

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MASTER**

En : **Hydraulique**

Spécialité : **Ressources Hydrauliques**

Par :

CHACHOUA Abdeldjalil

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).

Soutenu publiquement, le 13 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

Mme. GUASMI Imen	Maître de conférences classe A	Université de Tlemcen	Présidente
Mme. BENSAOULA Fouzia	Professeur	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. BABA- HAMED Kamila	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrante
M. BOUANANI Abderrazak	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadrant

Année universitaire **2023 /2024**

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah le Tout-Puissant, qui m'a donné le courage, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail

*Je souhaite adresser mes sincères remerciements à mon encadrante, Professeur **BABA - HAMED Kamila**, ainsi qu'à mon co-encadrant, Professeur **BOUANANI Abderrazak**, pour le temps qu'ils m'ont consacré, leurs orientations précieuses et leurs remarques attentives tout au long de ce travail.*

*Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury, Docteur **GUASMI Imen** et Professeur **BENSAOULA Fouzia** pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger et d'évaluer mon travail.*

*Une mention spéciale pour **OTMANE Abdelkader**, Maître de conférences à l'Université de Tiaret, qui a accepté de nous assurer la formation ArcGIS et que je ne saurais assez remercier pour son dévouement et sa générosité.*

*Je remercie chaleureusement le Directeur du laboratoire de Recherche n°25 Professeur **BOUANANI Abderrazak**, pour nous avoir permis l'accès aux salles de travail, ainsi que l'ingénieur de laboratoire, **M. HAMOUDA**, pour ses conseils indéfectibles et son assistance précieuse.*

Un remerciement spécial à la directrice de la Direction des Ressources en Eau (DRE) de Tlemcen pour son accueil chaleureux et sa coopération. Je suis particulièrement reconnaissant pour l'encadrement de qualité et les orientations précieuses fournies par les différents ingénieurs de l'entreprise Lors de mon stage. Leur expertise et leur soutien m'ont été d'une grande aide.

Je tiens aussi à remercier les enseignants du département d'Hydraulique de l'université de Tlemcen pour leur soutien et leurs enseignements.

Je profite de cette occasion pour exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à tous mes collègues de la promotion hydraulique 2024 pour leur camaraderie et leur soutien tout au long de cette période et avec qui j'ai passé des moments agréables et fraternels.

Que Dieu vous bénisse tous et vous accorde succès et prospérité.

Dédicaces

Je dédie ce travail à

Ma très chère mère, dont l'amour et l'affection inconditionnels m'ont toujours soutenu et inspiré.

Mon cher père, qui m'a constamment encouragé, conseillé et soutenu tout au long de ma vie.

Ma grand-mère, à qui je souhaite une longue vie et dont les prières et la présence bienveillante m'ont toujours été précieuses.

Mon frère, Zoheir, pour son soutien et sa camaraderie.

Mes sœurs, Sabah, Manel et Nahla, pour leur amour et leur encouragement constants.

Et à toute ma famille, qui a toujours cru en moi et m'a soutenu de diverses manières.

Mes très chers amis, Noureddine et Bilal, pour leur amitié inestimable et leur soutien indéfectible

Mes collègues de la promotion Hydraulique 2024, pour leur camaraderie, leur entraide et les souvenirs partagés tout au long de cette aventure académique.

À vous tous, je dédie ce travail avec gratitude et affection.

CHACHOUA Abdeldjalil

ملخص

مخاطر الفيضانات هي ظواهر طبيعية أو اصطناعية تؤدي إلى غمر مساحة ما بالمياه بشكل مؤقت.

يهدف هذا العمل إلى تحديد المناطق المعرضة لخطر الفيضانات بمجمع وادي غزوانة لحماية مدينة الغزوات من الفيضانات. يقع هذا الحوض في الشمال الغربي من الجزائر ويمتد على مساحة 285 كلم²، ويتميز بتضاريسه الوعرة ومنحدراته الشديدة وارتفاعاته التي تتراوح ما بين 250 إلى 1100 مترو تفضل هذه التضاريس التدفقات السريعة وردود الفعل الفورية للفيضانات.

FUGESD طريقة تم استخدامها لتحليل هذه الخصائص، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل تراكم التدفق واستخدام

الأراضي والجيولوجيا والانحدار وكثافة هطول الأمطار والارتفاع والمسافة بالنسبة لشبكة الصرف الصحي .

إن التراكم الموزون للمعايير جعل من الممكن إنشاء خريطة مخاطر الفيضانات، مما يكشف أن المناطق ذات المخاطر العالية والعالية جداً تقع بشكل رئيسي بالقرب من شبكة الصرف الصحي وفي المناطق المنخفضة، خاصة حول ملتقى وادي ثلاثونابما

توفر النتائج التي تم الحصول عليها أساساً متيناً لتخطيط وتنفيذ استراتيجيات الوقاية، التي تهدف إلى تقليل آثار الفيضانات على حياة البشر والأنشطة الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة

الكلمات المفتاحية: الغزوات، غزوانة، مخاطر الفيضانات، الفيضانات، رسم الخرائط.

Résumé

Les risques d'inondations sont des phénomènes naturels ou artificiels qui entraînent la submersion temporaire d'un espace par de l'eau.

Ce travail a pour objectif de déterminer les zones à risque d'inondation dans le bassin versant d'oued Ghazouana pour la protection de la ville de Ghazaouet contre les inondations. Ce bassin est situé dans le Nord ouest algérien et s'étend sur une superficie de 285 km², il est caractérisé par un relief accidenté avec des pentes abruptes et des altitudes variant de 250 à 1100 mètres. Cette topographie favorise des écoulements rapides et des réactions immédiates aux crues. La méthode FIGUSED a été utilisée pour analyser ces caractéristiques, en prenant en compte des paramètres tels que l'accumulation de flux, l'utilisation des terres, la géologie, la pente, l'intensité des précipitations, l'altitude et la distance par rapport au réseau de drainage.

La superposition pondérée des critères a permis de créer une carte des risques d'inondation, révélant que les zones à risque élevé et très élevé sont principalement situées près du réseau de drainage et dans les zones de faible altitude, en particulier autour de la confluence des oueds Tlata et Taima.

Les résultats obtenus offrent une base solide pour la planification et la mise en œuvre de stratégies de prévention, visant à minimiser les impacts des inondations sur les vies humaines et les activités socio-économiques de la région.

Mots clés : Ghazaouet, Ghazouana, Risque d'inondation, crue, FIGUSED, Cartographie.

Abstract

Flood risks are natural or artificial phenomena which result in the temporary submergence of a space by water.

This work aims to determine the areas at risk of flooding in the Oued Ghazouana watershed for the protection of the town of Ghazaouet against flooding. This basin is located in the northwest of Algeria and extends over an area of 285 km², it is characterized by rugged relief with steep slopes and altitudes varying from 250 to 1100 meters.

This topography favors rapid flows and immediate reactions to floods. The FIGUSED method was used to analyze these characteristics, taking into account parameters such as flow accumulation, land use, geology, slope, precipitation intensity, altitude and distance per relation to the drainage network.

The weighted overlay of the criteria created a flood risk map, revealing that high and very high risk areas are mainly located near the drainage network and in low-lying areas, particularly around the confluence of rivers. Tlata and Taima wadis.

The results obtained provide a solid basis for the planning and implementation of prevention strategies, aimed at minimizing the impacts of flooding on human lives and socio-economic activities in the region.

Keywords: Ghazaouet, Ghazouana, Flood Risk, Flood, FIGUSED, Mapping

Table des matières

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

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les inondations et leurs risque

I.Introduction.....	3
I.1. Exemples d'inondations.....	3
I. 1.1. Inondations dans le monde.....	3
I. 1.2. Inondations en Algérie.....	5
I.2. Origine et nature des inondations.....	7
I. 2.1. Plain alluviale.....	7
I.3. Contexte des inondations dans la gestion des risques.....	8
I.4.Évaluer le Risque d'Inondation : Approches et Méthodologies.....	10
I. 4.1. Aléa.....	10
A. Fréquence de l'aléa.....	10
I. 4.2. Vulnérabilité.....	11
I.5. Catégorisation des risques associés aux inondations.....	11
I. 5.1. Risque d'origine pluviale.....	12
I. 5.2. Risque d'origine fluviale.....	12
I. 5.3. Risque par crue torrentielle.....	12
I.6. Classification des types de dommages.....	13
I. 6.1.Les dommages directs.....	13
I. 6.2.Dommages indirects.....	13
I. 6.3.Dommages secondaires.....	13
I. 6.4. Dommages d'incertitude.....	14
I.7. Approches de gestion des risques liés aux inondations.....	14
I.8. Analyse hydrologique : Objectif et influence sur les inondations.....	15
I. 8.1. Objectif de l'étude	15
I. 8.2.Influence sur l'inondation.....	15
I.9. Conclusion	15

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

II.Introduction.....	17
II.1.Situation géographique.....	17
II.2. Aperçu géomorphologique.....	18

