces critères peuvent différer selon les objectifs de l'étude et les besoins spécifiques de l'utilisateur (Chachoua., 2024). Pour notre analyse, nous nous appuyons sur les principes de la méthode FIGUSED, tout en les adaptant aux particularités de notre cas d'étude (figure.IV.2)

IV.5.1.1. Accumulation de flux

En hydrologie, une carte d'accumulation de flux représente graphiquement le parcours de l'eau à travers un bassin versant en fonction de la topographie. Elle permet de visualiser les zones où l'eau de ruissellement s'accumule avant de rejoindre les cours d'eau principaux. Ce

type de carte est essentiel pour étudier la transformation des précipitations en écoulements, en mettant en évidence les chemins préférentiels de circulation de l'eau sur le terrain.

Ces cartes constituent un outil clé pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique d'un territoire. Elles sont largement utilisées dans la gestion durable des ressources en eau, la prévention des inondations, et la protection des milieux naturels.

L'analyse d'une carte d'accumulation de flux consiste à interpréter les dynamiques d'écoulement de l'eau en lien avec les pentes, les dépressions et les points de convergence du relief, afin d'identifier les zones à forte concentration de ruissellement et d'anticiper les impacts hydrologiques éventuels. Ceci revient à :

a- Analyse de la topographie

- **Zones de crête** : Repérer les sommets et les reliefs élevés, qui marquent les points initiaux d'écoulement de l'eau sur le terrain.
- **Vallées et dépressions** : Localiser les zones basses où l'eau a tendance à converger et à s'accumuler, formant les principaux axes de drainage.

b- Identifier les lignes d'accumulation du flux

- **Zones de convergence** : Les endroits où plusieurs lignes se rejoignent signalent les secteurs de concentration du ruissellement. Ces points correspondent généralement aux exutoires naturels comme les rivières, les lacs ou les zones humides.
- **Concentration des lignes** : Une forte densité de lignes d'accumulation reflète une accumulation plus rapide ou plus importante de l'eau dans ces secteurs, indiquant des zones potentiellement sensibles aux écoulements.

c- Identifier les bassins versants

- **Délimitation des bassins versants** : Les bassins versants sont délimités par les lignes de partage des eaux. Chaque bassin versant collecte l'eau de pluie tombant à l'intérieur de ses limites et la dirige vers un point de sortie.
- **Taille des bassins versants** : Les bassins versants plus grands collectent plus d'eau et ont souvent des lignes d'accumulation plus denses.

d- Analyser les flux d'eau

- **Direction de l'écoulement** : Suivre les lignes d'écoulement pour comprendre comment l'eau se déplace à travers le paysage.
- **Zones de concentration** : Les points où plusieurs lignes d'accumulation convergent indiquent des zones de concentration d'eau, comme des rivières principales ou des lacs.

Le débit accumulé est un paramètre essentiel dans la détermination de l'aléa inondation. Il représente l'agrégation de l'eau s'écoulant le long des pentes dans les cellules du raster en sortie. Les valeurs élevées de débit accumulé signalent des zones où le flux d'eau est concentré, ce qui

indique un risque d'inondation plus élevé. En d'autres termes, cela met en évidence les endroits où l'eau a tendance à s'accumuler, augmentant ainsi le potentiel d'inondation.

Les valeurs d'accumulation de débit varient entre 0 et 50 250 pixels, les valeurs les plus élevées se produisant dans l'écoulement sortant des principaux affluents. Des valeurs inférieures de ce facteur se produisent dans des flux d'ordre inférieur. (Kazakis et al., 2015).

IV.5.1.2. Intensité des précipitations

L'intensité des précipitations est évaluée à l'aide de l'indice de Fournier modifié (IFM), qui représente la somme des intensités moyennes mensuelles enregistrées par les différentes stations pluviométriques d'une zone. Cet indicateur permet de quantifier la force des précipitations à l'échelle mensuelle, et donc de mieux appréhender leur impact potentiel.

Pour représenter spatialement ce paramètre, une interpolation par la méthode spline est utilisée. Cette technique permet de prendre en compte la localisation géographique des stations, afin d'obtenir une cartographie plus précise et cohérente de la distribution des précipitations dans la zone d'étude (Huang et al., 1998).

Connaître l'intensité moyenne mensuelle des pluies est essentiel pour analyser les dynamiques climatiques d'un territoire. Cela permet notamment d'anticiper les périodes de fortes précipitations, d'adapter la gestion des ressources hydriques, de planifier des mesures de prévention contre les inondations et d'optimiser l'aménagement du territoire. Cette intensité peut fortement varier selon les saisons et les régions, certaines zones connaissant des pics pluviométriques spécifiques, tandis que d'autres restent relativement sèches.

IV.5.1.3. Distance du réseau de drainage

En dehors des zones où les eaux de ruissellement se concentrent naturellement, les crues nécessitent généralement un débordement des cours d'eau pour se produire. Dans la majorité des cas, l'inondation débute au niveau du lit de la rivière, puis s'étend aux zones environnantes. Toutefois, l'influence directe du lit diminue progressivement avec l'éloignement. Ainsi, la distance par rapport au réseau hydrographique devient un facteur clé à considérer dans l'analyse du risque d'inondation (Patrikaki et al., 2018).

L'indice de distance au réseau de drainage (D) est un paramètre hydrologique qui permet d'estimer la proximité entre un point donné et le système hydrographique, tel que les rivières, les ruisseaux ou les canaux présents dans un bassin versant. Il est principalement utilisé pour analyser la manière dont les eaux de surface peuvent rejoindre ces réseaux, et ainsi mieux comprendre la dynamique de l'écoulement dans la zone étudiée. Cet indice est déterminé pour chaque point en calculant la distance euclidienne la plus courte jusqu'au cours d'eau ou canal le plus proche. Le tracé du réseau de drainage est généralement obtenu à partir de sources topographiques, comme les modèles numériques de terrain (MNT) ou les cartes hydrographiques.

Dans un premier temps, le réseau de drainage est localisé et représenté soit à l'aide d'une carte, soit à partir d'un modèle numérique de terrain. Chaque point du bassin versant est ensuite analysé afin de mesurer sa distance au tronçon du réseau hydrographique le plus proche. Une fois ces distances calculées, elles sont généralement converties en valeurs normalisées comprises entre 0 et 1, formant ainsi l'indice de distance au réseau de drainage (D). Un indice D faible (proche de 0) signifie que le point est situé à proximité immédiate du réseau de drainage, tandis qu'une valeur proche de 1 indique un éloignement important. Pour notre analyse, cet indice a été obtenu à l'aide de l'outil "Distance to Nearest Hub" dans le logiciel Arcgis, qui permet de déterminer efficacement la distance entre chaque point du bassin et le réseau de drainage le plus proche.

IV.5.1.4. Elévation

L'altitude constitue un facteur déterminant dans l'évaluation du risque d'inondation. Les zones situées à des niveaux altimétriques plus bas sont généralement plus vulnérables, notamment lors d'épisodes de crues majeures (Lloyd., 2005). Pour générer une carte de l'élévation, on peut utiliser des modèles numériques de terrain tels que le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ou le Digital Elevation Model (DEM). Ces sources offrent des données altimétriques à l'échelle mondiale, accessibles gratuitement via des plateformes comme celles de la NASA ou de l'USGS (United States Geological Survey).

IV.5.1.5. Pentés du terrain

La pente du terrain joue un rôle essentiel dans la dynamique des inondations. En effet, les zones à forte déclivité sont souvent plus vulnérables aux crues rapides et aux coulées de boue (Demek., 1972).

Dans notre étude, la carte des pentes a été générée à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) en utilisant le logiciel Arcgis. Pour ce faire, nous avons appliqué l'outil (Slope), accessible via la boîte à outils (Spatial Analyst) dans la section "Surface", afin de dériver les pentes à partir des altitudes.

IV.5.1.6. Utilisation des terres

Les données sur l'utilisation des terres jouent un rôle important dans la modélisation de processus hydrologiques tels que l'infiltration et le ruissellement. Elles permettent de comprendre comment les caractéristiques de surface influencent ces processus, notamment le ruissellement superficiel, l'infiltration des eaux souterraines et le transport de débris. Ces données sont extraites à partir d'images satellite telles que Landsat 8, qui fournissent des informations détaillées sur la répartition spatiale des différents types d'utilisation des terres, comme les zones urbaines, les terres agricoles, les forêts, etc.

IV.5.1.7. Géologie

La géologie constitue un facteur clé dans l'évaluation des zones exposées aux inondations, car elle influence directement le comportement de l'eau à la surface et en profondeur. Les propriétés des formations géologiques, notamment leur perméabilité, déterminent en grande partie la manière dont l'eau de pluie est absorbée ou rejetée par le sol.

Les terrains composés de roches imperméables, comme l'argile ou le schiste, limitent l'infiltration de l'eau. Lors des précipitations, l'eau s'écoule majoritairement en surface, entraînant une augmentation rapide du ruissellement. Ce phénomène peut provoquer une montée brutale du niveau des cours d'eau, intensifiant ainsi les risques d'inondation.

À l'inverse, les formations géologiques perméables telles que le sable ou le calcaire facilitent l'infiltration de l'eau dans le sol. Cela permet de réduire le ruissellement en surface, l'eau étant en partie stockée dans les nappes souterraines. Ces structures jouent un rôle de tampon hydrologique en absorbant une partie des précipitations, ce qui contribue à modérer les débits fluviaux lors d'épisodes pluvieux intenses.

IV.5.2. Interpolation des cartes

La méthode adoptée repose sur une combinaison linéaire des paramètres retenus, en intégrant leurs poids respectifs. Cette démarche consiste à superposer différentes couches thématiques dans un Système d'Information Géographique (SIG), chacune pondérée selon son influence sur le risque d'inondation. Le résultat de cette analyse est une carte d'évaluation du risque, répartie en six niveaux de vulnérabilité : critique, très élevé, élevé, moyenne, faible, très faible. Cette classification s'appuie sur les caractéristiques intrinsèques des données utilisées et leur intégration pondérée. Le processus de classification des ensembles de données pour la carte des risques d'inondation repose sur :

a- Détermination des seuils de classification

Les seuils (ou points de rupture) sont identifiés à partir de l'analyse des variations internes aux données. L'objectif est de créer des classes où les valeurs sont regroupées de manière cohérente, en veillant à limiter l'hétérogénéité au sein de chaque classe tout en accentuant les contrastes entre les différentes classes.

b- Réduction de l'hétérogénéité interne

Pour chaque groupe, on calcule la dispersion des valeurs. Les seuils sont choisis de façon à regrouper des données présentant des caractéristiques similaires, ce qui réduit au maximum la variabilité à l'intérieur des classes.

c- Renforcement des contrastes entre classes

Parallèlement, la méthode cherche à accroître les écarts entre les classes. Ainsi, les seuils sont positionnés de manière à ce que chaque groupe se distingue nettement des autres, par exemple en différenciant clairement un secteur à faible risque d'un autre à risque élevé.

d- Découpage des données

À partir des seuils déterminés, l'ensemble des données est divisé en tranches distinctes. Chaque classe est définie par une plage de valeurs précises, correspondant à des changements significatifs observés dans la série de données.

e- Structuration en classes

Les données sont finalement réparties en groupes homogènes, dont les limites sont fixées sur la base des points de rupture identifiés. Cette approche permet une classification objective et méthodique, assurant que chaque classe reflète fidèlement les principales tendances des

données. Le résultat est une carte d'aléa inondation fiable, conçue pour appuyer efficacement les actions de gestion et de prévention des risques.

Le tableau suivant synthétise les étapes et concepts que nous venons de décrire concernant l'identification des points de rupture et la classification des données :

Tableau IV.4 : Synthèse des concepts de l'identification des points de rupture et la classification des données.

Etape	Description	Objectif
Identification des seuils	Analyse des variations des données pour détecter les points où les valeurs changent significativement.	Définir des limites qui segmentent les données en classes distinctes.
Minimisation de la variabilité intra-classe	Calcul de la dispersion des valeurs au sein de chaque classe.	Obtenir des classes homogènes avec des valeurs similaires.
Maximisation de la variabilité inter-classe	Positionnement des seuils pour accentuer les différences entre les classes.	Assurer que chaque classe est clairement distincte des autres.
Segmentation des données	Division des données en groupes selon les seuils identifiés.	Capturer les variations majeures dans les données.
Création des groupes/classes	Attribution des données à des classes définies par des plages de valeurs.	Classifier de manière rigoureuse et objective pour une meilleure interprétation des risques.

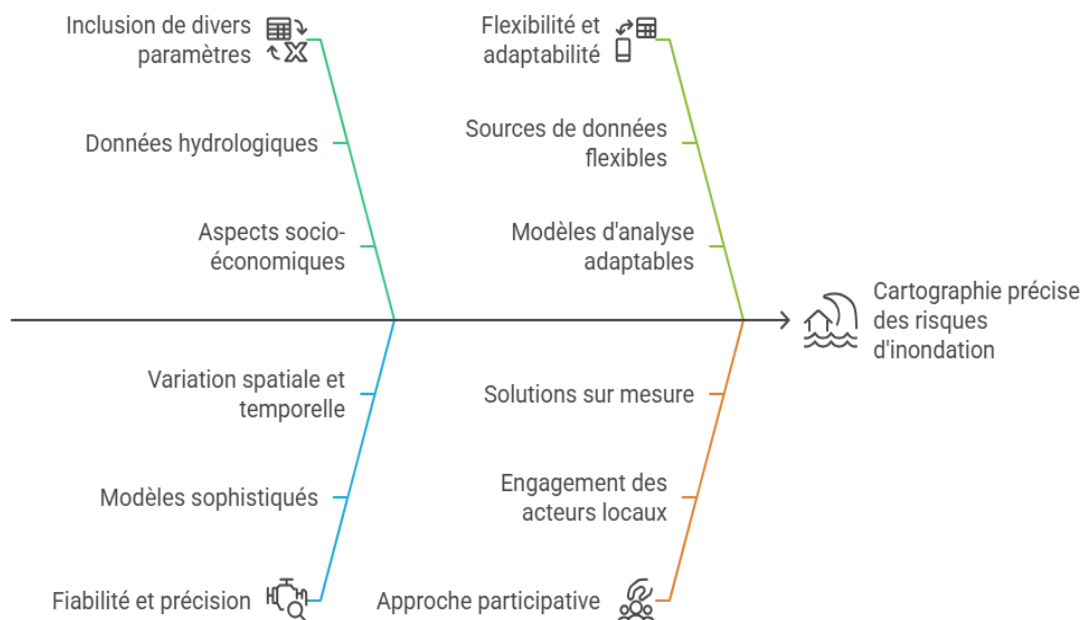


Figure IV.2 : Facteurs intervenant dans la méthode FIGUSED

IV.6. Conclusion

Le chapitre suivant sera consacré à l'application de la méthode FIGUSED dans le bassin versant de l'Oued Mekerra, en s'appuyant sur les capacités du logiciel Arcgis. Ce dernier offre une panoplie d'outils performants d'analyse spatiale, essentiels pour une mise en œuvre rigoureuse et efficace de la méthode. L'objectif principal est de localiser, caractériser et hiérarchiser les zones exposées au risque d'inondation, en intégrant plusieurs paramètres environnementaux (topographie, géologie, occupation du sol, précipitations, etc.) dans un environnement SIG.

L'implémentation de FIGUSED repose sur l'intégration pondérée de plusieurs couches thématiques, combinées selon une logique multicritère, afin de produire une carte synthétique des zones à risque. Cette approche permet non seulement d'identifier les secteurs vulnérables, mais aussi d'en évaluer le niveau de dangerosité selon une classification graduée (critique à très faible).

Une attention particulière sera portée à la représentation cartographique des résultats, étape importante pour la valorisation de l'analyse spatiale. En effet, la cartographie permet de visualiser clairement les zones sensibles, facilitant ainsi la compréhension et l'interprétation des résultats par les différents acteurs concernés, qu'il s'agisse des décideurs, des urbanistes ou du grand public. Ces cartes constituent des outils d'aide à la décision indispensables pour la mise en place de stratégies de prévention, d'aménagement du territoire et de gestion durable des risques liés aux inondations.

Nous pourrions résumer les étapes de cette méthode FIGUSED comme suit :

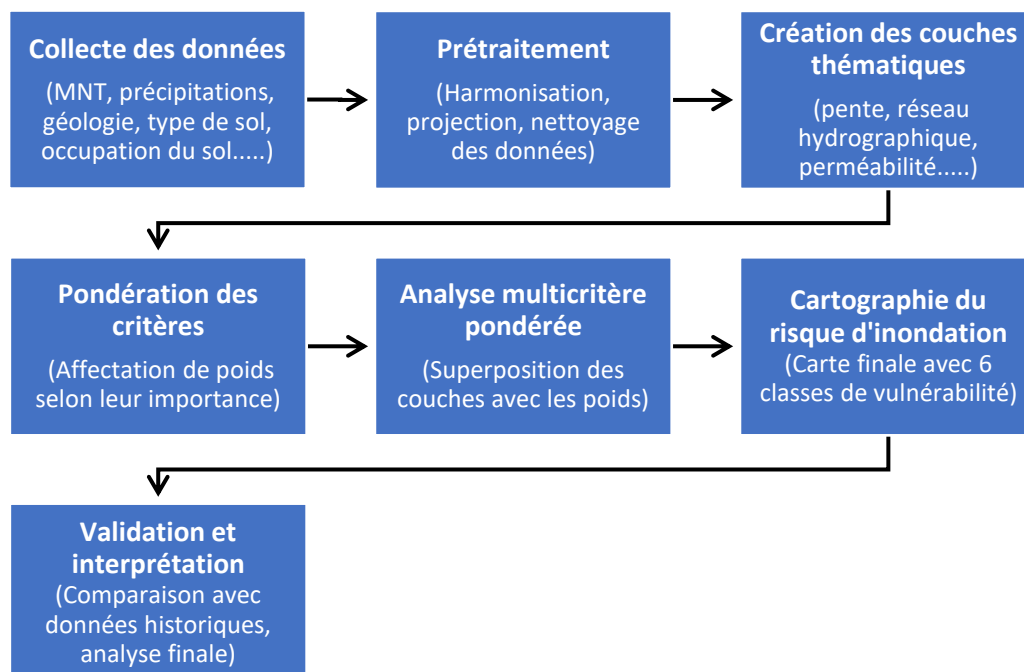


Figure IV. 3 : Organigramme des étapes de la méthode FIGUSED

Chapitre 5 : Résultats et discussions

V. Introduction

Dans le cadre de l'évaluation détaillée du risque d'inondation, nous avons eu recours à la méthode FIGUSED, reconnue pour sa capacité à intégrer efficacement des variables géoenvironnementales pertinentes. Cette approche repose sur l'analyse de plusieurs facteurs physiques et environnementaux tels que la pente, l'occupation du sol, le type de sol ou encore la pluviométrie qui influencent directement le déclenchement et la propagation des inondations. Chaque paramètre est pondéré selon son degré d'influence sur le phénomène étudié.

Pour sa mise en œuvre, le logiciel Arcgis version 10.8 a été utilisé en tant qu'outil principal d'analyse spatiale. Il a permis non seulement de traiter et d'intégrer les données géographiques, mais aussi d'appliquer les différentes étapes de la méthode FIGUSED, notamment la normalisation des variables qui consiste à harmoniser les données pour qu'elles soient comparables et combinables dans une analyse multicritère, la superposition des couches d'information et la production de la carte finale de risque. Grâce à ses fonctionnalités avancées, Arcgis nous a offert une représentation cartographique précise des zones potentiellement inondables, facilitant ainsi l'interprétation des résultats et orientant efficacement la prise de décision.

V.1. Matériels et méthodes

L'application de la méthode FIGUSED au bassin versant de la Mekerra a permis de mettre en évidence et d'analyser sept paramètres clés, spécifiques à ses caractéristiques géoenvironnementales. Ces paramètres sont les suivants :

1. **Accumulation du flux** (Flow Accumulation – **F**),
2. **Intensité des précipitations** (RainfallIntensity – **I**),
3. **Géologie** (Geology – **G**),
4. **Occupation du sol** (Land Use – **U**),
5. **Pente** (Slope – **S**),
6. **Altitude** (Elevation – **E**),
7. **Distance au réseau de drainage** (Distance from Drainage – **D**).

V.2. Analyse des paramètres de la méthode

V.2.1. Accumulation de flux (F)

L'accumulation de flux (ou flow accumulation), généralement représentée sous forme de raster, indique le nombre de cellules (pixels) d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) qui contribuent à l'écoulement vers une cellule donnée. Autrement dit, chaque pixel reçoit un écoulement provenant des pixels situés en amont. Plus cette valeur est élevée, plus la cellule en question représente une zone de concentration des eaux, comme les thalwegs ou les lits des oueds. À l'inverse, des valeurs faibles d'accumulation de flux caractérisent les zones de divergence de l'écoulement, souvent situées sur les lignes de crête ou les parties amont des versants.

En tant qu'indicateur hydrologique fondamental, le paramètre d'accumulation de flux permet d'identifier les axes d'écoulement préférentiels dans un bassin versant. Ces zones, où l'eau de ruissellement se concentre naturellement, jouent un rôle critique dans l'analyse du risque d'inondation, car elles représentent les points de convergence du ruissellement de surface.

La figure V.1, illustre la distribution spatiale de l'accumulation de flux dans le bassin versant de la Mekerra, elle met en évidence les zones où l'eau de ruissellement se concentre le plus, en fonction de la topographie du terrain. Les valeurs d'accumulation de flux y varient entre 0 et 4 077 389 pixels.

La classe comprise entre 0 et 143 907 pixels en beige couvre la plus grande partie de la surface du bassin, ce qui indique que la majorité du territoire est constituée de zones amont ou de faibles convergences hydrologiques peu contributives, tandis que les zones à forte accumulation en bleu, bien que plus réduites en surface, représentent les principaux axes de concentration des eaux, ils sont très localisés mais hydrologiquement importants dans l'analyse des risques d'inondation.

La carte (fig.V.2) représente la classification de l'accumulation de flux en six classes réparties spatialement à l'intérieur du bassin versant de la Mekerra. Elle est utilisée pour mieux localiser les zones de concentration du ruissellement. On y distingue :

- Fond beige (classe 1) : représente la classe avec la plus faible accumulation correspondant aux zones de départ du ruissellement.
- Autres couleurs (classes 2 à 6) : très localisées, principalement en lignes fines représentant des niveaux croissants d'accumulation de flux, jusqu'à la classe 6 qui apparaît en aval du bassin, proche de l'exutoire, ce qui est logique car c'est là que se concentrent tous les écoulements.

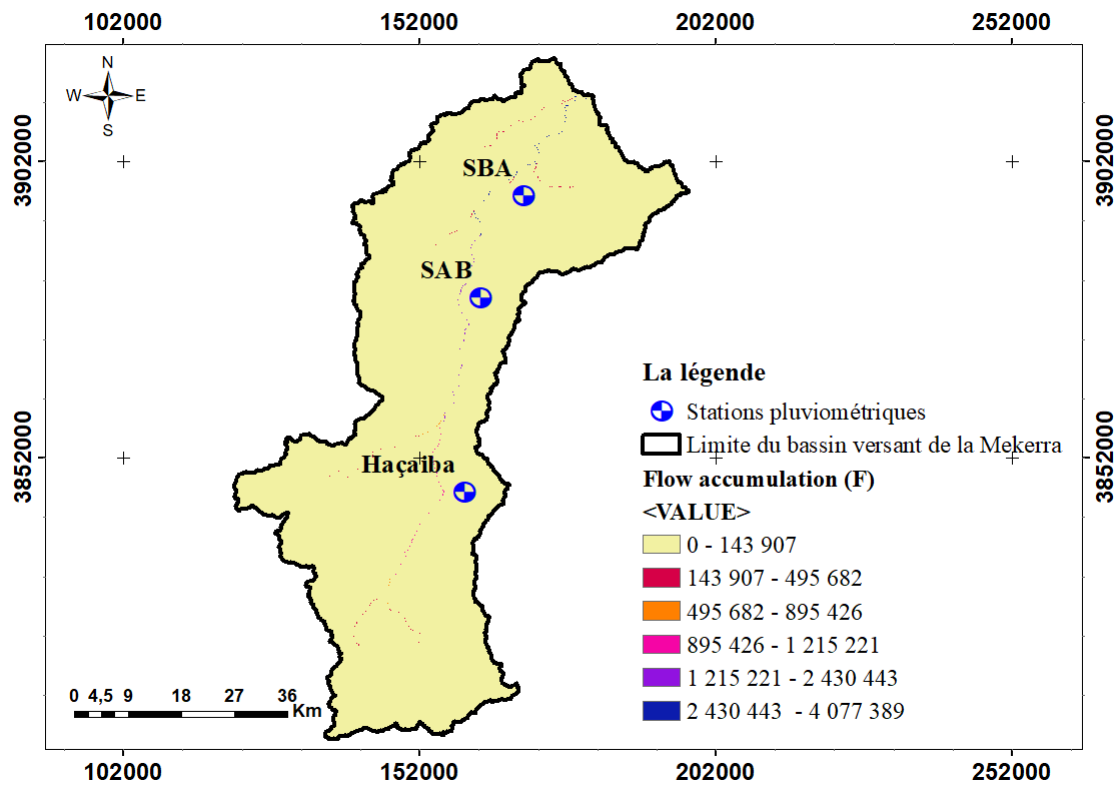


Figure V.1 : Cartographie de l'accumulation de flux (F) du bassin versant de la Mekerra

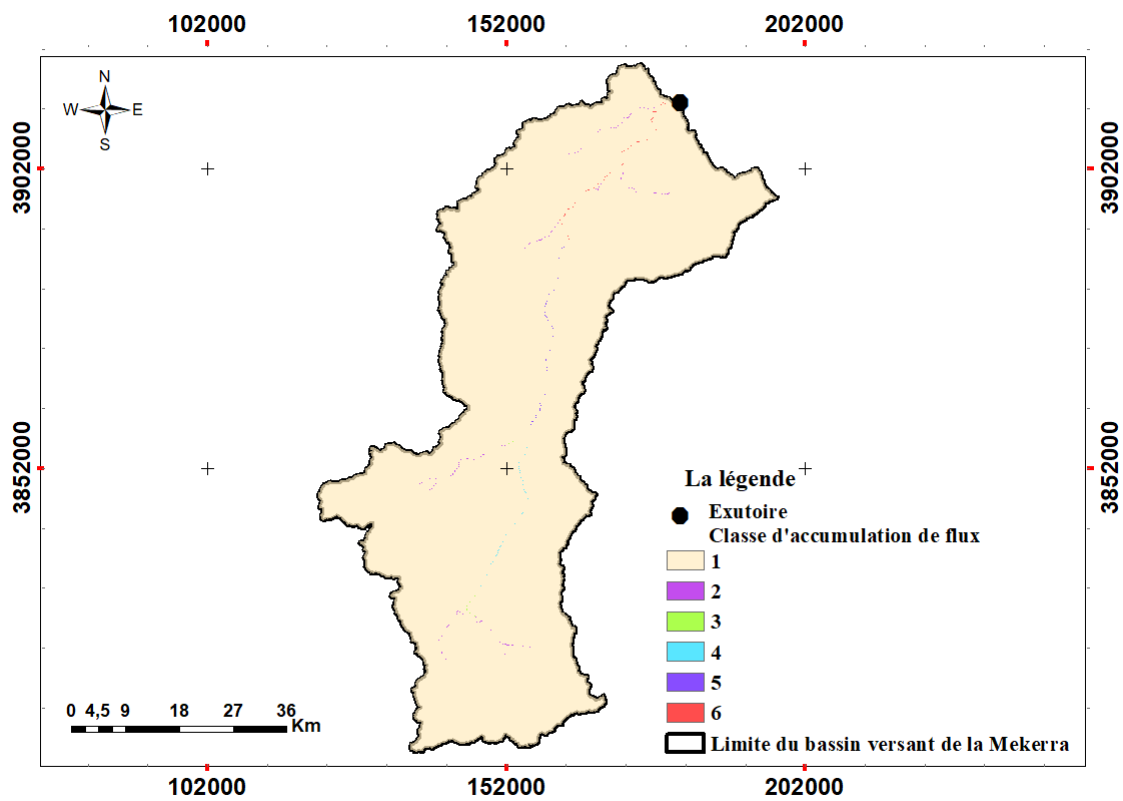


Figure V.2: Répartition de l'indice de flux du bassin versant de la Mekerra

V.2.2. Intensité des précipitations (I)

La carte d'intensité des précipitations constitue un outil essentiel pour localiser les zones potentielles affectées par les inondations. Depuis le développement du logiciel Arcgis, l'intégration directe avec la plateforme de données de la NASA permet d'accéder à des séries temporelles précises sur la quantité de précipitations, facilitant ainsi l'analyse spatio-temporelle des événements pluviométriques.