II.3. Aperçu géologique.....	18
II.4. Etude des caractéristiques physiques du bassin.....	21
II. 4.1. Caractéristiques de forme.....	21
II.4.1.1. Coefficient de compacité K_c	21
II.4.2. Rectangle équivalent.....	21
II. 4.2. Etude du relief.....	22
II.4.2.1. Courbe hypsométrique.....	22
II.4.2.2. Altitudes caractéristiques.....	22
II.4.2.3. Indice de pente (I_p).....	22
II.4.2.4. Indice de pente global (I_g).....	23
II.4.2.5. Dénivelée spécifique.....	23
II.4.2.6. Pente moyenne du bassin versant.....	24
II.4.3. Etude de quelques paramètres du réseau hydrographique.....	24
II.4.3.1. Densité de drainage (D_d).....	24
II.4.3.2. Fréquence des cours d'eau ou Densité hydrographique.....	24
II.4.3.3. Coefficient de Torrentialité.....	25
II.4.3.4. Temps de concentration.....	25
II.4.4. Résultats de l'étude morphométrique du bassin versant d'oued Ghazouana.....	26
II.4.4.1. Forme et dimensions.....	26
II.4.4.2. Réseau hydrographique.....	27
II.4.4.3. Hypsométrie du bassin.....	29
II.5. Conclusion	31

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

III. Introduction	33
III.1. Caractéristique des stations retenues pour l'étude.....	33
III.2. Etude des précipitations.....	34
III.2.1. Précipitations moyennes annuelles	34
III.2.2. Précipitations moyennes mensuelles.....	35
III.2.3. Précipitations moyennes saisonnières.....	36
III.2. 4. Analyse statistique des précipitations.....	36
A. Test graphique.....	37
B. Test numérique.....	38
C. Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée.....	39
III.2.5. Etude des apports au niveau de l'exutoire d'oued Ghezouana.....	39
A. Formule de Dery.....	39
B. Formule de Medinguer.....	39
C. Formule de Samie.....	39
D. Formule dite algérienne.....	40
E. Formule de l'ANRH	40
III.3. Etude des températures.....	40
III.3.1. Variation des températures moyennes interannuelles.....	40
III.3.2. Variation des températures moyennes mensuelles.....	41

III.4. Etude du climat.....	42
III.5. Etude des débits.....	44
III.5.1. Variation interannuelle des modules.....	44
III.5.2. Variation des débits moyens mensuels.....	45
III.5.3. Variation des débits moyens saisonniers.....	46
III.5.4. Corrélation pluie – débit au pas de temps annuel.....	47
III.6. Conclusion.....	48

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d’inondation

IV. Introduction	49
IV.1. Lien entre la modélisation et la cartographie.....	49
IV. 1.1. Visualisation des Modèles.....	49
IV. 1.2. Analyse Spatiale.....	49
IV. 1.3. Prédiction et Simulation.....	49
IV. 1.4. Intégration des Données.....	50
IV. 1.5. Aide à la Décision	50
IV.2. Modélisation : Concept et importance.....	50
IV. 2.1. Application de la modélisation dans le domaine de l’hydraulique.....	51
IV.3. Gestion du risque lié aux inondations.....	51
IV.4. Outils de cartographie du risque inondation.....	51
IV. 4.1. Relevés sur le terrain.....	51
IV. 4.2. Modélisation hydraulique.....	52
IV. 4.3. Télédétection.....	52
IV.5. Approches de cartographie de la vulnérabilité face aux inondations.....	53
IV. 5.1. Méthode Canadienne-Québécoise.....	53
IV. 5.2. Méthode des Zones d'Assurabilité des États-Unis.....	53
IV. 5.3. Méthode d'Inondabilité (France).....	53
IV.6. Méthode FIGUSED-S.....	54
IV.7. Paramètres pris en compte dans la méthode FIGUSED-S.....	54
IV. 7.1. Accumulation de flux.....	54
A. Comprendre la topographie	55
B. Reconnaître les lignes d'accumulation du flux	55
C. Identifier les bassins versants.....	55
D. Analyser les flux d'eau.....	55
IV. 7.2. Intensité des précipitations.....	56
IV. 7.3. Distance du réseau de drainage.....	56
IV. 7.4. Élévation.....	57
IV. 7.5. Pentes du terrain.....	57
IV. 7.6. Utilisation des terres.....	57
IV. 7.7. Géologie.....	58
IV.8. Interpolation des cartes.....	58
IV.9. C’est quoi un système d’information géographique ?.....	59
IV. 9. 1. Définition et fonctionnement.....	59
IV. 9.2. Utilité et fonctionnalité du SIG.....	60

IV. 9.3. Limites du SIG dans le domaine de cartographie.....	62
IV.10. Conclusion	63

Chapitre 5 : Résultats et discussion

V.Introduction	64
V.1. Matériel et méthode.....	64
V.2. Analyse des paramètres de la méthode.....	64
V. 2.1. Accumulation de flux (F).....	64
V. 2.2. Intensité des précipitations (I).....	66
V. 2.3. Géologie (G).....	68
V. 2.4. Utilisation des terres (Land use) (U).....	69
V. 2.5. Pente (Slope) (S).....	71
V. 2.6. Elévation (E).....	73
V. 2.7. Distance par rapport au réseau de drainage (D).....	74
V.3. Interpolation des indices.....	76
V.4. Résultats.....	77
V.5. Conclusion.....	80
Conclusion générale.....	81

Références bibliographiques

Liste des Photos

Photo I.1: Exemple d'inondation affectant le Sud-est de la France en Novembre 2019.....	3
Photo I.2 : Inondation de Bab El Oued – Alger, Novembre 2001.....	6
Photo I.3: Inondation de Ghardaïa (Oued Mzab), Octobre 2008.....	6
Photo I.4: Exposition de la zone industrielle de Skikda aux risques d'inondation en raison de sa proximité avec l'oued Saf-Saf.	7

Liste des figures

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les inondations et leur risques

Figure I.1: Relations topographiques entre les composantes d'une plaine alluviale.....	8
Figure I.2: Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité.....	8
Figure I.3: Gestion du risque	9
Figure I.4 : Représentation d'inondation d'origine pluviale.....	12
Figure I.5: Représentation du cours d'eau en temps normal (1) et lors d'une crue (2)	13
Figure I.6: Modes de gestion du risque d'inondation.....	15

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Figure II.1: Situation géographique du bassin versant d'Oued Ghazouana.....	18
Figure II.2: Esquisse géologique de l'Oranie Nord-occidental.....	20
Figure II.3: Bassin versant d'oued Ghazouana et ses affluents	26
Figure II.4 : Réseau hydrographique du bassin d'oued Ghazouana.....	28
Figure II.5: Répartition altimétrique du bassin versant d'oued Ghazouana.....	28
Figure II.6: Carte hypsométrique du bassin de l'oued Ghazouana.....	29
Figure II.7 : Courbe hypsométrique de l'oued Ghazouana.....	30

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

Figure III.1: Présentation des stations de mesure au niveau du bassin.....	33
Figure III.2: Variations interannuelles des précipitations à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)	35
Figure III.3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)	35
Figure III.4: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023).....	36
Figure III.5 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale. Station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023).....	38
Figure III.6: Variation interannuelle des températures à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023).....	41
Figure III.7: Variation mensuelle des températures à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023).....	42
Figure III.8: Courbe pluviothermique (1982/1983 – 2022/2023)	43
Figure III.9 : Représentation de la station de Ghazaouet sur l'abaque de De Martone.....	44
Figure III.10: Débit moyens annuels à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020).....	45
Figure III.11: Débit moyens mensuels à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020).....	46
Figure III.12: Débit moyens saisonniers à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020).....	46

Figure III.13:Corrélation entre les précipitations et les débits moyens annuels à la station DeGhazaouet (1971/1972 – 2019/2020).....	48
---	----

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

Figure IV.1: Cycle de vie de l'information géographique.....	61
--	----

Chapitre 5 : Résultats et discussion

Figure V.1: Cartographie de l'accumulation de flux (F) dans le bassin de Ghazouana.....	65
Figure V.2 : Répartition de l'indice de flux dans le bassin de Ghazouana.....	66
Figure V.3: Cartographie de l'intensité des précipitations (I) dans le bassin de Ghazouana...	67
Figure V.4 : Répartition de l'indice de l'intensité des précipitations dans le bassin de Ghazouana.....	67
Figure V.5: Cartographie de formations géologiques (G) dans le bassin de Ghazouana.....	68
Figure V.6 : Répartition de l'indice de Géologie (G) dans le bassin de Ghazouana.....	69
Figure V.7: Cartographie d'utilisation des sols (U) de Ghazouana.....	70
Figure V.8 : Répartition de l'indice d'utilisation des terres (U) le bassin de Ghazouana.....	71
Figure V.9: Cartographie de la répartition des pentes (S) de Ghazouana.....	72
Figure V.10 : Répartition de l'indice de pente (S) dans le bassin de Ghazouana.....	72
Figure V.11: Cartographie de la répartition des altitudes (E) de Ghazouana.....	73
Figure V.12 : Répartition de l'indice d'élévation (E) dans le bassin de Ghazouana.....	74
Figure V.13: Cartographie de la Distance par rapport au drainage (D) de Ghazouana.....	75
Figure V.14: Répartition de l'indice d'élévation (E) dans le bassin de Ghazouana.....	76
Figure V.15: Carte du risque d'inondation du bassin versant de Ghazouana par la méthode FIGUSED.....	80

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Etude de l'art sur les inondations et leur risques

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Tableau II.1: Classification du relief selon Ig par l'ORSTOM.....	23
Tableau II.2: Classification du relief selon Ds.....	24
Tableau II.3 : Caractéristiques de forme du bassin.....	26
Tableau II.4. Classes de formes de cuvette suivant les valeurs de l'indice de Gravelius.....	27
Tableau II.5: Répartition du bassin versant d'oued Ghazouana en tranches d'altitudes.....	30
Tableau II.6 : Récapitulatif des résultats des caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Ghazouana.....	31