La distribution spatiale des valeurs d'intensité des précipitations du bassin versant de la Mekerra (fig.V.3), fait ressortir une variabilité marquée des précipitations avec un fort contraste nord-sud. La densité des isohyètes dans les zones montagneuses suggère une concentration accrue des précipitations, tandis que leur espacement vers le Sud indique une diminution progressive de l'intensité. Ce gradient nord-sud met en évidence la vulnérabilité différenciée du bassin face aux risques d'inondations, qui pourraient être plus fréquents dans les zones à forte intensité de précipitations. En effet :

- Le Nord-est aux environs de Sidi Bel Abbes, avec une altitude modérée reçoit les plus fortes précipitations pouvant être expliquées par l'exposition favorable aux vents humides d'Ouest/ nord-ouest, par les effets orographiques locaux et par une position en amont exposée aux perturbations méditerranéennes.
- Le centre du bassin aux environs de Sidi Ali Benyoub, avec une altitude plus élevée reçoit moins de précipitations ce qui est atypique et confirme l'effet de l'exposition géographique et les régimes climatiques,
- Quant au Sud au niveau de Haçaiba ; bien que partiellement montagneux est plus sec (précipitations entre 350–450 mm), ce qui pourrait être dû à un effet d'ombre pluviométrique ou à l'éloignement de toute source d'humidité (mer Méditerranée).

La répartition spatiale des précipitations au niveau de la Mekerra dépend davantage de la position géographique, des vents dominants et de la topographie locale plutôt que de l'altitude seule.

La carte de la figure V.4, représente la classification spatiale de l'intensité des précipitations dans le bassin versant de la Mekerra, en six classes distinctes. Elle synthétise la carte des isohyètes en zones d'intensité et facilite la lecture des contrastes pluviométriques.

Cette carte confirme la forte variabilité spatiale des précipitations dans le bassin de la Mekerra, avec une zone très humide au Nord-est et Nord-ouest (Classe 6), ensuite une zone aride au Sud (Classes 1 et 2). Le gradient suit la carte précédente (fig.V.3) et est probablement lié à l'exposition géographique et aux circulations atmosphériques.

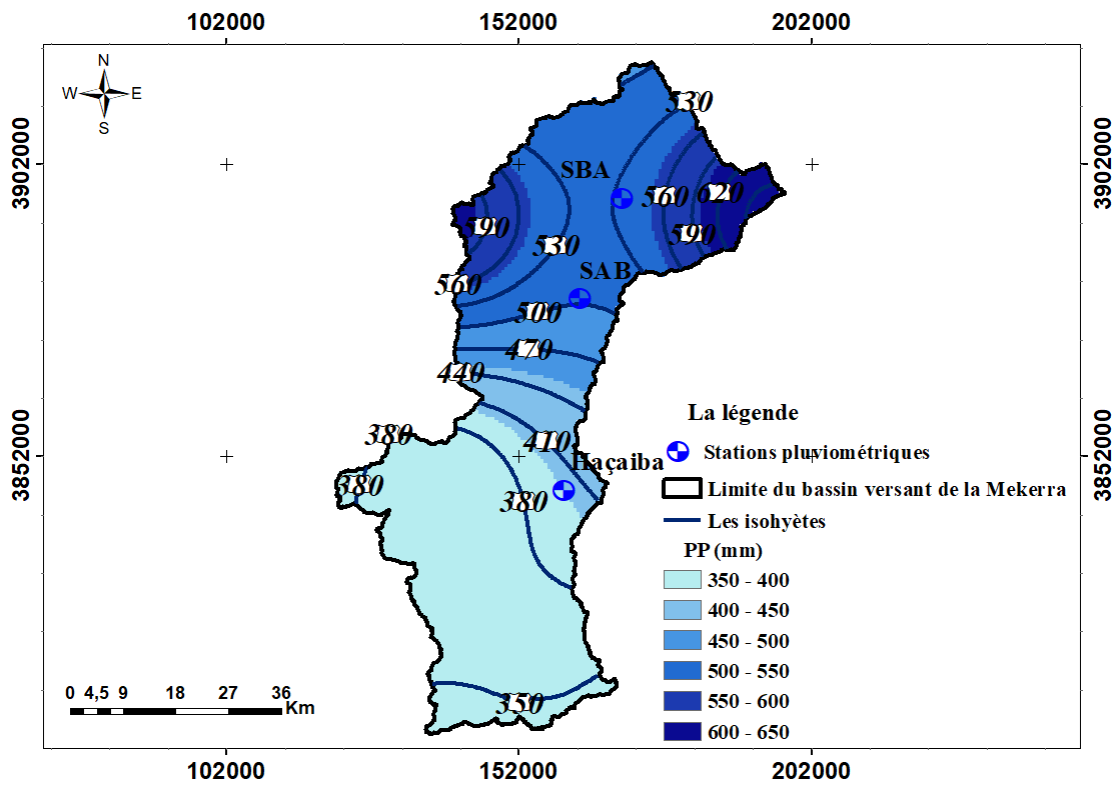


Figure V.3 : Cartographie de l'intensité des précipitations (I) du bassin versant de la Mekerra

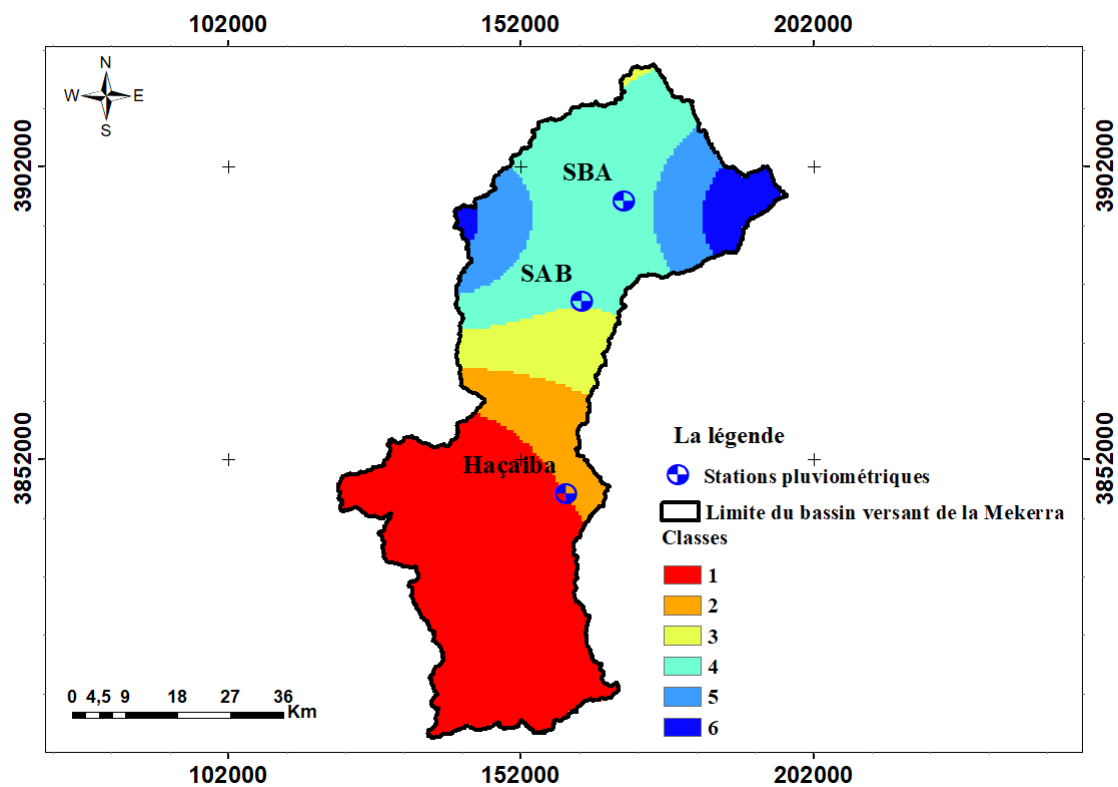


Figure V.4: Répartition de l'indice de l'intensité des précipitations dans le bassin versant de la Mekerra

V.2.3. Géologie (G)

La géologie du bassin versant joue un rôle essentiel dans l'analyse et la gestion des risques d'inondation, en influençant directement le relief, les pentes ainsi que la nature des sols. La figure V.5 illustre la structure géologique du bassin versant de la Mekerra, mettant en évidence une diversité lithologique importante, allant du Crétacé inférieur jusqu'aux dépôts quaternaires. Cette hétérogénéité géologique conditionne fortement le comportement hydrologique du bassin.

Les formations quaternaires, principalement situées dans les zones de basse altitude et à proximité des lits majeurs de l'oued, sont caractérisées par une forte perméabilité. Elles permettent une infiltration rapide des eaux, mais deviennent sensibles aux crues soudaines lorsque ces sols atteignent un seuil de saturation. À l'inverse, les formations de grès rouges et de conglomérats du Permo-Trias, peu perméables, favorisent un ruissellement accru, ce qui accroît le risque d'inondation en aval. De même, les couches marines de l'Éocène et du Crétacé supérieur, relativement imperméables, renforcent également les phénomènes de ruissellement, augmentant ainsi la vulnérabilité hydrologique de certaines zones du bassin.

La carte (fig.V.6) représente l'indice de géologie dans le bassin versant de l'oued Mekerra, avec une répartition spatiale des unités géologiques classées selon un indice (de 1 à 8).

Nous y distinguons la dominance des indices (6 à 8) au Nord correspondant à des zones complexes mais peut-être moins sujettes au ruissellement de surface si la perméabilité est forte. Cette situation peut être contrecarrée par l'agglomération de Sidi Bel Abbès (SBA) qui est fortement urbanisée, ce qui imperméabilise les sols, car même si le sous-sol est perméable, l'eau ne peut pas atteindre ces couches à cause des surfaces artificielles et donc nous pouvons par contre, collecter un fort ruissellement de surface. Aussi, le réseau hydrographique est très dense au Nord, concentrant rapidement les eaux vers les exutoires d'où une montée rapide des crues. Ajoutons à cela, l'importance des précipitations, pouvant saturer le sol perméable et causant un surplus qui va ruisseler avec le temps. et causer des inondation.

Au centre du bassin, il y'a la prédominance des indices moyens (3 et 4) corresponant à des zones de transition géologique.

Quant au Sud et Sud ouest, il existe une hétérogénéité importante indiquant de forte perméabilité ce qui réduit le ruissellement.

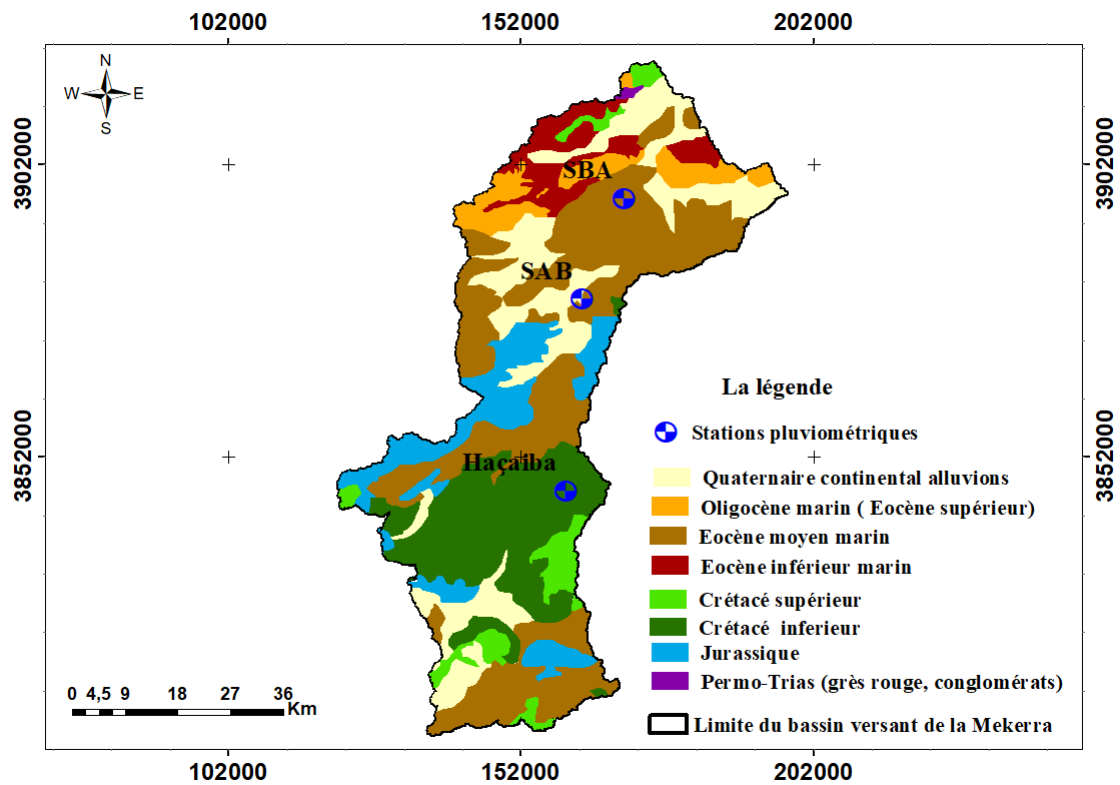


Figure V.5 : Cartographie de formations géologiques (G) du bassin versant de la Mekerra (Digitalisée par Hammadi F, 2025)

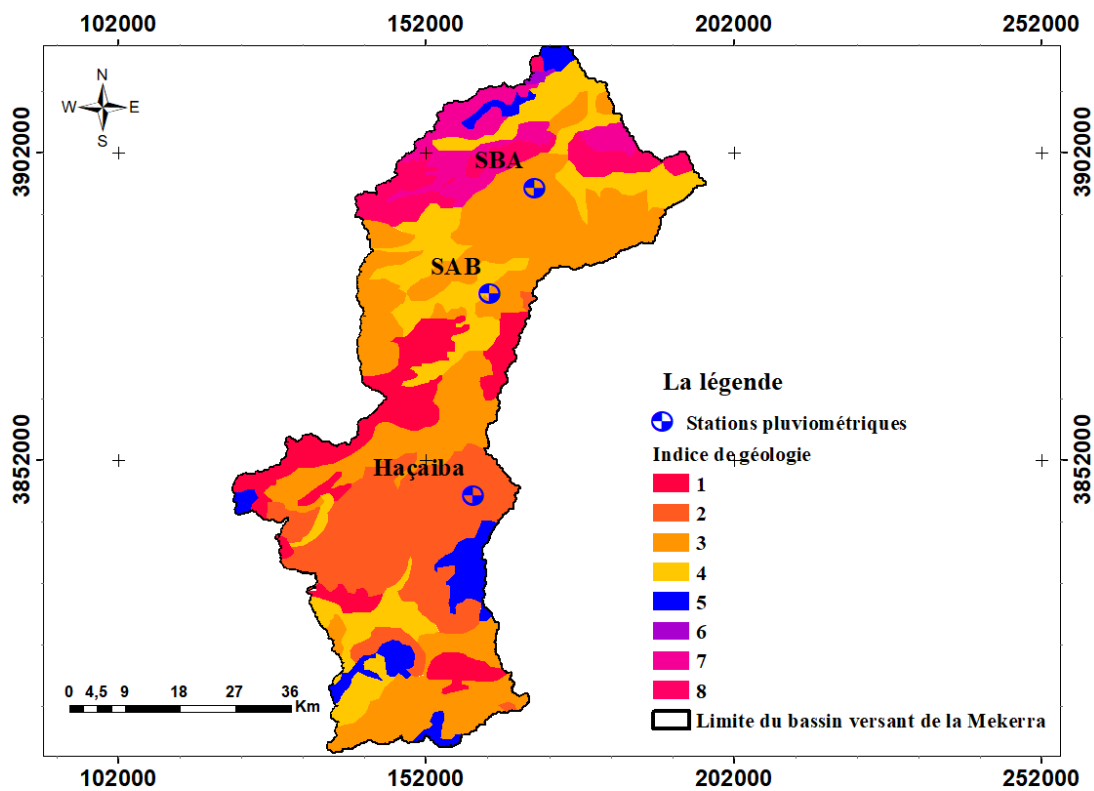


Figure V.6 : Répartition de l'indice de Géologie (G) dans le bassin de la Mekerra

V.2.4. Utilisation des terres (U)

La connaissance de l'occupation et de l'usage des sols est essentielle pour évaluer les risques d'inondation, car elle conditionne directement les dynamiques de ruissellement, d'infiltration et de rétention des eaux pluviales. La figure V.7 présente la carte d'utilisation des sols du bassin versant de la Mekerra. Elle met en évidence une nette dominance des terres agricoles (représentées en jaune clair), en particulier dans la partie sud du bassin, autour de la région de Haçaïba. Bien que ces surfaces cultivées soient partiellement perméables, elles peuvent favoriser un ruissellement important en l'absence de pratiques agricoles durables ou de structures végétales protectrices, comme les haies.

À l'inverse, les zones couvertes de végétation dense ou de forêts (en vert foncé et vert clair), concentrées principalement au nord du bassin, dans la région de Sidi Bel Abbès, jouent un rôle régulateur en réduisant le ruissellement et en favorisant l'infiltration des eaux. Elles participent ainsi activement à la limitation du risque d'inondation. Par contre, les surfaces nues (en orange) et les zones urbanisées (en rouge) présentent une vulnérabilité accrue, en raison de leur faible capacité d'absorption et de leur tendance à accélérer l'écoulement des eaux vers l'aval.

Dans ce contexte, la cartographie de l'occupation du sol constitue un outil d'aide à la décision précieux. Elle permet de repérer les zones les plus sensibles aux inondations et de prioriser les actions d'aménagement du territoire. Des interventions telles que la reforestation, l'aménagement paysager ou la mise en place de bassins de rétention peuvent ainsi être ciblées de manière plus stratégique pour limiter efficacement les risques d'inondation dans le bassin versant de la Mekerra.

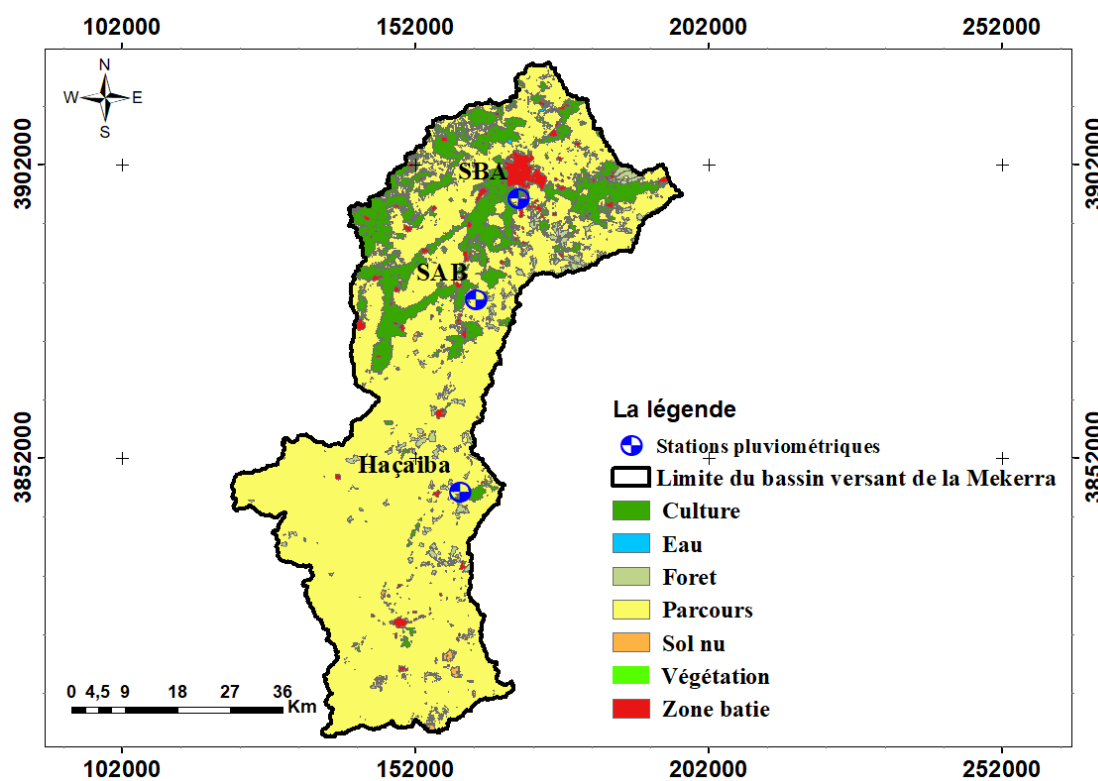


Figure V.7: Cartographie d'utilisation des sols (U) du bassin versant de la Mekerra

La figure V.8 illustre une classification du territoire en 7 catégories d'usage du sol, chacune reflétant un niveau différent d'imperméabilisation, de couverture végétale et de sensibilité au ruissellement. Cette segmentation permet d'évaluer avec précision les zones à risque face aux inondations. Les classes les plus exposées sont celles correspondant aux surfaces bâties (notamment la classe 7 en rouge) ainsi qu'aux terrains nus ou faiblement végétalisés. Ces zones, par leur faible capacité d'infiltration, favorisent un ruissellement rapide et abondant, ce qui accentue le risque d'inondation, en particulier à proximité des zones urbanisées comme Sidi Bel Abbès (SBA), Sidi Ali Benyoub (SAB) et le long des grands axes de circulation.

À l'opposé, les catégories représentant les forêts, les parcours naturels ou les terres agricoles à faible intensité d'exploitation (classes 2 à 4) ont un rôle hydrologique favorable. Elles limitent le ruissellement de surface en ralentissant l'écoulement et en facilitant l'infiltration des eaux, contribuant ainsi à atténuer les crues.

Ce type de classification est un outil clé pour la gestion des risques hydrologiques, car il permet de cartographier les zones les plus vulnérables et d'orienter l'aménagement. Il devient ainsi possible de cibler les secteurs nécessitant des actions correctives, telles que la restauration de la végétation, la mise en place de zones tampons ou l'intégration de solutions d'urbanisme résilient pour limiter les effets des fortes précipitations.

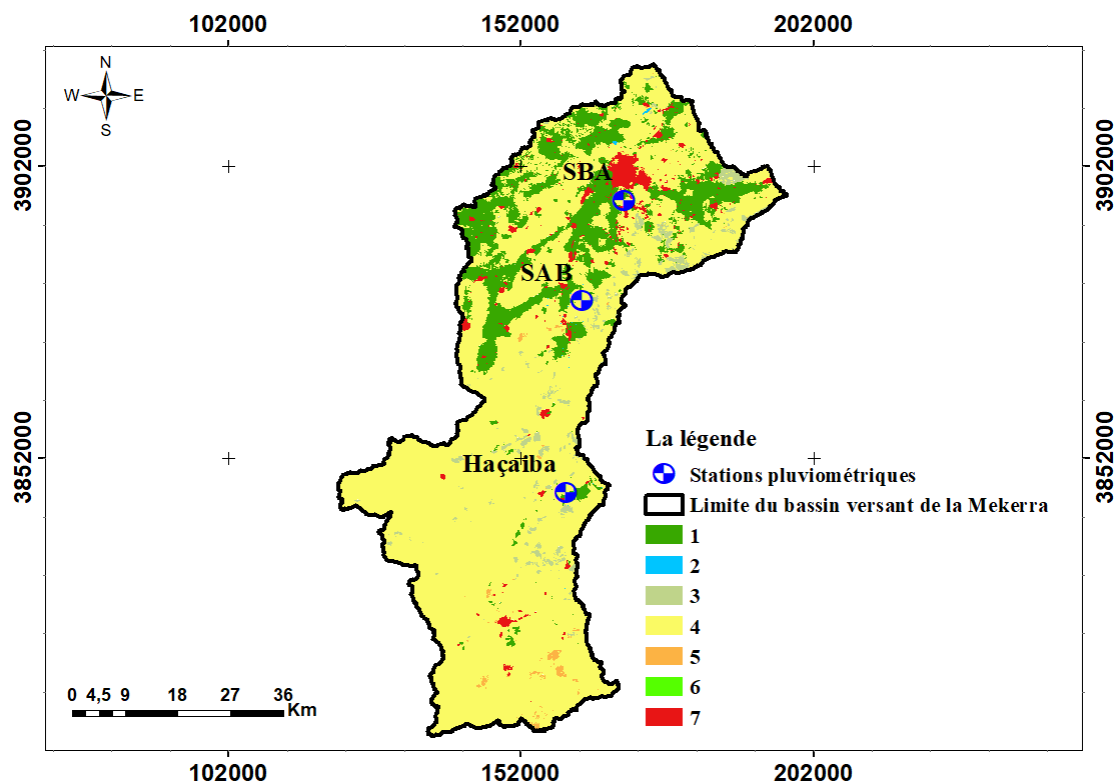


Figure V.8: Répartition de l'indice d'utilisation des terres (U) du bassin versant de la Mekerra

V.2.5. Pente (Slope) (S)

La carte des pentes du bassin versant de la Mekerra, présentée en figure V.9, a été élaborée à l'aide de l'outil (Slope) dans Arcgis, à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cet outil permet de quantifier l'inclinaison du relief et de représenter spatialement les variations topographiques au sein du bassin. Cette carte constitue un élément clé de l'analyse hydrologique, en permettant d'identifier les zones potentiellement sujettes à un écoulement rapide ou à un risque accru d'inondation.

L'analyse des pentes montre une diversité importante, avec des valeurs comprises entre 0 % et plus de 54 %. Les pentes faibles (entre 0 et 5 %), largement répandues dans les parties nord et sud du bassin, sont particulièrement propices à la stagnation des eaux, augmentant ainsi la vulnérabilité à l'inondation lors d'épisodes pluvieux intenses. À l'inverse, les pentes fortes (au-delà de 13 %), concentrées dans les zones centrales et en terrain montagneux, entraînent une accélération du ruissellement, ce qui peut provoquer un transfert rapide des eaux vers l'aval.

Cette dynamique hydrologique peut accroître le danger dans les secteurs plus plats situés en contrebas, notamment lorsque ceux-ci sont urbanisés ou mal équipés en infrastructures de drainage. Par conséquent, la cartographie des pentes se révèle être un outil stratégique pour la planification territoriale et la prévention des risques hydriques dans le bassin de la Mekerra.