Chapitre 3 : Etude hydro-climatique

Tableau III.1: Caractéristiques des stations retenues pour l'étude.....	33
Tableau III.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Ghazaouet(1971/72 – 2022/2023).....	34
Tableau III.3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet(1971/72- 2022/2023).....	35
Tableau III.4: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023).....	36
Tableau III.5: Paramètres de position et de dispersion des précipitations.....	37
Tableau III.6: Résultat d'adéquation de loi normale par le Test χ^2	38
Tableau III.7: Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée avec la loi normale pour la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023).....	39
Tableau III.8 : Apports interannuels moyen au niveau du bassin versant de Ghazouana(1971/72- 2022/2023).....	40
Tableau III.9: Températures moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet(1982/1983 – 2022/2023).....	41
Tableau III.10: Moyennes des précipitations et des températures à la station de Ghazaouet(1982/1983 – 2022/2023).....	42
Tableau III.11 : Classification du climat suivant l'indice d'aridité de Martonne.....	43
Tableau III.12: Débits moyens annuels à la station de Tleta(1970/1971 – 2019/2020).....	45
Tableau III.13 : Valeurs mensuelles des débits (1970/1971 – 2019/2020).....	45
Tableau III.14: Répartition des débits saisonniers (1970/1971 – 2019/2020).....	46

Chapitre 4 : Méthode de cartographie du risque d'inondation

Chapitre 5 : Résultats et discussions

Tableau V.1 : Classes des paramètres de la méthode FIGUSED et valeurs correspondantes..	78
---	----

Liste des acronymes et des abréviations

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
CRED : Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes
DRE: Direction des Ressources en Eau.
DEM: Digital Elevation Model
EM-DAT: Emergency Events Data base.
ESRI: Environmental System Research Institute.
HYFRAN: Hydrological Frequency Analysis
ORSTOM : Office de la recherche scientifique et technique outre-mer.
SIG : Système d'information géographique.
USGS: United States Geological Survey
MNE : Modèle numérique d'élévation
MNS : Modèle numérique de surface
MNT : Modèle numérique de terrain
SRTM: Shuttle Radar Topography Mission
NASA : National Aeronautics and Space Administration
3D : trois dimensions
 χ^2 : Chi deux
Ct : Coefficient de torrentialité
Cv : Coefficient de variation
Ds : Dénivelé spécifique
F: Flux
E: Elévation
IFM : Indice de Fournier modifié
Ig : Indice de pente global
Ip : Indice de pente
Kc ; Coefficient de compacité
L : Litre
Log : Logarithme décimal
Ln : Logarithme népérien
L: Longueur (m)
m : Mètre
P: Périmètre (km)
P : Précipitations (mm)
s : Seconde
δ: Sigma
S : Slope
S : Surface (km²)
T : Températures
T : Temps de concentration des eaux
U : Variable réduite de Gauss



**INTRODUCTION
GENERALE**

Introduction Générale

Les inondations constituent l'un des phénomènes naturels les plus dévastateurs, touchant des millions de personnes à travers le monde et engendrant des pertes socio-économiques considérables. Elles endommagent les infrastructures, perturbent les activités économiques, et mettent en péril les vies humaines. Face à ces défis, la cartographie des risques d'inondation s'est imposée comme un outil indispensable pour identifier les zones vulnérables, évaluer les risques et élaborer des stratégies de prévention et de gestion adaptées.

À l'échelle mondiale, les inondations se classent parmi les catastrophes les plus destructrices. En 2010, une enquête statistique mondiale a révélé que plus de 178 millions de personnes ont été gravement affectées par des inondations destructrices, et environ 75 millions de personnes se sont retrouvées sans abri. En Algérie, les inondations représentent un risque significatif, avec plusieurs événements majeurs enregistrés au cours des deux dernières décennies, causant des centaines de morts, des milliers de blessés et des milliards de dinars de dégâts matériels. Ces inondations catastrophiques sont souvent provoquées par des événements pluvieux intenses, particulièrement en Automne.

Étudier les inondations à grande échelle est complexe en raison de la diversité des facteurs locaux impliqués, tels que les précipitations, le relief, les réseaux hydrographiques, la couverture du sol, et d'autres paramètres environnementaux. Pour comprendre ces phénomènes et leurs interactions, les chercheurs ont développé des modèles sophistiqués en s'appuyant sur les systèmes d'informations géographiques (SIG), les techniques de télédétection, ainsi que les avancées en intelligence artificielle.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur le bassin versant d'Oued Ghazouana, également connu sous le nom d'Oued Tlata par les habitants de la région, situé dans les Monts des Traras au Nord ouest de l'Algérie. Ce bassin versant se distingue par son relief accidenté et son importance stratégique, notamment en raison de la présence du port de Ghazaouet. Cette région a connu plusieurs inondations historiques, notamment au 19ème siècle et en 1968, causant des dégâts importants et soulignant la nécessité de mesures de protection efficaces.

Pour répondre à ces enjeux, notre étude vise à produire une carte de vulnérabilité aux risques d'inondation du bassin versant d'Oued Ghazouana en utilisant la méthode FIGUSED. Cette méthode permet une analyse détaillée et précise des risques, en intégrant divers paramètres environnementaux et climatiques.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

Chapitre 1 : État de l'art sur les inondations et leurs risques, fournissant un aperçu des concepts, des causes et des conséquences des inondations.

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude, décrivant les caractéristiques physiques du bassin versant d'Oued Ghazouana.

Chapitre 3 : Étude hydro-climatique, analysant les données hydrologiques et climatiques pertinentes pour la région.

Chapitre 4 : Méthodes de cartographie du risque d'inondation et présentation de la méthode FIGUSED, détaillant les techniques et les outils utilisés pour la cartographie.

Chapitre 5 : Présentation des résultats et discussions, illustrant l'application de la méthode FIGUSED au bassin d'Oued Ghazouana et interprétant les résultats obtenus.

Enfin une conclusion générale pour faire la synthèse des résultats obtenues.

Ce travail vise à contribuer à une meilleure compréhension et gestion des risques d'inondation dans le bassin versant d'Oued Ghazouana, offrant ainsi des outils essentiels pour la prévention et la mitigation des impacts des inondations dans cette région.

Chapitre 01 : Etat de l'art sur les inondations et leurs risques

I. Introduction

Les inondations sont des phénomènes naturels qui surviennent lorsque des masses d'eau, provenant de précipitations intenses, de crues des cours d'eau débordent et submergent des zones terrestres. Elles peuvent causer des dégâts importants aux infrastructures, perturber les activités économiques et menacer la vie humaine. La gestion des inondations implique la prévision, la prévention, et l'intervention rapide pour minimiser leurs impacts destructeurs.

En Algérie, les inondations sont un problème récurrent qui affecte diverses régions du pays. En raison de sa géographie variée, incluant des montagnes, des plaines et des zones côtières, l'Algérie est sujette à différents types d'inondations. Les zones urbaines, en particulier, sont vulnérables en raison de l'urbanisation rapide et parfois désordonnée, ainsi que de systèmes de drainage insuffisants. Les inondations peuvent être exacerbées par des événements météorologiques extrêmes, qui sont de plus en plus fréquents et intenses en raison du changement climatique.

En effet, les inondations en Algérie, illustrent l'importance de développer des stratégies de gestion des risques efficaces. Cela inclut l'amélioration des infrastructures, l'élaboration de plans de gestion des eaux, et la sensibilisation des populations aux risques d'inondation. En outre, l'adaptation aux effets du changement climatique est essentielle pour réduire la vulnérabilité des communautés et renforcer leurs capacités face à ces événements naturels.

Les principaux objectifs de ce chapitre sont :

- Une revue bibliographique axée sur le processus de formation des inondations, suivie d'une analyse de leurs impacts sur les zones urbaines.
- L'examen des paramètres hydrologiques associés aux inondations.

I.1. Exemples d'inondations**I.1.1. Inondations dans le monde**

Les inondations représentent l'un des phénomènes naturels les plus destructeurs à l'échelle mondiale, affectant des millions de personnes chaque année. Elles surviennent dans divers contextes géographiques et climatiques, et leurs impacts varient considérablement selon la région et la préparation des communautés locales (photo I.1).



Photo I.1: Exemple d'inondation affectant le Sud-est de la France en Novembre 2019 [1].

Les inondations peuvent être causées par divers facteurs naturels et anthropiques citons par exemple:

- Précipitations Intenses : Pluies torrentielles, souvent dues à des tempêtes ou des systèmes de basse pression, qui dépassent la capacité d'absorption des sols et des systèmes de drainage.
- Fonte des Neiges : La fonte rapide des neiges au printemps peut provoquer des crues soudaines, surtout dans les régions montagneuses.
- Tempêtes et Ouragans : Les tempêtes tropicales et ouragans apportent des quantités massives de précipitations en peu de temps, provoquant des inondations côtières et fluviales.
- Tsunamis : les tsunamis peuvent submerger les zones côtières.
- Défaillance des Infrastructures : La rupture de barrages ou de digues peut entraîner des inondations catastrophiques.

Le Centre de recherche sur l'épidémiologie des catastrophes (CRED) basé à l'Université catholique de Louvain en Belgique, qui gère la base de données internationale sur les catastrophes (EM-DAT) annonça qu'entre 1994 et 2004, les catastrophes naturelles ont touché 2,5 milliards de personnes dans le monde, entraînant le décès de 478 100 personnes et des pertes économiques estimées à 690 milliards de dollars.