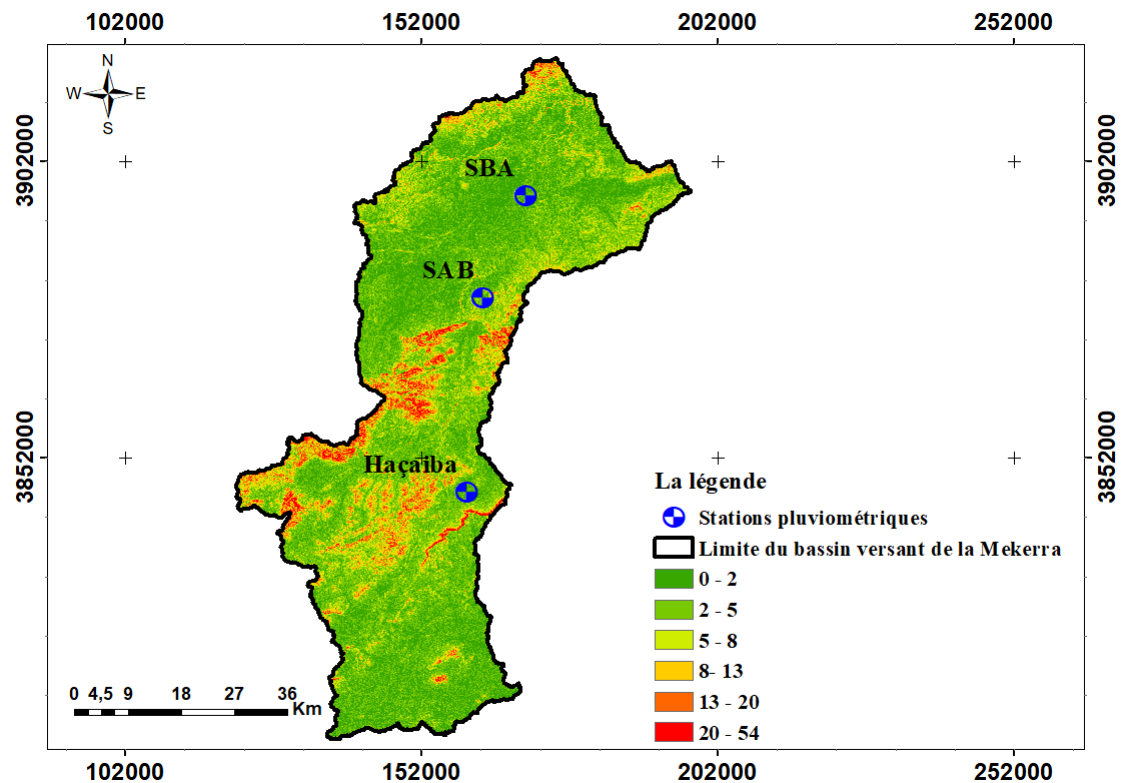


Figure V.9: Cartographie de la répartition des pentes (S) de bassin versant de la Mekerra

La figure V.10 présente la carte de distribution de l'indice de pente dans le bassin versant de la Mekerra, mettant en évidence une classification topographique en six catégories (classes 1 à 6). Cette segmentation permet d'analyser avec précision la variabilité spatiale des pentes et d'en déduire leur influence sur le comportement hydrologique du bassin.

Les classes 1 et 2, correspondant aux pentes les plus faibles et représentées en violet et blanc, se concentrent dans les zones planes et de faible altitude. Ces secteurs sont particulièrement exposés au phénomène d'accumulation des eaux, ce qui accroît leur vulnérabilité aux inondations, notamment lors d'épisodes pluvieux intenses. Par contre, les classes de pente les plus élevées (classes 5 et 6), situées dans les zones de relief prononcé, facilitent un écoulement rapide des eaux vers les parties aval du bassin. Si cela peut limiter temporairement le risque d'inondation localement, cela augmente le risque dans les zones basses, où les eaux peuvent se concentrer brutalement.

Ce classement des pentes constitue donc un outil essentiel pour l'évaluation du risque hydrologique. Il permet d'identifier les zones à ruissellement rapide ainsi que les secteurs particulièrement sensibles à l'engorgement, offrant ainsi une base solide pour la planification d'actions préventives et d'aménagements adaptés à la dynamique du bassin.

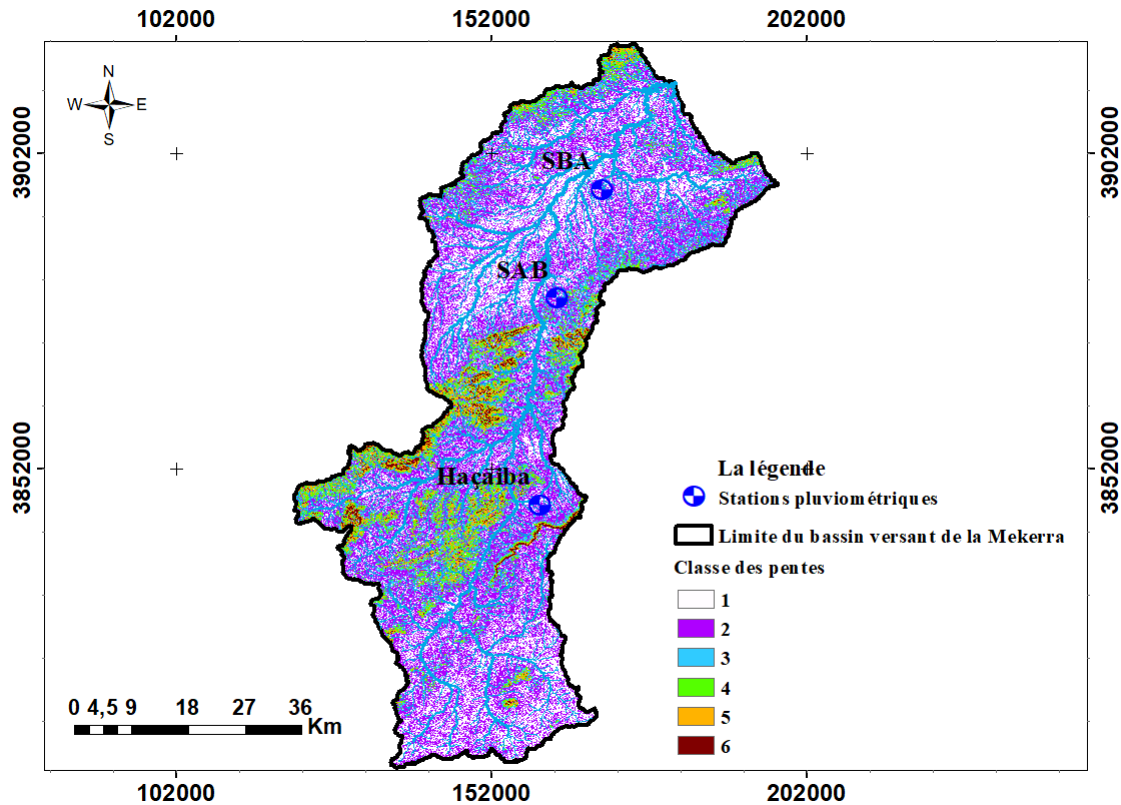


Figure V.10 : Répartition de l'indice de pente (S) dans le bassin de la Mekerra

V.2.6. Elévation (E)

L'intégration de la carte d'altitude dans Arcgis repose sur l'importation d'un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) au format raster. Ce type de donnée constitue un support de base pour représenter la topographie du bassin versant et réaliser diverses analyses géomorphologiques.

La carte d'altitude est un outil important dans l'étude des risques d'inondation. Elle permet de visualiser le relief général du bassin, en distinguant les zones en altitude, souvent identifiées comme des sources de ruissellement, et les zones de basse altitude, qui concentrent les écoulements. Ces dernières sont particulièrement exposées aux inondations, surtout lors d'épisodes pluvieux intenses. Ainsi, cette carte d'altitude joue un rôle très important dans la compréhension des dynamiques hydrologiques, la détection des zones à risque, et l'élaboration de mesures de gestion et d'aménagement adaptées à la prévention des inondations.

La carte altimétrique du bassin versant de la Mekerra (fig. V.11) met en évidence une importante variabilité du relief, avec des altitudes comprises entre 300 et plus de 1700 mètres. Cette configuration topographique influence directement le comportement hydrologique du bassin. Les zones les plus élevées, localisées principalement au Sud et à l'Est, jouent un rôle de zones de collecte où les précipitations donnent naissance à un ruissellement rapide en direction des zones plus basses. À l'inverse, les régions de basse altitude, notamment en amont du bassin et dans le Nord-ouest du bassin, agissent comme des zones de concentration des flux. Ces secteurs sont donc particulièrement exposés aux phénomènes d'accumulation d'eau, ce qui accroît leur vulnérabilité face aux inondations.

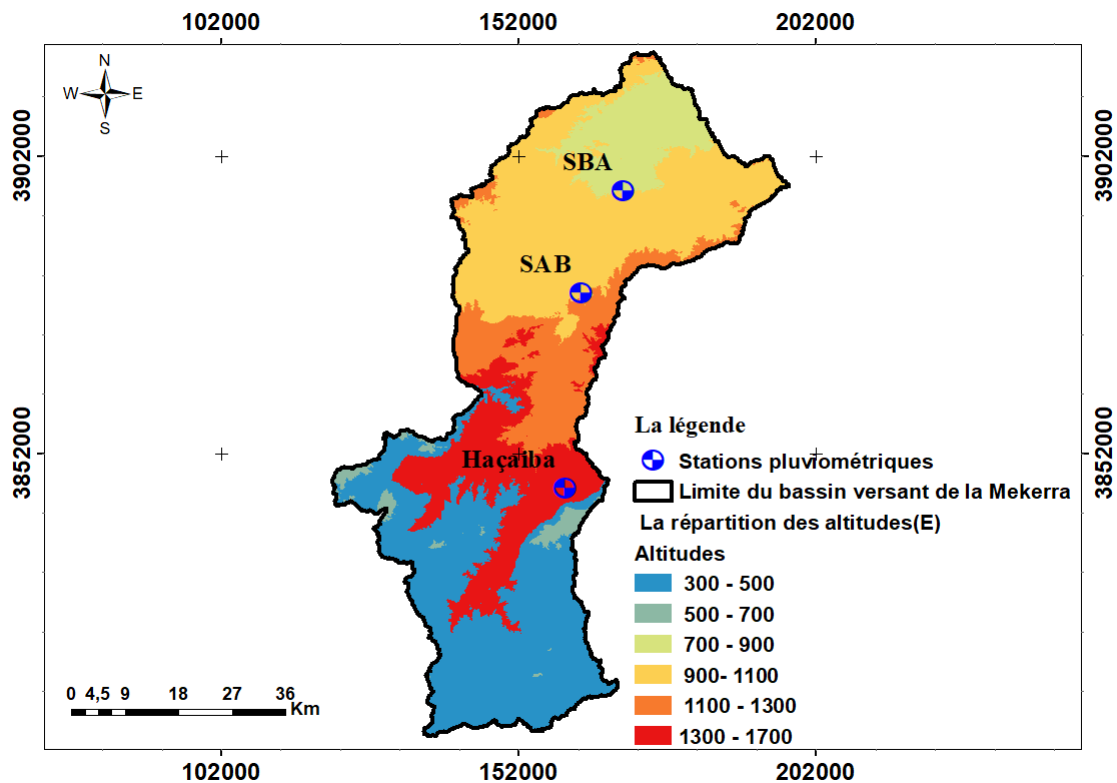


Figure V.11: Cartographie de la répartition des altitudes (E) de bassin versant de la Mekerra

La figure V.12, montre six classes d'élévation, allant de la classe 1 correspondant aux zones les plus basses, jusqu'à la classe 6 représentant les zones montagneuses les plus élevées.

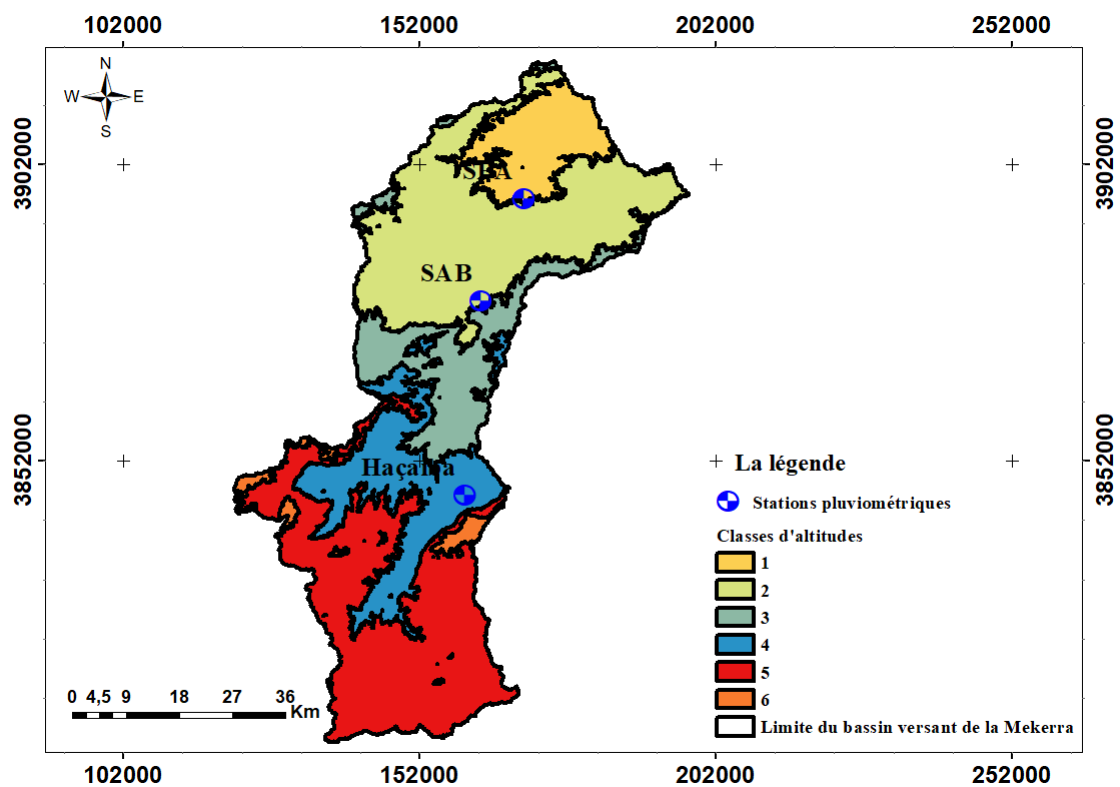


Figure V.12: Répartition de l'indice d'élévation (E) de bassin versant de la Mekerra

V.2.7. Distance par rapport au réseau de drainage (D)

La carte de la distance aux réseaux de drainage constitue un moyen important pour l'évaluation du risque d'inondation. Les zones proches des cours d'eau sont en effet particulièrement exposées aux débordements, notamment lors d'épisodes de fortes précipitations. Ce type de cartographie permet de localiser les zones où l'eau peut s'accumuler rapidement, facilitant ainsi l'identification des secteurs à risque. Elle s'avère donc précieuse pour appuyer les décisions en matière d'aménagement du territoire, de gestion du bassin versant et de mise en œuvre de mesures préventives.