Parmi les exemples d'inondations les plus dévastatrices, touchant divers pays à travers le monde, nous citerons:

- 17 Février 1962 (Hambourg - Allemagne) : 300 décès.
- 17 août 1995 (Marrakech - Maroc) : 150 décès.
- Septembre 2004 (Haïti) : 1300 décès, 1100 disparus et 3000 blessés.
- 26 Décembre 2004 (Malaisie, Thaïlande, Sri Lanka et Inde) : 290 000 décès et 30 000 disparus
- Juillet 2005 (Maharashtra – Inde) : inondations et glissements de terrains, 969 décès. (944,2 mm de pluies tombées le 24 juillet 2005).
- Août 2005 (Europe) : 70 décès. (Boulghobra, 2006).
- Août 2007 (Bihar, Assam, UttarPradesh - Inde) : Plus de 2 000 décès.
- Novembre 2007 (Bangladesh) : Environ 1 100 décès.
- Juillet 2010 (Pakistan) : Environ 1 985 décès.
- Octobre 2011 (Thaïlande) : Environ 813 affectant 65 provinces sur 77.
- Novembre 2013 (Typhon Haiyan - Philippines) : Plus de 6 300 décès.
- Mai 2014 (Serbie et Bosnie-Herzégovine) : Environ 86 décès.
- Novembre 2015 (Chennai - Inde) : Environ 500 décès.
- Juillet 2016 (Chine) : Environ 475 décès.
- Mars 2019 (Cyclone Idai - Mozambique) : Plus de 1 300 décès (incluant Malawi et Zimbabwe).
- Juillet 2021 (Allemagne et Belgique) : Environ 242 décès (196 en Allemagne, 46 en Belgique).

Ces exemples montrent l'ampleur et la fréquence des inondations à travers le monde, soulignant l'importance de la préparation et de la gestion des risques pour minimiser les pertes humaines et matérielles.

I.1.2. Inondations en Algérie

Les inondations en Algérie sont un problème récurrent, principalement en raison de son climat méditerranéen, avec des saisons de pluies généralement concentrées entre Septembre et Avril, ainsi que des événements météorologiques extrêmes occasionnels comme le montrent les exemples qui suivent et les photos I.2, I.3 et I.4:

- Novembre 1927 (Mostaganem) : Environ 3000 décès.
- Octobre 1966 (Chlef) : 63 Décès.
- Janvier 1969 (Ouled Sidi Ali - Mascara) : 10 décès.
- Septembre 1969 (Biskra) : 28 décès.
- Octobre 1969 (Batna) : 28 décès.
- Octobre 1971 (Azazga - TiziOuzou) : 40 décès.
- Mars 1974 (TiziOuzou) : 52 décès dans la wilaya, 18000 sinistrés.
- Janvier 1980 (Alger) : 11 décès.
- Septembre 1980 (El-Eulma - Sétif) : 44 décès.
- Septembre 1980 (Sougueur - Tiaret) : 15 décès.
- Novembre 1982 (centre-ville – Annaba): 26 décès, 9500 sinistrés.
- Août 1983 (Birine - Djelfa) : 10 décès.
- Janvier 1984 (Ain Témouchent) : 33 décès.
- Février 1984 (Skikda) : 174 maisons démolies, 500 familles sinistrées.
- Décembre 1984 (Jijel) : 29 décès, 11000 sinistrés.
- Décembre 1984 (Skikda) : 11 décès, immersion de 400 hectares.
- Janvier 1986 (Bordj El Amir Khaled - AinDefla) : 13 Décès.
- Octobre 1986 (Sidi Bel Abbas) : 1 décès, 200 familles sans abris.
- Février 1990 (Ain Azel - Sétif) : 19 décès.
- Octobre 1993 (Oued Rhiou) : 22 décès, 14 blessés.
- Septembre 1994 (Bordj Bou Arreridj) : 16 décès.
- Octobre 1995 (Laghouat) : 40 décès.
- Avril 1996 (Annaba) : 5 décès.
- Janvier 1999 (Adrar) : 12 décès.
- Octobre 2001 (Tedjna - Chlef) : 15 décès.
- Novembre 2001 (Babel Oued – Alger) : Plus de 800 décès, 115 disparus.
- Août 2003 (Reggane - Tamanrasset) : 13 décès.
- Novembre 2004 (Skikda) : plus de 100 familles sans abris, 219familles sinistrées.
- Septembre 2005 (Illizi, Adrar et Tamanrasset) : 3 décès, 09 disparus.
- Février 2006 (Tindouf) : 50 à 60% d'infrastructures détruites aux camps des réfugiés sahraouis(12200 familles sans abris).

- Avril 2007 (M'sila) : 13 décès.
- Octobre 2007 (Béchar) : 2 morts emportés par les eaux.
- Octobre 2008 (Ghardaïa) : Plus de 50 décès et 50 blessés.
- Octobre 2008 (Béchar) : 8 morts, dégâts matériels importants.
- Octobre 2011 (El Bayadh) : 11 décès (Fortas, 2020).



Photo I.2 : Inondation deBâbEl Oued–Alger, Novembre 2001 [2]

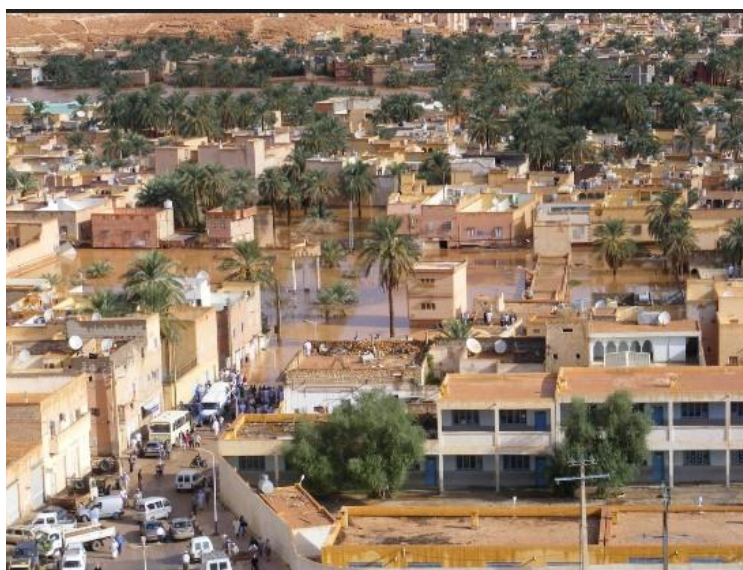


Photo I.3 : Inondation de Ghardaïa (Oued Mzab), Octobre 2008 [3]

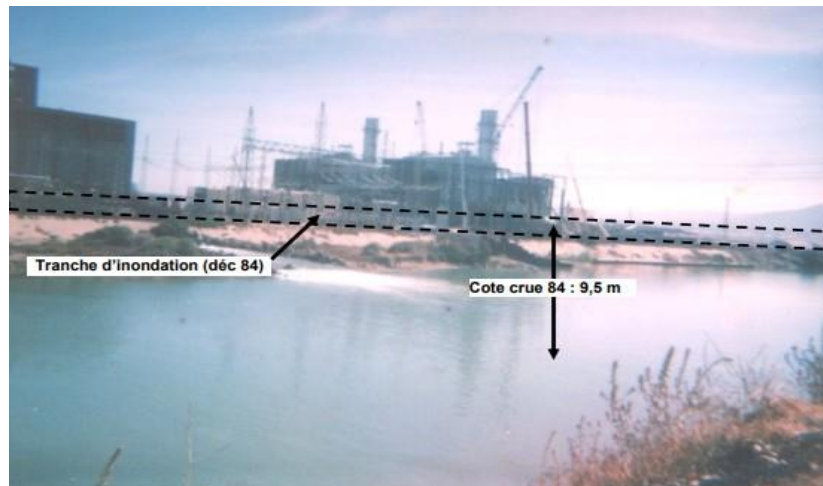


Photo I.4: Exposition de la zone industrielle de Skikda aux risques d'inondation en raison de sa proximité de l'oued Saf-Saf. (Boulghobra, 2006)

I.2. Origine et nature des inondations

L'inondation se définit comme une immersion, qu'elle soit rapide ou graduelle, d'une zone habituellement non immergée. De manière générale, ce phénomène englobe diverses situations telles que les débordements de cours d'eau, les remontées de nappes, les ruissellements résultant de fortes pluies d'orages, les inondations provoquées par la rupture d'ouvrages de protection, ainsi que les inondations estuariennes issues de la combinaison de fortes marées, de conditions dépressionnaires et de la crue des fleuves. (Freddy, 2010).