Pour produire cette carte dans Arcgis, une couche vectorielle représentant le réseau hydrographique du bassin est utilisée comme point de départ. L'outil Euclidean Distance du module Spatial Analyst permet ensuite de calculer, pour chaque cellule de l'espace étudié, la distance au cours d'eau le plus proche. Le résultat est une carte raster continue, illustrant les variations de distance au réseau de drainage à travers l'ensemble du bassin.

L'examen de la carte (fig. V.13) de la distance au réseau de drainage dans le bassin versant de la Mekerra met en évidence la répartition spatiale des zones selon leur proximité aux cours d'eau. Les secteurs représentés en vert, correspondant à des distances comprises entre 488 et 2001 mètres, se trouvent à proximité immédiate du réseau hydrographique. En raison de leur position topographique, ces zones sont particulièrement vulnérables aux inondations, car elles favorisent une accumulation rapide des eaux de ruissellement.

À l'opposé, les zones plus éloignées, figurées en rouge sur la carte, bien qu'elles puissent également être touchées par le ruissellement, présentent un niveau de risque hydrologique généralement moins élevé.

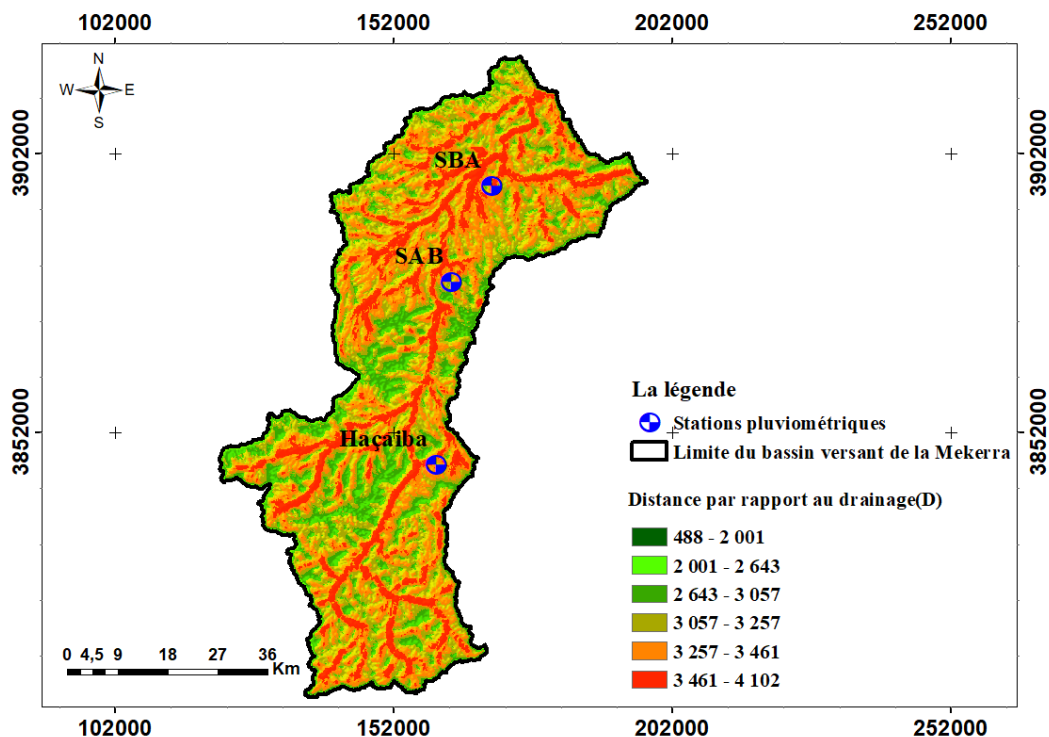


Figure V.13: Cartographie de la Distance par rapport au drainage (D) de bassin versant de la Mekerra

La carte de l'indice de distance au réseau de drainage du bassin versant de la Mekerra (fig.V.14) offre une représentation spatiale des zones selon leur éloignement relatif par rapport aux cours d'eau. Les classes les plus faibles, représentées en vert, correspondent aux zones situées à proximité immédiate du réseau hydrographique. Ces secteurs présentent un risque élevé d'inondation, car ils reçoivent rapidement les eaux de ruissellement.

À l'inverse, les zones associées aux classes les plus élevées, en rouge, sont situées loin des axes de drainage. Bien que le risque d'accumulation directe y soit plus faible, ces zones peuvent tout de même être concernées par un ruissellement plus lent.

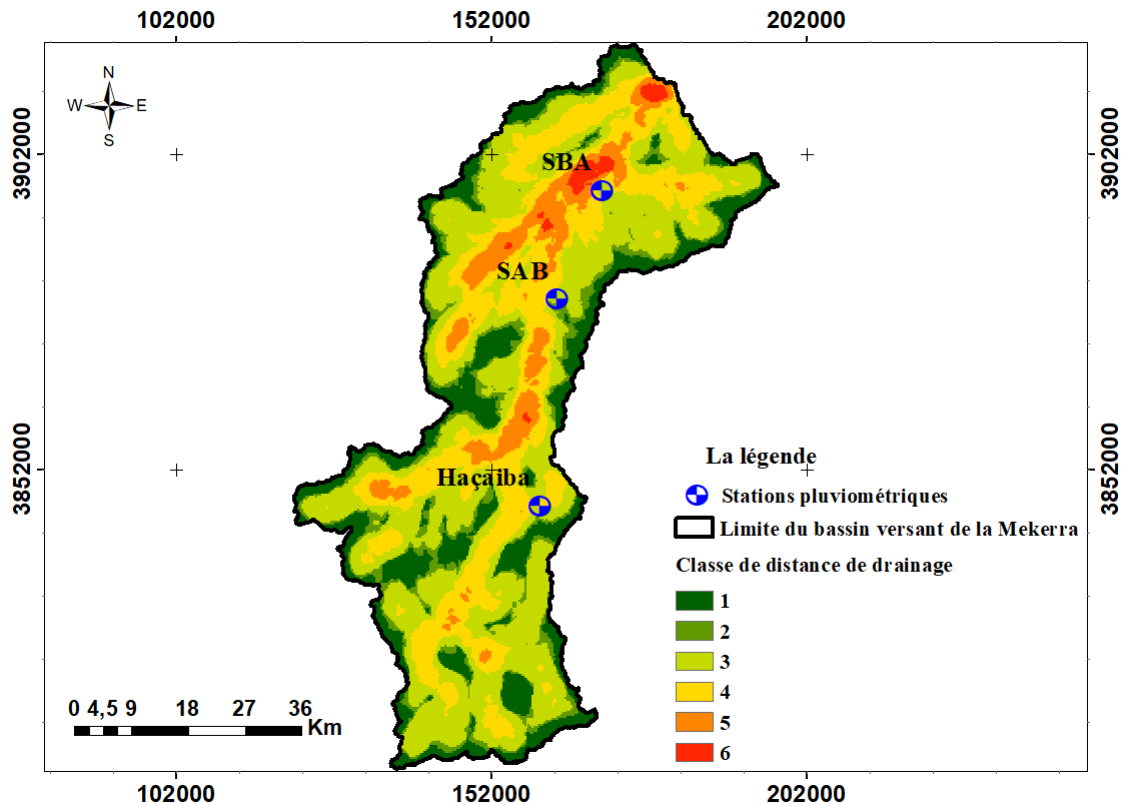


Figure V.14: Répartition de l'indice de distance par rapport au drainage dans le bassin de la Mekerra

V.3. Application de la méthode FIGUSED

Pour analyser la susceptibilité aux inondations dans le bassin versant de la Mekerra, une méthode multicritère basée sur l'approche **FIGUSED** a été mise en œuvre. Cette méthode repose sur la combinaison de sept variables physiques et environnementales considérées comme influentes dans la survenue et l'intensification des crues :

- **F (Flow Accumulation)**: Représente les zones de concentration des écoulements, souvent situées dans les talwegs, où le risque d'inondation est naturellement plus élevé.
- **I (Intensité des précipitations)** : Plus les précipitations sont fortes, plus la probabilité d'inondation augmente.
- **G (Géologie)** : La nature du substrat influence l'infiltration ou, au contraire, favorise le ruissellement.

- **U (Utilisation des sols)** : Les types d'occupation du sol (zones urbanisées, agricoles ou dénudées) conditionnent la capacité du sol à absorber l'eau.
- **S (Pente)** : Les faibles pentes favorisent l'accumulation des eaux, tandis que les pentes fortes accélèrent leur écoulement.
- **E (Élévation)** : Les zones de basse altitude sont plus vulnérables à l'accumulation et à la stagnation des eaux.
- **D (Distance au réseau hydrographique)**: La proximité des cours d'eau augmente le risque d'être affecté par des débordements.

Chaque critère a été transformé en couche raster, subdivisé en six classes représentant différents niveaux de risque (faible à très élevé), puis pondéré selon son importance relative, sur la base de références bibliographiques et de données empiriques. L'évaluation finale du risque a été réalisée à partir de l'équation suivante :

$$\text{FIGUSED} = 1,2 \times F + 0,5 \times I + 0,4 \times G + 0,7 \times U + 1,6 \times S + 3,0 \times E + 2,5 \times D$$

Cette formule permet d'agréger l'influence de chaque facteur dans une carte synthétique de la sensibilité aux inondations du bassin.

❖ Étapes de traitement dans Arcgis

a- Préparation des couches raster

Chaque variable composant l'indice FIGUSED (F, I, G, U, S, E, D) a été traitée individuellement sous forme de couches raster en utilisant les outils de Spatial Analyst dans Arcgis

- Les données altimétriques ont servi à générer les couches d'accumulation des flux (F), de pente (S) et d'élévation (E) à l'aide des fonctions du module Hydrology.
- La distance par rapport au réseau de drainage (D) a été calculée à partir d'une couche vectorielle représentant les cours d'eau, en appliquant l'outil Euclidean Distance.
- L'utilisation des terres (U) a été déterminée à partir d'images satellitaires fournies par la NASA, puis classifiée selon les types d'occupation.
- La géologie (G) a été vectorisée et reclassée en fonction de la perméabilité des formations géologiques présentes.
- Enfin, l'intensité des précipitations (I) a été obtenue par interpolation spatiale des données collectées auprès des stations pluviométriques locales.

b- Reclassification des rasters

Chaque couche a été normalisée entre 1 et 6 selon le niveau de risque à l'aide de l'outil Reclassify. (tabl.V.1)

Tableau V.1 : Classes des paramètres de la méthode FIGUSED et valeurs correspondantes

Paramètres	Classes	Classement
Accumulation de flux F	0-143 907	1
	143 907-495682	2
	495 682 - 895 426	3
	895 426 - 1 215 221	4
	1 215 221- 2 430 443	5
	2430 443- 4 077 389	6
Intensité des précipitations I	350 - 400	1
	400 - 440	2
	450 - 500	3
	500 - 550	4
	550 - 600	5
	600 - 650	6
Géologie G	Quartenaire continental alluvions	1
	Oligocène marin	2
	Eocène moyen marin	3
	Eocène inférieur marin	4
	Crétacé supérieur	5
	Crétacé inférieur	6
	Jurassique	7
	Permo-Trias (grès rouge, conglomérats)	8
Usage des terres U	Culture	1
	Eau	2
	Foret	3
	Parcours	4
	Sol nu	5
	Végétation	6
	Zone bâtie	7
Pente (Slope) S	0 - 2	1
	2 - 5	2
	5 - 8	3
	8 - 13	4
	13 - 20	5
	20 - 54	6

E Elévations	300 - 500	1
	500 - 700	2
	700 - 900	3
	900 - 1100	4
	1100 - 1300	5
	1300 - 1700	6
D Distance par rapport au drainage	488 - 2100	1
	2100 - 2643	2
	2643 - 3057	3
	3057 - 3257	4
	3257 - 3461	5
	3461 - 4102	6

c- Pondération et superposition

Les couches reclassées ont été combinées dans la Raster Calculator via l'équation FIGUSED, chaque couche multipliée par son poids respectif.

$$(1.2 * "F") + (0.5 * "I") + (0.4 * "G") + (0.7 * "U") + (1.6 * "S") + (3.0 * "E") + (2.5 * "D")$$

d- Production de la carte finale

Le raster final a été reclassé en trois niveaux de risque à savoir, faible, moyen et élevé afin de distinguer clairement les zones de vulnérabilité. Une symbologie appropriée a ensuite été appliquée pour faciliter l'interprétation visuelle et la lecture cartographique.

Cette approche offre une représentation spatiale rigoureuse du risque d'inondation, en intégrant l'ensemble des facteurs morphoclimatiques, géologiques et anthropiques. Elle constitue un outil précieux pour soutenir la prise de décision en matière d'aménagement du territoire, en vue d'une gestion durable et d'une meilleure anticipation des phénomènes hydrologiques extrêmes.

V.4. Les résultats

La carte de répartition des risques d'inondation du bassin versant de la Mekerra, générée par l'application du modèle FIGUSED dans l'environnement Arcgis, offre une représentation intégrée des zones susceptibles d'être touchées par des crues. Cette carte résulte de la superposition pondérée de sept couches thématiques : l'accumulation des flux (F), l'intensité des précipitations (I), la géologie (G), l'occupation du sol (U), la pente (S), l'altitude (E) et la distance aux réseaux de drainage (D). Chaque facteur a été classé, pondéré selon son influence sur le ruissellement et combiné selon l'équation FIGUSED afin d'obtenir une carte synthétique et hiérarchisée des niveaux de risque.

L'analyse spatiale révèle que les zones critiques et à risque très élevé (colorées en rouge et bordeaux) se situent essentiellement dans le Nord et le Nord-est du bassin, notamment aux abords des centres urbains comme Sidi Bel Abbès. Ces zones cumulent des caractéristiques défavorables : fortes pentes, sols imperméables (présence de formations marneuses et

argileuses), forte densité de drainage et couverture urbaine importante limitant l'infiltration des eaux. Ce cocktail de facteurs favorise un ruissellement rapide et abondant, augmentant considérablement le risque d'inondation.

À l'inverse, les zones à risque faible à très faible (tons verts) sont concentrées au Sud du bassin, particulièrement autour de Hacaiba, où les conditions topographiques plus douces, les formations géologiques plus perméables (grès, alluvions) et une couverture végétale plus dense réduisent la vitesse de ruissellement et favorisent l'infiltration.

Les zones modérées à élevées, qui apparaissent principalement dans les zones de transition (centre du bassin), sont des espaces instables où une modification de l'occupation du sol ou une intensification des épisodes pluvieux pourrait aggraver le niveau de vulnérabilité. Ces secteurs méritent une surveillance continue et des stratégies d'atténuation ciblées.

Ainsi, cette carte joue un rôle fondamental dans l'aide à la gestion intégrée des risques d'inondation, en identifiant les zones prioritaires pour la mise en place de mesures de protection, l'urbanisation maîtrisée et la conservation des zones tampons naturelles (forêts, zones humides). Elle peut également servir de base à la modélisation hydrologique, à la planification des infrastructures de drainage, et à l'élaboration de plans de prévention des risques naturels.

L'analyse spatiale réalisée à partir du modèle FIGUSED a permis de générer une carte détaillée des niveaux de risques d'inondation dans le bassin versant de la Mekerra. Les résultats obtenus mettent en évidence une forte variabilité spatiale du risque, étroitement liée aux caractéristiques physiques et anthropiques du territoire (fig.V.15).

Zones à risque critique et très élevé : Ces zones, qui couvrent environ 22 % de la superficie totale du bassin, se localisent principalement dans la partie Nord-est et Nord du bassin, notamment autour de la ville de Sidi Bel Abbès. Elles se caractérisent par une forte pente, une urbanisation dense, une proximité immédiate aux cours d'eau et des formations géologiques peu perméables. Ces conditions favorisent une réponse hydrologique rapide, augmentant la fréquence et l'intensité des inondations.

Zones à risque élevé à modéré : Représentant près de 38 % de la surface, ces zones se trouvent dans les secteurs de transition, notamment dans la partie centrale du bassin, autour de Sidi Ali Benyoub et vers l'amont de Hacaiba. Les pentes modérées, l'occupation agricole et la géologie hétérogène participent à une sensibilité modérée aux inondations, nécessitant des aménagements hydrauliques adaptés.

Zones à risque faible à très faible : Ces secteurs, occupant environ 40 % du bassin, sont localisés dans le Sud et le Sud-ouest, notamment dans les régions rurales peu urbanisées autour de Hacaiba. Ces zones présentent une pente douce, une bonne couverture végétale, une géologie plus perméable et une distance plus importante aux réseaux de drainage. Elles offrent donc une capacité d'infiltration plus élevée, réduisant considérablement les risques de ruissellement excessif.

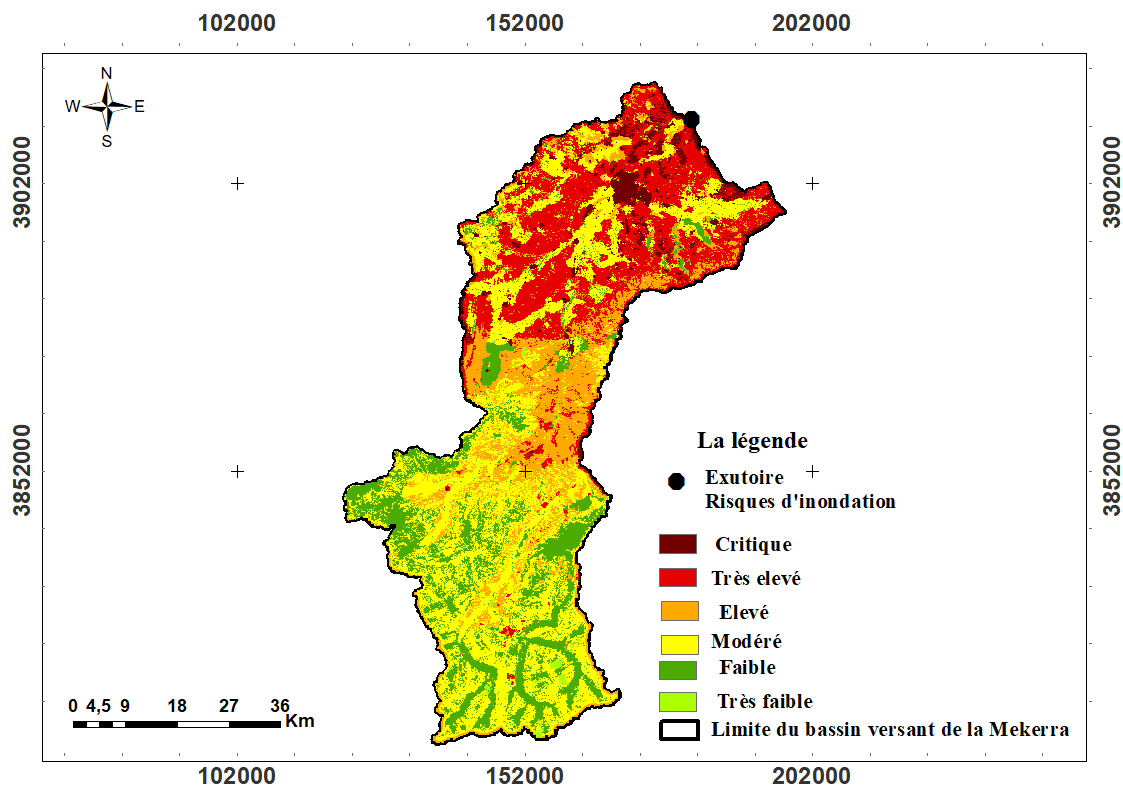


Figure V.15: Carte du risque d'inondation du bassin versant de Mekerra par la méthode FIGUSED

Les résultats obtenus à travers l'application du modèle FIGUSED dans le bassin versant de la Mekerra sont en accord avec ceux rapportés dans la littérature récente, notamment les travaux de Bachi, 2011 et Afra et al, 2025, qui ont mis en évidence une concentration accrue du risque d'inondation dans les zones urbanisées du Nord du bassin, en particulier autour de Sidi Bel Abbès. Les auteurs soulignent également l'influence déterminante de facteurs tels que la pente, l'occupation du sol et la proximité aux réseaux de drainage dans la genèse et l'intensification des crues. Cette convergence des résultats confirme la robustesse de l'approche multicritère adoptée et valide l'utilisation de paramètres physiques et anthropiques intégrés dans la modélisation du risque hydrologique.

Ainsi, la cohérence entre les résultats de cette étude et ceux d'autres recherches récentes apporte une confirmation supplémentaire quant à la pertinence de la méthode utilisée et renforce sa valeur en tant qu'outil d'aide à la décision pour la gestion des risques d'inondation.

V.5. Conclusion

L'analyse multicritère menée à travers le modèle FIGUSED a permis de dresser une cartographie fine et intégrée de la susceptibilité aux inondations dans le bassin versant de la Mekerra. Les résultats révèlent une forte hétérogénéité spatiale du risque, directement liée à la combinaison des facteurs topographiques, géologiques, climatiques et anthropiques. Près d'un quart du bassin, notamment dans les zones urbanisées du Nord et du Nord-est, présente un risque critique à très élevé, nécessitant des mesures urgentes de prévention et de gestion, telles que l'aménagement hydraulique, la maîtrise de l'urbanisation et la mise en place de dispositifs

d'alerte. Les zones à risque modéré, localisées en secteurs de transition, doivent faire l'objet d'une surveillance accrue et d'aménagements adaptés afin d'éviter une dégradation future de leur vulnérabilité. Enfin, les zones à faible risque, concentrées au Sud du bassin, jouent un rôle tampon essentiel qu'il convient de préserver, notamment en protégeant les couverts végétaux et les formations géologiques perméables.

Cette cartographie constitue ainsi un outil stratégique pour l'aménagement durable du territoire, la planification urbaine et la prévention des catastrophes naturelles, en orientant les actions prioritaires selon les niveaux de risque identifiés.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude s'inscrit dans un contexte où les catastrophes naturelles, en particulier les inondations, deviennent de plus en plus fréquentes et inquiétantes. Ce phénomène s'amplifie sous l'effet conjugué des changements climatiques, de l'urbanisation non maîtrisée et de la déforestation. Dans ce sens, une compréhension approfondie des processus de déclenchement et de propagation des crues devient essentielle afin de renforcer la sécurité des populations, la résilience des infrastructures et la préservation des écosystèmes. Le bassin versant de l'oued Mekerra, situé au Nord ouest algérien, occupant une superficie de 3616,66 Km² et caractérisé par un climat semi aride est marqué par une configuration hydro-géomorphologique complexe et une forte valeur socio-économique, il offre un cadre pertinent pour l'analyse et l'évaluation des risques hydrologiques.

L'approche adoptée repose sur l'intégration de données multidimensionnelles dans un environnement SIG, en mobilisant la méthode FIGUSED, une méthode multicritère basée sur la pondération de sept facteurs clés influençant la genèse et l'intensité des inondations : l'accumulation des flux (F), l'intensité des précipitations (I), la nature géologique (G), l'occupation du sol (U), la pente ou dénivelé (S), l'altitude (E) et la distance au réseau de drainage (D). Cette méthode, adaptée au contexte local, permet non seulement de superposer et croiser ces variables dans un modèle spatial intégré, mais aussi de générer une carte synthétique du risque, utile à la prise de décision.

L'analyse des différentes couches d'information à l'aide du logiciel Arcgis (version 10.8) a permis d'élaborer une cartographie thématique mettant en évidence les zones les plus exposées au risque. Les résultats révèlent une forte variabilité spatiale de la vulnérabilité au sein du bassin versant. Les secteurs situés au Nord et au Nord-est, en particulier dans les environs de Sidi Bel Abbès, présentent des niveaux de risque allant de très élevé à critique. Cette situation s'explique par la conjonction de plusieurs facteurs défavorables : pentes accentuées, faible perméabilité des formations géologiques (présence de marnes et d'argiles), réseau de drainage dense et urbanisation marquée. Ces zones doivent ainsi être considérées comme prioritaires dans le cadre des actions de prévention et de gestion du risque.

À l'opposé, les régions situées au Sud et au Sud-ouest du bassin, en particulier aux alentours de Hacaiba, affichent des niveaux de risque allant de faible à modéré. Cette situation s'explique par une topographie plus douce, des formations géologiques davantage perméables et une végétation encore relativement bien préservée. Cette distribution géographique du risque constitue un atout pour orienter les actions d'aménagement, hiérarchiser les investissements en infrastructures hydrauliques, et concevoir des plans d'intervention adaptés à chaque zone selon son degré de vulnérabilité.

L'intégration de la géologie, notamment à partir de la carte géologique de la région, a permis d'affiner l'analyse. Les zones dominées par des formations imperméables, telles que les marnes et les argiles, ont été systématiquement corrélées aux niveaux de risque les plus élevés. Cela

confirme l'influence déterminante du facteur géologique sur les processus d'infiltration et de ruissellement.

L'étude met en évidence l'apport significatif de la méthode FIGUSED en tant qu'outil pertinent pour la prise de décision à l'échelle territoriale. Grâce à sa flexibilité, à sa capacité à intégrer des données variées, ainsi qu'à la précision de ses résultats cartographiques, cette approche s'avère efficace pour l'analyse et la représentation spatiale des risques d'inondation dans les bassins versants. Par ailleurs, la méthode est transférable à d'autres zones présentant des caractéristiques similaires, sous réserve d'un ajustement des pondérations en fonction des conditions locales.

En somme, l'approche proposée poursuit un double objectif : identifier les zones exposées aux risques afin de guider les actions préventives (aménagement hydrauliques, planification urbaine, restauration des berges, etc.), et sensibiliser les acteurs locaux, qu'il s'agisse des autorités, des citoyens ou des professionnels de l'urbanisme à l'enjeu d'une gestion territoriale durable face aux aléas naturels. Elle constitue ainsi un socle pour l'élaboration d'une stratégie intégrée de gestion des risques, alliant sécurité et développement.

En conclusion, les résultats de cette étude confirment l'utilité et la performance des technologies géospatiales, en particulier les Systèmes d'Information Géographique (SIG), lorsqu'elles sont couplées à des méthodes d'analyse multicritère telles que FIGUSED. Ces outils permettent de traiter une grande diversité de données topographiques, hydrologiques, géologiques, climatiques et anthropiques en les intégrant dans un modèle spatial cohérent et interprétable.

L'analyse multiparamétrique permet d'adopter une approche globale des facteurs contribuant aux inondations, en attribuant à chacun un poids en fonction de son influence relative sur le phénomène. Cette méthode facilite non seulement la localisation précise des zones à risque élevé, mais aussi l'identification des causes sous-jacentes, qu'elles soient d'origine naturelle ou liées aux activités humaines.

En combinant différentes techniques d'analyse, cette approche améliore la capacité à anticiper les événements extrêmes, à orienter les choix d'aménagement en fonction des niveaux de vulnérabilité, et à élaborer des dispositifs de prévention et d'alerte adaptés aux spécificités locales. Ce travail souligne ainsi l'importance des outils géospatiaux dans une démarche de gestion intégrée des risques naturels, en les positionnant comme piliers essentiels d'une stratégie territoriale résiliente.