Notre étude se focalisera spécifiquement sur les inondations liées aux débordements de cours d'eau en plaine alluviale. Le principal facteur déclenchant d'une inondation en plaine est des précipitations importantes sur le bassin versant. Schématiquement, lors de fortes pluies, une partie de l'eau s'infiltre dans le sol tandis que le reste ruisselle sur les versants pour converger vers les cours d'eau. Lorsque le volume d'eau atteignant le cours d'eau est considérable, celui-ci déborde de son lit habituel, également appelé lit mineur, provoquant ainsi une inondation. (Freddy, 2010)

I.2.1. Plaine alluviale

La plaine d'inondation (ou plaine alluviale), objet central de notre étude, se situe au sein du bassin versant. Elle peut être définie comme "la terre bordant un cours d'eau, faite des sédiments déposés lors de débordements du cours d'eau et sujette à l'inondation au moment de la crue" (fig.I.1). Elle est traditionnellement divisée en trois éléments morphologiques différents :

- le lit mineur (ou permanent) occupé en permanence par les eaux,
- le lit majeur saisonnier (ou périodique ou moyen), inondé à peu près tous les ans,
- le lit majeur exceptionnel (ou épisodique), où l'écoulement ne s'effectue que lors de grandes crues. (Ludox, 2006)

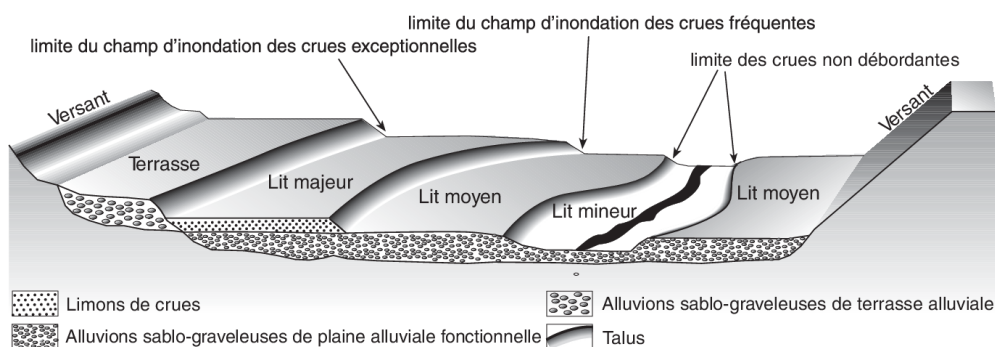


Figure I.1: Relations topographiques entre les composantes d'une plaine alluviale (Ballais et al., 2007)

I.3. Contexte des inondations dans la gestion des risques

La notion de risque généralement définie comme le résultat de deux composantes essentielles : l'aléa et la vulnérabilité (fig.I.2). Pour les spécialistes de l'étude des risques, il est désormais courant de considérer le risque comme le produit de l'interaction entre aléa et vulnérabilité (Desbordes, 1997).

Pour le risque d'inondation, l'aléa correspond au phénomène naturel aléatoire, tel que le débordement d'un cours d'eau et l'étendue de l'inondation. La vulnérabilité quant à elle désigne la sensibilité de l'utilisation des sols et de la société face à ce phénomène d'inondation (Pottier, 1998). Elle comprend intrinsèquement une notion d'acceptabilité, au sens socio-économique, des dommages potentiels encourus (Gendreau et al., 1998)

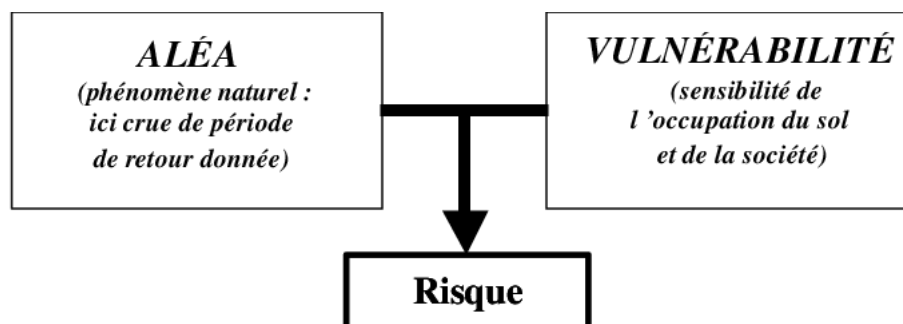


Figure I.2: Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité (Damien, 2003)

La caractérisation du risque est un défi complexe. Pour quantifier le risque de manière objective, la méthode Inondabilité cherche à mesurer et à comparer deux facteurs indépendants, l'aléa et la vulnérabilité, en utilisant une unité commune. Sa mise en œuvre dans un bassin versant nécessite une modélisation hydrologique (Débit-Durée-Fréquence) conjuguée à une modélisation hydraulique et de l'occupation du sol. Cette approche permet d'obtenir une représentation cartographique du risque (Damien, 2003).

Il est important de souligner que, contrairement aux approches traditionnelles qui privilégient souvent un produit, la méthode Inondabilité quantifie le risque en utilisant une différence

(Risque = Δ (aléa, vulnérabilité)). Cette approche innovante vise à fournir une évaluation plus précise et nuancée du risque lié aux inondations (Damien, 2003).

(Risque = Coût \times probabilité), permettant ainsi la définition d'un risque acceptable (Δ négatif).

La gestion du risque d'inondation peut se décomposer en trois phases (fig.I.3) :

- La décision d'occuper un territoire marque la phase préliminaire de la gestion du risque, connue sous le nom de phase de prévention. Les méthodes employées pour élaborer des modèles de prévention sont principalement statistiques et peuvent s'avérer complexes, voire impossibles, en l'absence de données historiques suffisantes ou lorsqu'elles sont trop limitées.
- La phase de gestion de crise implique la surveillance, l'alerte et la prévision d'un événement de crue potentiel afin d'en minimiser les conséquences possibles, en particulier en organisant efficacement les secours.
- L'analyse de l'événement et de ses conséquences, appelée analyse post-crise, permet de renforcer le retour d'expérience et d'améliorer ainsi les deux premières phases de la gestion du risque (Estupina, 2004).



Figure I.3: Gestion du risque d'inondation (Estupina, 2004).

La gestion des risques d'inondation résulte d'une longue évolution, passant d'une approche purement technique à une perspective hydraulique. Cette évolution est particulièrement marquée par la reconnaissance du lien entre inondations et aménagement du territoire.

En effet, la variabilité hydro climatique a conduit, après quelques décennies caractérisées par des crues de faible ampleur, à une augmentation notable des crues importantes. Cette situation soulève avant tout la question de leur prévision et, à partir de là, des mesures préventives à mettre en place. Identifier les facteurs qui favorisent le risque d'inondation revient à comprendre les processus qui les génèrent ainsi que les séquences d'événements qui en découlent. L'inondation résulte de l'interaction entre un aléa naturel et la présence humaine sur un territoire, et certains espaces sont plus susceptibles que d'autres de subir ce risque. Il est indéniable que le développement urbain, notamment dans les zones périurbaines, est étroitement lié aux risques d'inondation.

La croissance et la densification urbaine, ainsi que les mouvements de population vers des zones à risque telles que les zones inondables le long des cours d'eau ou sur des terrains instables, sous l'effet de la pression immobilière, contribuent à accroître la fréquence et l'intensité des inondations [1].

I.4. Évaluer le Risque d'Inondation : Approches et Méthodologies

L'évaluation du risque d'inondation implique d'abord la caractérisation distincte de l'aléa et de la vulnérabilité, avant de les croiser par la suite.

I.4.1. Aléa

L'aléa correspond au phénomène naturel imprévisible caractérisé par le débordement d'un cours d'eau et l'inondation de la zone environnante (Pottier, 1998). Les conséquences de cet aléa sur les enjeux peuvent être positives, comme la recharge des nappes phréatiques ou l'enrichissement des terres agricoles en limon, ou négatives, telles que la destruction d'habitats, la perte de vies humaines, et les interruptions des voies de communication (Ledoux, 2006).

A. Fréquence de l'aléa

La dimension fréquentielle de l'aléa examine la probabilité ou la récurrence dans le temps d'un événement particulier. Dans le cadre des risques naturels tels que les inondations, cette composante évalue la fréquence à laquelle se produisent des phénomènes spécifiques, comme les crues d'un cours d'eau à un niveau ou débit donné (Defrance, 2009).

Autrement dit, la composante fréquentielle de l'aléa permet de déterminer à quelle fréquence des événements spécifiques se produisent, ce qui fournit des données essentielles pour évaluer le niveau de risque associé à ces phénomènes et prendre des mesures appropriées en matière de prévention et de gestion. Cette caractérisation est souvent réalisée à travers des méthodes telles que l'analyse de la fréquence des événements passés ou l'utilisation de modèles statistiques :

$$T = \frac{1}{F} \quad (\text{Eq. I.1})$$

T : Période de retour (ans)

F : Fréquence

La composante spatio-temporelle de l'aléa se réfère à l'intensité du phénomène en tenant compte de ses dimensions spatiales et temporelles. Spatialement, l'aléa est caractérisé par divers paramètres, tels que les surfaces inondées, les hauteurs d'eau, les durées de submersion, ainsi que les vitesses et débits dans la plaine. Un indicateur couramment utilisé pour évaluer l'intensité de l'aléa est le débit de pointe, représentant le débit maximal instantané atteint au sommet de la crue. Ce débit varie selon la position dans la plaine d'inondation, soulignant une composante spatiale importante de l'aléa. En outre, le temps de concentration est souvent utilisé pour caractériser l'aléa. Théoriquement, il correspond au temps nécessaire à une goutte d'eau tombée au point le plus éloigné du bassin versant pour atteindre son exutoire. Ce temps

dépend de la capacité d'infiltration de l'eau dans les sols, influencée par l'occupation du sol et les caractéristiques morphologiques et climatiques du bassin versant. En général, pour des bassins versants ayant des caractéristiques morphologiques et climatiques similaires, un temps de concentration plus court est associé à un débit de pointe plus élevé. (DeFrance, 2009)

Selon leur intensité et leur fréquence, les niveaux d'aléa peuvent être classés comme suit :

- **Aléa majeur** : Aléa extrêmement rare mais très grave, présentant des risques immédiats et très sérieux de dommages. Les vies humaines sont directement menacées.
- **Aléa fort** : Les risques de dommages sont très élevés. En général, il n'existe pas de mesures de protection efficaces et économiquement viables.
- **Aléa moyen** : Zone affectée par des phénomènes encore très dommageables. Des mesures de protection sont généralement possibles.
- **Aléa faible** : Zone concernée par des manifestations très limitées. Toutefois, il existe un risque localisé lié à d'autres aléas, notamment en cas d'événement exceptionnel.

I.4.2. Vulnérabilité

La vulnérabilité est un concept applicable à divers domaines, y compris la gestion du risque d'inondation. En termes de risque d'inondation, la vulnérabilité selon Ledoux (2006) se définit comme le niveau d'impact prévisible d'un phénomène naturel (un aléa) sur les enjeux (les sociétés humaines et leurs infrastructures). Aussi, la notion de vulnérabilité porte sur les conséquences néfastes, c'est-à-dire les dommages, qui peuvent être de plusieurs types :

- Pertes en vies humaines et effets sur la santé des personnes,
- Dégâts matériels,
- Impacts liés aux difficultés de fonctionnement, d'échange et de communication.

L'évaluation des dommages causés par une inondation est particulièrement complexe en raison de la diversité des dommages directs et indirects. Les impacts indirects posent un défi supplémentaire car ils dépendent de la sensibilité des secteurs touchés et sont parfois difficiles à quantifier, notamment lorsqu'ils sont de nature intangible, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas être mesurés directement, en particulier sur le plan monétaire. Pour résoudre cette difficulté, il est souvent supposé que les dommages indirects et les dommages directs tangibles sont proportionnels, ce qui permet de se concentrer sur l'évaluation des dommages directs tangibles. (Damien, 2003)

I.5. Catégorisation des risques associés aux inondations

À l'exception de rares phénomènes de rupture de digue ou de barrage, les inondations résultent généralement de précipitations locales. En fonction du processus menant à l'inondation (origine, dynamique temporelle et spatiale), il est courant de distinguer trois principaux types de risques d'inondation, qui sont souvent combinés dans la réalité :

I.5.1. Risque d'origine pluviale

L'inondation par ruissellement est causée par des précipitations violentes sur des surfaces relativement petites (fig.I.4). Ce phénomène est localisé tant sur le plan spatial (de quelques kilomètres carrés à quelques dizaines de kilomètres carrés) que temporel (quelques heures). Bien que les zones touchées puissent être de faible étendue, elles peuvent malheureusement être densément peuplées, ce qui augmente le risque de dommages importants. (Damien, 2003)



Figure I.4 :Représentation d'inondation d'origine pluviale[6]

I.5.2. Risque d'origine fluviale

Le risque d'origine fluviale résulte du débordement exceptionnel de cours d'eau en plaine, souvent caractérisé par une montée lente des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces à faible pente(Ludox, 2006). Les zones exposées sont généralement de vastes étendues où les populations humaines se sont installées depuis longtemps (Ex : Inondation de Ghardaïa 2008).

I.5.3. Risque par crue torrentielle

Est le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau de montagne, généralement caractérisé par des montées rapides des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur des surfaces de fortes pentes. Les zones exposées sont souvent limitées mais la violence et la rapidité du phénomène le rend particulièrement dangereux (Ludox 2006).

Le risque d'origine montagnarde résulte du débordement exceptionnel de cours d'eau en montagne (fig.I.5), généralement caractérisé par des montées rapides des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur des pentes abruptes. Les zones exposées sont souvent limitées en superficie, mais la violence et la rapidité du phénomène le rendent particulièrement dangereux. (Ludox, 2006).



Figure I.5: Représentation du cours d'eau en temps normal (1) et lors d'une crue (2) [6]

I.6. Classification des types de dommages

Nous nous sommes basés sur les travaux de Ledoux (2006) pour expliquer cette classification :

I.6.1. Les dommages directs

Souvent répartis en deux catégories :

- Dommages à la structure du bâtiment.
- Dommages au contenu du bâtiment.

Les dégâts peuvent toucher les bâtiments, les infrastructures et les biens, qu'ils soient privés ou publics. Certains de ces dommages, comme ceux subis par les infrastructures et les habitations, peuvent être facilement évalués en termes monétaires. En revanche, d'autres dommages, affectant par exemple les secteurs commerciaux ou industriels, sont beaucoup plus difficiles à quantifier.

I.6.2. Dommages indirects

Les dommages causés par les inondations sont généralement économiques. Ils incluent, par exemple, la perte de chiffre d'affaires des commerces et des industries, ainsi que les coûts associés aux opérations de secours, aux détournements de routes et de voies ferrées, aux retards et à d'autres conséquences résultant de la montée des eaux.

I.6.3. Dommages secondaires

Les préjudices économiques majeurs affectent principalement ceux qui ne sont pas directement touchés par les inondations. Par exemple, les commerces et les industries peuvent subir des pertes importantes en raison des interruptions d'approvisionnement et de la diminution de leur clientèle, même s'ils ne sont pas situés dans les zones inondées.

Cela signifie que l'impact économique des inondations peut s'étendre bien au-delà des zones directement affectées, perturbant les chaînes d'approvisionnement et réduisant l'accès des clients aux entreprises.

I.6.4. Dommages d'incertitude

Les dommages découlant de l'incertitude ressentie par les victimes quant au moment et à la probabilité de la prochaine inondation peuvent être mesurés par le montant que les propriétaires seraient prêts à dépenser pour se débarrasser de ce problème. La perception joue un rôle très important dans cette évaluation.

I.7. Approches de gestion des risques liés aux inondations

La prévalence du risque d'inondation à l'échelle mondiale met en lumière les motivations considérables de tous les intervenants engagés dans l'élaboration de stratégies visant à atténuer ce risque.

Une première catégorisation des stratégies de gestion du risque d'inondation découle de la distinction entre l'aléa et la vulnérabilité (Damien, 2003). Cette approche permet de différencier :

- Les mesures structurelles, qui modifient l'aléa par le biais de solutions techniques telles que la construction de barrages, la rectification de cours d'eau ou la construction de digues.
- Les mesures non structurelles, qui agissent sur la vulnérabilité en cherchant à réduire les dommages potentiels de manière durable en dehors des situations de crise (par exemple, le contrôle de l'occupation des sols et de leur utilisation), ou en réaction directe à l'événement (comme la prévision des crues, l'annonce d'alertes et l'organisation des secours).

Une autre approche de typologie, jugée plus pertinente, réorganise les mesures précédentes en trois domaines d'intervention distincts (fig.I.6) :

- Culture du risque (Communication) : Ce volet se concentre sur la sensibilisation et l'éducation du public concernant les risques d'inondation, ainsi que sur la promotion de comportements et d'attitudes appropriés face à ces risques.
- Prédétermination et prévention du risque (Aménagement et réglementation) : Ce domaine implique des actions visant à réduire la vulnérabilité aux inondations par le biais de l'aménagement du territoire, des réglementations et des normes de construction, ainsi que par la mise en place de mesures de prévention structurelles telles que les digues et les barrages.
- Prévision et alerte (Gestion de crise) : Cette dimension concerne la mise en place de systèmes de surveillance et de prévision des crues, ainsi que de mécanismes d'alerte rapide permettant de prévenir les populations et de coordonner les interventions d'urgence en cas d'inondation (Blin, 2005).



Figure I.6: Modes de gestion du risque d'inondation (Damien, 2003).

I.8. Analyse hydrologique : Objectif et influence sur les inondations

I.8.1. Objectif de l'étude.

L'objectif principal d'une étude hydrologique sur les inondations est de comprendre et de modéliser le comportement hydrologique d'un bassin versant ou d'une zone à risque d'inondation. Cela inclut la détermination des débits et des hydrogrammes de crue lors d'événements extrêmes, tels que les crues centennales, afin d'améliorer les prévisions et la gestion des inondations. Ces études comprennent généralement l'analyse des données pluviométriques, la modélisation des débits de crue, la simulation des hauteurs d'eau et de l'ampleur des inondations, ainsi que la proposition de solutions d'aménagement pour atténuer les impacts des inondations (Bergui 2012).

I.8.2. Influence sur l'inondation

Les impacts de l'hydrologie sur les inondations sont vastes et englobent plusieurs processus, notamment le transfert des eaux à différentes échelles, l'urbanisation, les changements dans l'utilisation des sols, l'agriculture et l'aménagement l'espace.

Ces facteurs influent sur les processus de ruissellement, d'évaporation, de transport des sédiments et la morphologie des cours d'eau, pouvant ainsi amplifier le risque d'inondation. L'urbanisation, en particulier, entraîne une imperméabilisation des surfaces, favorisant le ruissellement aux dépens de l'infiltration, ce qui accroît le risque d'inondation. Par ailleurs, les inondations peuvent causer d'importants dommages matériels, affectant des millions de personnes et d'emplois. [5]

I.9. Conclusion

Les inondations représentent un défi majeur dans de nombreuses régions du monde, avec des conséquences dévastatrices pour les populations et les infrastructures. Leur occurrence est souvent exacerbée par des facteurs tels que l'urbanisation rapide, les changements climatiques et l'aménagement inadéquat des zones à risque. Pour atténuer les effets des inondations, une approche intégrée et proactive est nécessaire, impliquant une meilleure gestion des bassins versants, des mesures d'adaptation au changement climatique, une planification urbaine

résiliente et une sensibilisation accrue du public. En investissant dans la prévention, la préparation et la réponse aux inondations, nous pouvons réduire leur impact et protéger les communautés vulnérables contre cette menace persistante.