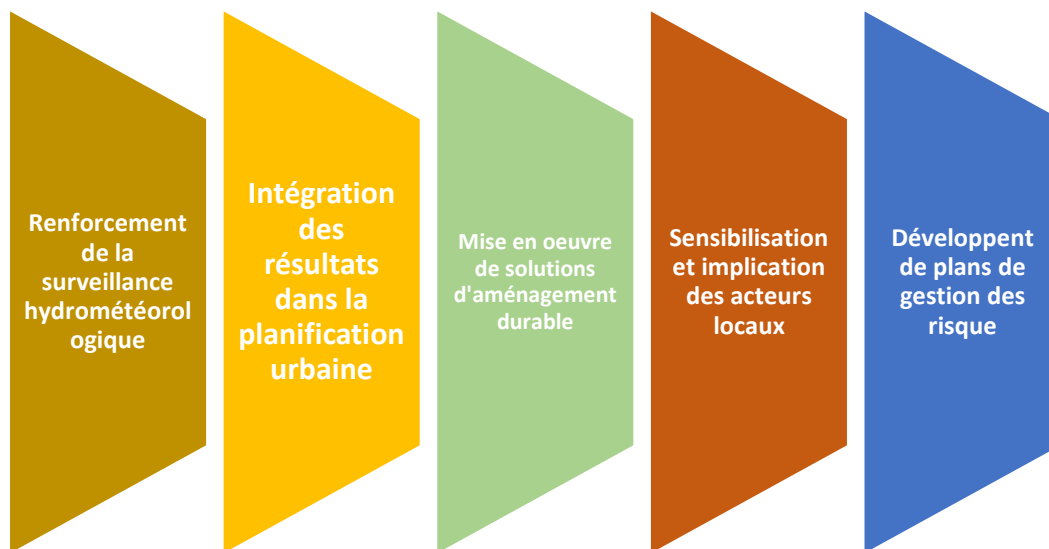
Recommandations et perspectives

Afin de bien mener ce genre d'étude nous recommandons de :

- Renforcer la surveillance hydrométéorologique, en multipliant le réseau de stations de mesure (pluviométriques, hydrométriques, etc.) afin d'améliorer la précision des données et la capacité d'alerte en cas de crue.
- Intégrer les résultats dans la planification urbaine en prenant en compte systématiquement les cartes de vulnérabilité produites dans les documents d'urbanisme (PDAU, POS) pour éviter les implantations en zones à risque élevé.

- Mettre en œuvre des solutions d'aménagement durable dans les zones critiques : aménagement de berges, bassins de rétention, restauration de la végétation, et limitation de l'imperméabilisation des sols.
- Sensibiliser et impliquer des acteurs locaux par le renforcement des campagnes de sensibilisation auprès des populations et des décideurs locaux pour encourager des comportements responsables et une meilleure gestion des ressources territoriales.
- Développer des plans de gestion des risques par l'élaboration des plans d'urgence adaptés à chaque zone selon son niveau de vulnérabilité, en y intégrant les dynamiques démographiques et les infrastructures sensibles.

Ces recommandations peuvent être résumées comme suit :



Et comme perspectives, nous souhaitons :

- Étendre cette méthode FIGUSED à d'autres bassins versants algériens, présentant des conditions similaires à notre bassin de la Mekerra, avec bien entendu des ajustements des pondérations selon les caractéristiques locales.
- Intégrer des données en temps réel par l'utilisation des capteurs connectés et de données satellitaires pouvant améliorer la réactivité des systèmes d'alerte.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdelbaki C., Allal M., Bachi M., (2012) : Cartographie de l'aléa inondation par approche hydraulique. Cas de l'agglomération de Sidi Bel Abbès, Editions universitaires européennes, 30_31pp.
- Afra A., Berrezel Y.A., Abdelbaki C., Megnounif A., Saber M., Benabdelkrim M.E.A., Kumar N. Application of the Rainfall–Runoff–Inundation Model for Flood Risk Assessment in the Mekerra Basin, Algeria. *GeoHazards* 2025, 6, 2.
<https://doi.org/10.3390/geohazards6010002>
- Auclair D., Biehler J., (1967) : Etudes géologiques des hautes plaines oranaises entre Tlemcen et Saida. *Publ. Serv. Géol. Algérie. Ann. Ser. 34*, p.3-45.
- Baba-Hamed K., Yousfi S., Bouanani A., (2008) : Hydrodynamique et modélisation de la nappe alluviale de la plaine de Sidi Bel Abbès (nord-ouest Algérien), *Journal de l'eau et de l'environnement*, ENSH-Blida.
- Bachi M., (2011). Problématique du risque inondation en milieu urbain. Cas de l'agglomération de Sidi Bel Abbès. Mémoire de Magister. Univ. Tlemcen. 95p.
- Bahlouli., (2001) : Les risques majeurs et l'aménagement du territoire. Colloque international ,15 et 16 novembre 2004, Alger -Algérie.
- Ballais J., Chave S., Delorme-Laurent V. & Esposito C., (2007) : Hydrogéomorphologie et inondable. *Revue Géographie physique et Quaternaire*, 61(1), 75_84 pp
- Barrouca B., (2006) : Risque et vulnérabilité territoriales : Les inondations en milieu urbain, thèse de Doctorat de l'Université de Marne-La-Vallée.
- Blin P., (2001) : Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences. Thèse de Grande de Maître-Université du Québec.
- Bob B., Andy M., (2001): « Prise en main d'ArcGIS », ERSR, New York Street Redlands-USA.
- Bouanani A., (2004) : Hydrologie, Transport solide et modélisation : Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW-Algérie). Thèse de doctorat d'Etat, Université de Tlemcen, 249 p.
- Chachoua A., (2024) Cartographie des risques d'inondation à l'échelle d'un bassin versant à l'aide de la méthode FIGUSED-S. Cas du bassin d'oued Tleta (NW algérien) . Mémoire de Master, Université de Tlemcen.
- Djebli A., (2024). Inondation à Bécher mesures d'urgences mise en place. Lasentinelle. <https://lasentinelle.dz/index.php/2024/09/10/inondations-a-becher-des-mesures-durgence-mises-en-place>
- Demek J., (1972): *Manual of Detailed Geomorphological Mapping*, Academia: San Francisco, CA, USA.

- FreddyV., (2010) : Les risques inondation diagnostiques et gestion, Edition TEC AND DOC Lavoisier.
- Hostache R., (2006) : « Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydrologique », Thèse de Doctorats, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts-Montpellier.
- HuangH., Yuantu H., Patrick W., Tom G., (1998), Interpolation spatiale utilisant un raisonnement flou et des algorithmes génétiques. *J. Géogr. Inf. Décis. Anal*, 2 (2) (1998), pages 204 à 214
- Kazakiz N., Kougiass I., Pasiass., (2015). Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process : Application in Rhodope—Evros region, Greece. *Sci. Total Environ.*, 538, 555–563.
- Lebourgeois F., Piedallu C., (2005) : Appréhender le niveau de sécheresse dans le cadre des études stationnelles et de la gestion forestière à partir d'indices bioclimatiques. *Revue forestière française*, 57 (4), pp.331-356. [10.4267/2042/5055](https://doi.org/10.4267/2042/5055)
- Ledoux B., (2006) : La gestion du risque inondation, Edition TEC et DOC, 11 rue Lavoisier-Paris.
- Lloyd., (2005) CD Lloyd, Évaluation de l'effet de l'intégration des données d'altitude dans l'estimation des précipitations mensuelles en Grande-Bretagne. *J. Hydrol.*, 308 (1) (2005), pages 128 à 150
- Meddi M., Sadouk Ben Abbès A., (2007) : Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'oued Mekerra(ouest de l'Algérie) *ResearchGate* N°2.Pp ;2. <https://www.researchgate.net/publication/274380597>
- Merabat A., (2006) : Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbès contre les inondations. Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes- Sidi Bel Abbès.
- Microsoft Corporation., (2008). Carte de localisation de la ville de Sidi Bel Abbès. Dans *Ecarta Encyclopédie [DVD]*. Microsoft.
- Otmane A., Baba-Hamed K., Bouanani A., Kebir L., (2018) : Mise en évidence de la sécheresse par l'étude de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued Mekerra (Nord-Ouest algérien). *Revue Techniques, Sciences Méthodes, TSM* N°9. Pp ; 23-37. <https://doi.org/10.1051/tsm/201809023>.
- Otmane A., (2019) : Impacts de la variabilité climatique sur l'hydrologie et la gestion des ressources en eau du bassin versant de l'Oued Mekerra (Nord-ouest algérien). Thèse de doctorat, Université de Tlemcen.
- Patrikaki O., Kazakis N., Kougiass I., Pasiass T., Theodossiou N. and Konstantinos V., (2018). Assessing Flood Hazard at River Basin Scale with an Index-Based Approach: The Case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 50.

- Pottier N., (1998). L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne). Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées.
- Raclot D., (2003) : Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de pleine, Thèse de doctorats en Science de l'Eau dans l'Environnement Continental-Université Montpellier II-France.
- Souriseau P., (1973) : Etude hydrogéologique de la nappe de Sidi Bel Abbés. Rapport d'étude, ANRH Oran.95pp.
- Zerouali M., (2005) : Création d'une base de données du réseau d'assainissement de Chetouane et réalisation de cartes numérisées à l'aide d'un SIG. Ingénieur d'Etat en Hydraulique, Université de Tlemcen.

Résumé

Les inondations représentent des phénomènes naturels ou anthropiques potentiellement dangereux, engendrant des dégâts considérables, notamment lorsqu'elles résultent de fortes précipitations combinées à des caractéristiques topographiques particulières.

Ce travail vise à étudier les risques d'inondation dans le bassin versant de l'Oued Mekerra, situé dans le Nord ouest de l'Algérie, au niveau de la ville de Sidi Bel Abbès. Ce bassin couvre une superficie d'environ 3616 km² et se divise en trois sous-bassins : le Mekerra amont, le Mekerra moyen et le Mekerra aval. Il prend sa source dans les hauteurs de Ras El Ma. Le bassin se caractérise par un climat semi-aride et un relief montagneux qui favorisent un ruissellement rapide et concentré vers le lit de l'oued, notamment en raison de pentes marquées et d'altitudes variant entre 470 m et 1700 m dans les montagnes du Djebel Tessala. Cette configuration topographique accentue le risque de crues soudaines et intenses.

Pour évaluer ces risques, nous avons adopté la méthode FIGUSED, qui intègre plusieurs paramètres tels que l'accumulation des flux, la géologie, l'occupation du sol, l'intensité des précipitations, la pente, ainsi que la proximité du réseau hydrographique. L'analyse spatiale a été réalisée à l'aide du logiciel Arcgis, permettant ainsi de cartographier les zones les plus vulnérables aux inondations.

Les différentes couches d'information ont été analysées et pondérées à l'aide de la méthode FIGUSED pour produire une carte de risque classant les zones en six niveaux : critique, très élevé, élevé, modéré, faible et très faible.

Les résultats obtenus ont permis de localiser les secteurs à haut risque, notamment dans les zones densément urbanisées et proches du lit majeur de l'oued. Ces informations sont essentielles pour orienter les politiques d'aménagement, de protection civile et de sensibilisation de la population face au danger d'inondation.

Mots clés : Sidi Bel Abbès, Oued Mekerra, crue, risques d'inondation, Cartographie, méthode FIGUSED.

Abstract

Floods are natural events or anthropiques, and they can create serious dangers, often leading to significant destruction, especially when heavy rainfall meets certain geographical features.

This study focuses on evaluating flood risks in the Oued Mekerra watershed, which is situated in northwestern Algeria, close to the city of Sidi Bel Abbès. Covering an area of about 3616km², this watershed is split into three sub-basins: Upper Mekerra, Middle Mekerra, and Lower Mekerra. Its origins are found in the highlands of Ras El Ma. The region experiences a semi-arid climate and has a mountainous landscape, which leads to quick and concentrated surface runoff towards the riverbed, particularly because of the steep slopes and elevation variations ranging from 470 m to 1700 m in the Djebel Tessala Mountains. This configuration topography greatly heightens the risk of sudden and severe flooding.

To assess these risks, we have adopted the FIGUSED method. This technique combines various factors, such as flow accumulation, geology, land use, rainfall intensity, slope, as well as the proximity of the hydrographic network. They conducted spatial analysis with Arcgis software, which helped in mapping out the area's most susceptible to flooding.

The various information layers were analyzed and weighted using the FIGUSED method to produce a risk map classifying the areas into six levels: critical, very high, high, moderate, low, and very low.

The results made it possible to identify high-risk areas, particularly in densely urbanized zones and those located near the main riverbed of the Wadi. This information is essential for guiding land-use planning policies, civil protection strategies, and public awareness efforts in the face of flood hazards.

Keywords: Sidi Bel Abbès, Oued Mekerra, flood, flood risk, mapping, FIGUSED method.

ملخص

تمثل الفيضانات ظواهر طبيعية أو بشرية المنشأ قد تكون خطيرة، حيث تحدث أضرار وخيمة، قد تكون ناتجة عن هطول أمطار غزيرة متزامنة مع خصائص طوبوغرافية معينة. يهدف هذا البحث إلى دراسة مخاطر الفيضانات ضمن حوض وادي ميكيرا الواقع في شمال غرب الجزائر، وتحديدًا على مستوى مدينة سيدي بلعباس. يمتد هذا الحوض على مساحة تُقدَّر بحوالي 3616 كم²، ويتكوّن من ثلاثة أحواض فرعية: حوض ميكيرا العلوي، ميكيرا الأوسط، وميكيرا السفلي. ينبع الوادي من مرتفعات رأس الماء، ويتميز بمناخ شبه جاف وتضاريس جبلية تُعزز من سرعة الجريان وتركيزه في قاع الوادي، وذلك بسبب الانحدارات الشديدة والارتفاعات التي تتراوح بين 470 و1700 متر في سلسلة جبال تسالة. تسهم هذه الخصائص الطوبوغرافية في زيادة احتمال وقوع فيضانات مفاجئة وعنيفة.

ولغرض تقييم هذه المخاطر، تم اعتماد منهجية تعتمد على تحليل عدة معايير، منها تراكم الجريان، طبيعة التربة والجيولوجيا، استخدامات الأراضي، كثافة التساقطات، الانحدارات، وقرب المواقع من الشبكة الهيدروغرافية. تم تنفيذ التحليل المكاني باستخدام برنامج الأركجيس من خلال تطبيق طريقة فيقوساد فيه مما أتاح إعداد خريطة دقيقة تبرز المناطق الأكثر عرضة للفيضانات.

تم تحليل وتقييم الطبقات المختلفة من المعلومات باستخدام طريقة فيقوساد لإنتاج خريطة للمخاطر تصنف المناطق إلى ستة مستويات: حرجة، عالية جدًا، عالية، متوسطة، ضعيفة، ضعيفة جدًا.

وقد مكنت النتائج المحصل عليها من تحديد المناطق ذات الخطورة العالية، لا سيما في المناطق الحضرية الكثيفة والقريبة من مجرى الوادي الرئيسي. تعد هذه المعلومات ضرورية لتوجيه سياسات التخطيط، والحماية المدنية، وتوعية السكان بمخاطر الفيضانات.

الكلمات المفتاحية: سيدي بلعباس، وادي ميكيرا، فيضانات، مخاطر الفيضانات، رسم الخرائط، طريقة فيقوساد.