Ayant examiné les divers aspects des inondations, de leurs causes à leurs impacts, ainsi que les différentes stratégies de gestion des risques. Cependant, pour une compréhension complète des inondations dans notre zone d'étude, il est essentiel d'explorer les caractéristiques morpho métriques du bassin versant et les facteurs hydro climatologiques qui influencent le régime hydrologique de la région. Ainsi, dans le chapitre suivant, nous aborderons en détail la morphométrie et l'hydro climatologie du bassin versant d'oued Ghezouana en mettant en lumière leur rôle dans la genèse des inondations et leur impact sur la vulnérabilité du milieu.

Chapitre 02 : Présentation de la zone d'étude

II. Introduction

Le bassin versant d'Oued Ghazouana également connu dans la région sous le nom d'oued Tlata au sens large est situé dans les Monts des Traras dans le Nord-ouest de l'Algérie. Son exutoire est situé à Ghazaouet, sur la côte méditerranéenne à environ 70 kilomètres à l'Ouest de la ville de Tlemcen. Le bassin se distingue par son relief accidenté, orienté parallèlement à la côte. Il appartient au bassin hydrographique côtier et est composé de deux oueds principaux:

- Oued Tlata qui draine une grande partie de la commune de Nedroma.
- Oued Taima qui draine la zone occidentale de la commune de Djebela.

Les deux oueds se croisent pour donner l'oued Marsa qui traverse la ville de Ghazaouet et termine sa course au niveau de l'ancienne plage de la ville.

La région de Ghazaouet est non seulement stratégique en raison de son port, qui joue un rôle important dans le commerce et la pêche, mais aussi pour son industrie locale et sa population croissante. En raison de son emplacement géographique sur la côte méditerranéenne et de son relief accidenté, Ghazaoueta connu quelques inondations ce qui a poussé les autorités coloniales à envisager la construction d'un barrage écrêteur sur l'oued Tleta(sens strict) au niveau des ponts des tremble (Djamaa Sekhra) à 7 km au Sud, pour la protection de la ville. En 1968 Ghazaouet a connu une inondation qui a causé des dégâts important et la fermeture des écoles pendant 1 mois. Aussi, et pour lutter contre ce phénomène l'aménagement de l'oued (élargissement et construction de berges par enrochement) a été réalisé sur toute la partie de l'oued qui traverse la ville. Cet aménagement a pu jusqu'à maintenant éviter d'autres inondations, toutefois l'extension urbaine et les changements climatiques constitueraient des facteurs de risque. Aussi, une étude de cartographie des zones inondables et de risque d'inondation pour le bassin d'oued Ghazouana s'impose. Pour ce faire, nous allons dans ce chapitre mener une analyse des composantes de l'hydro-système du bassin versant.

II.1. Situation géographique

Le bassin versant d'oued Ghazouana prend sa position dans la bande côtière ouest de l'Algérie sur la mer Méditerranée, issu de la confluence des deux oueds, oued Taima qui draine la zone occidentale de la commune de Djebala et oued Tlata qui draine une grande partie de la commune de Nedroma (fig.II.1).

Le bassin versant de l'Oued Ghazouana couvre une superficie de 285 km². Il est délimité au Nord par la mer Méditerranée, au Sud et au Sud-est par le bassin de la Tafna, à l'Ouest par les localités de Bab el Assa et Marsa Ben Mhidi. Les oueds Tleta et Taima convergent au sein de ce bassin versant, formant l'Oued Mersa, qui se jette dans la mer à l'Ouest du port de Ghazaouet. L'exutoire de ce bassin se situe aux coordonnées suivantes :

- Longitude : 1°52'00''W
- Latitude : 35°06'00''N



Figure II.1: Situation géographique du bassin versant d'Oued Ghazouana

II.2. Aperçu géomorphologique

Le bassin versant de l'oued Ghazouana est situé dans la partie nord-orientale de la chaîne montagneuse des Traras, s'ouvrant sur la mer Méditerranée. Il se caractérise par un relief accidenté, avec des pentes raides, les altitudes culminant au Sud à plus de 1100 mètres au djebel Fillaoucène. Cette topographie suggère un potentiel d'écoulement à des vitesses élevées, entraînant une réactivité rapide aux crues, qui peuvent survenir dans un laps de temps relativement court.

Les pentes dans la ville de Ghazaouet sont assez prononcées, atteignant généralement entre 10 et 12%. La zone de faibles pentes (inférieures à 2%) correspond à la partie basse de la ville, près de l'embouchure de l'oued. Au Nord-est, le plateau de Sidi Amar domine la ville, ayant une forme triangulaire avec une base de 1500 mètres. Bien que le plateau soit relativement plat, les pentes au sommet sont inférieures à 1.5%, tandis que les flancs présentent des pentes abruptes variant entre 10 et 12%. Les plateaux d'Addas et Argoub à l'Ouest de la ville affichent des pentes variées, allant de 5 à 12%. (Berbar et al., 2006)

II.3. Aperçu géologique

Cette synthèse a été faite à partir des travaux géologiques antérieurs menés sur la région et en particulier ceux de Gautier (1922), Fenet (1975), Guardia (1975) et Megartsi (1985). Elle permet de définir les grands traits de cette région que l'on peut diviser en trois zones, orientées Est-Ouest (fig. II.2).

- La zone sud comprend la chaîne de Fillaoucène, qui présente une série stratigraphique allant des schistes primaires aux calcaires du Jurassique supérieur. Les épaisseurs des formations calcaires secondaires en font un petit château d'eau régional.
- La zone centrale s'appuie à l'Est sur un petit batholite de granite dit de Nedroma ayant servi de matériau de base à une formation de poudingue d'âge permo-triasique (des Beni Menir). C'est une roche très dure dans laquelle il est particulièrement difficile d'effectuer des captages. Quelques petites sources en sont issues. Cette formation disparaît ensuite sous des épanchements basaltiques. Vers l'Ouest se trouve un bassin miocène dont seul le centre est susceptible de contenir une petite nappe (de Sidi Brahim à Bab El Assa).

- Une zone côtière, qui est en fait le déplacement vers le Sud et par chevauchement sur la zone précédente, de formations originellement situées à l'emplacement de la mer actuelle. Les formations déplacées comprennent des lambeaux de Trias de faciès divers (marne, gypse, dolomie et roche verte) ayant servi de plan de glissement. Ils sont surmontés du Lias calcaire (calcaires massifs parfois entrecoupés de schistes), puis de formations schisteuses attribuées au Jurassique supérieur et au Crétacé. De plus, quelques grès tertiaires transgressifs subsistent au voisinage même de la cote.

Aux environs de Ghazaouet, on rencontre successivement de bas en haut (Rapport de la DHW in Chachoua, 2010) :

- Le socle schisteux hercynien,
- Le Jurassique inférieur : Calcaire ou calcaire-dolomitique, qui est visible au niveau du port de Ghazaouet au lieu-dit « la Grotte », et qui montre de nombreux plissements.
- les grès grossiers du Miocène : Discordant sur le Jurassique. Ces grès souvent argileux, mal lités, plus ou moins consolidés, se retrouvent de part et d'autre de la vallée de l'Oued Ghazouana surplombant la ville de Ghazaouet.
- Les couches rouges : Alluvions continentales anciennes formées par des argiles plus ou moins sableuses avec des niveaux de cailloutis roulés et de petits bancs marno-calcaires plus consolidés. Ces couches rouges peuvent passer latéralement à des sables dunaires à stratifications entrecroisées. Cette formation se situerait au-dessus des grès du Miocène.
- les basaltes post-miocènes forment des coulées au-dessus du Jurassique et des couches rouges. Ces basaltes sont visibles à la sortie de la ville.
- Les alluvions sableuses anciennes forment des grès tendres à la base dans lesquels on trouve des cinérites.
- Les alluvions récentes de l'oued Ghazouana, argilo-sableuses, à niveaux conglomératiques souvent bien développés dans les zones de méandres.

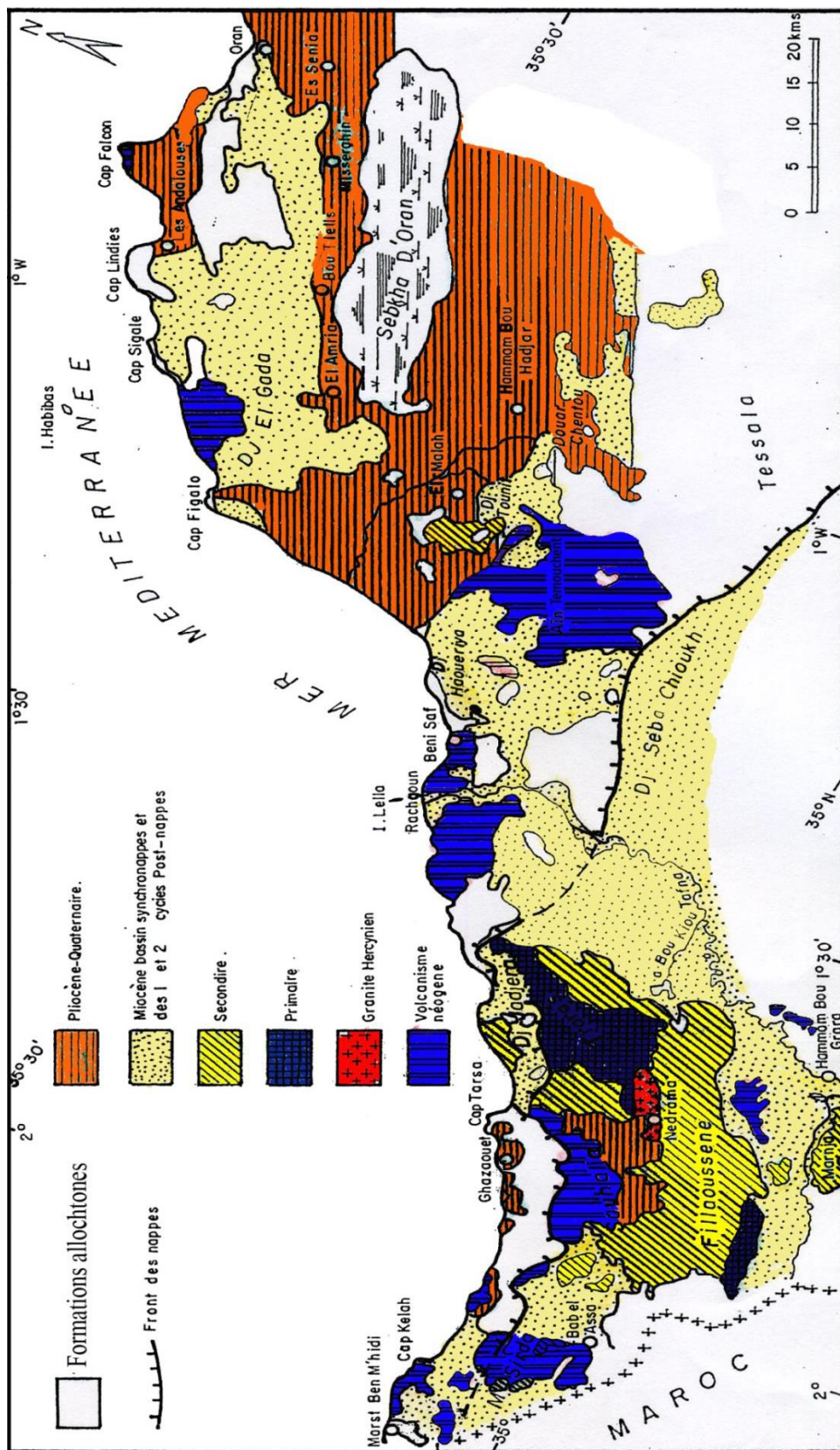


Figure II.2: Esquisse géologique de l'Oranie Nord-occidentale.
 (D'après Fenet,1975 ; Guardia ,1975et Megartsi, 1985).

II.4. Etude des caractéristiques physiques du bassin

La morphométrie, en analysant quantitativement les aspects physiques des bassins, fournit des informations importantes pour évaluer les processus hydrologiques, les dynamiques de sédimentation, et les risques d'inondation.

Le bassin versant, en tant qu'unité fondamentale de l'écoulement de l'eau, capte les précipitations et dirige le ruissellement vers un exutoire commun. Les caractéristiques morphométriques d'un bassin, telles que sa superficie, sa forme, son réseau de drainage, et la pente de son relief, influencent directement le comportement hydrologique du bassin, incluant la vitesse de l'écoulement, le temps de concentration, et la capacité de rétention des sols.

L'analyse morphométrique permet d'identifier les zones sensibles à l'érosion et aux inondations, et de planifier des mesures d'aménagement du territoire adaptées. En intégrant les résultats de la morphométrie dans les modèles hydrologiques, les chercheurs et les gestionnaires peuvent prédire les réponses des bassins versants aux changements climatiques et aux activités anthropiques, aidant ainsi à la prise de décisions informées pour la protection de l'environnement et la durabilité des ressources en eau.

Dans cette partie, nous nous focalisons sur la quantification et l'analyse des paramètres morphométriques clés du bassin d'oued Ghazouana, tels que la densité de drainage, le coefficient de compacité, le facteur de forme, l'hypsométrie par l'utilisation des outils de géomatique, comme les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection. Il nous a été possible de la réaliser à partir de Arcgis 10.5.

II.4.1. Caractéristiques de forme

II.4.1.1. Coefficient de compacité K_c

Défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Cet indice qui caractérise la forme du bassin versant est donné par la relation suivante :

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

P : Périmètre du bassin versant (km).

A : Surface du bassin versant (km²).

II.4.1.2. 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 :

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

L : Longueur du rectangle équivalent (km),

A ; Superficie du bassin versant (km²),

K_c : Coefficient de compacité

Nous déduisons la largeur du rectangle équivalent à partir de la surface : A / L

II.4.2. Etude du relief

L'impact du relief sur le débit s'explique aisément, car plusieurs facteurs hydrométéorologiques, tels que les précipitations et les températures, varient en fonction de l'altitude. En outre, la pente du terrain joue un rôle dans la vitesse d'écoulement.

II.4.2.1. Courbe hypsométrique.

La courbe hypsométrique fournit une représentation synthétique de la topographie d'un bassin versant, reflétant son relief. Elle montre comment la surface du bassin est distribuée en fonction de l'altitude. Sur l'axe des abscisses, on représente la surface totale (ou le pourcentage de la surface) du bassin au-dessus (ou en-dessous) d'une altitude spécifique, laquelle est indiquée sur l'axe des ordonnées. Cette courbe traduit la proportion de la superficie du bassin située au-delà d'une certaine altitude. La forme de la courbe hypsométrique offre des indications sur les pentes et la répartition altitudinale des zones du bassin, permettant d'évaluer le potentiel érosif du bassin versant. La construction de cette courbe repose sur la planimétrie des surfaces entre les différentes courbes de niveau.

II.4.2.2. Altitudes caractéristiques

Certaines altitudes sont déterminées pour caractériser les bassins versants.

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

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

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

A_i : Aire comprise entre deux courbes de niveau (m^2)

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

A : Superficie totale du bassin versant (km^2)

- L'altitude la plus fréquente, c'est le maximum de la courbe des fréquences Altimétriques
- L'altitude de fréquence $\frac{1}{2}$, c'est l'altitude qui correspond au point d'abscisse $\frac{1}{2}$ de la Courbe hypsométrique.

II.4.2.3. Indice de pente (I_p)

Cet indice se calcule à partir du rectangle équivalent, il est égal à la somme des racines carrées des pentes moyennes de chacun des éléments pondérés par la surface intéressée.

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

I_p : Indice de pente (%)

L : Longueur du rectangle (m),

Xi: 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),

$\frac{di}{dx}$: Pente moyenne d'un élément

II.4.2.4. Indice de pente global (**Ig**)

Le relief joue un rôle important, car il commande en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains. Son appréhension peut être faite à l'aide de l'indice de pente global **Ig** donné par la relation :

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

Ig : 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. H5 et H95 sont les altitudes entre lesquelles s'inscrivent 90% de la surface du bassin.

Tableau II.1: Classification du relief selon **Ig** par 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	$0.005 < I_g < 0.01$
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.4.2.5. Dénivelée spécifique

L'indice **Ig** décroît pour un même bassin lorsque la surface augmente, il était donc difficile de comparer des bassins de tailles différentes. La dénivelée spécifique **Ds** ne présente pas cet inconvénient : elle dérive de la pente globale **Ig** en la corrigeant de l'effet de surface admis étant inversement proportionnel à **A**: Elle est donnée par :

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

Tableau II.2: Classification du relief selon Ds (*in* Bouanani, 2004)

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

II.4.2.6. Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne revêt beaucoup d'importance en tant que caractéristique révélatrice de la topographie du bassin versant. Elle donne une bonne indication sur le temps de parcours du ruissellement direct - donc sur le temps de concentration (Tc) et influence directement le débit de pointe lors d'une averse.

La relation suivante permet d'obtenir une valeur approximative de la pente moyenne :

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

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

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

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

A : Surface du bassin versant (km²).

II.4.3. Etude de quelques paramètres du réseau hydrographique

II.4.3.1. Densité de drainage (Dd)

Appelée aussi la densité de thalwegs, elle est définie comme étant le rapport de la somme des longueurs des cours d'eau de tous les ordres sur la surface drainée.

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

Dd : Densité de drainage (km/km²).

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

A : Surface du bassin (km²).

II.4.3.2. Fréquence des cours d'eau ou Densité hydrographique

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

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

F : Densité du réseau hydrographique (km⁻²).

Ni : Nombre de cours d'eau.

A : Surface du bassin versant (km²).

II.4.3.3. 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.

F : Fréquence des thalwegs élémentaires.

II.4.3.4. Temps de concentration

Il s'agit du laps de temps requis pour qu'une particule d'eau s'écoule depuis l'élément hydrologiquement le plus éloigné du bassin versant jusqu'à l'exutoire. Sur le plan théorique, le temps de concentration (T_c) est considéré comme la période allant de la fin de la pluie nette à la fin du ruissellement. En pratique, cette durée peut être dérivée à partir de mesures sur le terrain ou estimée à l'aide de formules empiriques. (Bouanani, 2004)

- **Formule de Giandotti**

$$T_c = \frac{4\sqrt{S} + 1,5 \cdot L_p}{0,8\sqrt{H_{moy} - H_{min}}} \quad (\text{Eq.II.11})$$

T_c: Temps de concentration (heure)

L_p : Longueur du thalweg principal (Km).

A: Surface du bassin versant (Km²).

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

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant (m)

- **Formule de CALIFORNIA**

$$T_c = \left(\frac{0,87 \cdot L^3}{H_{max} - H_{min}} \right)^{0,386} \quad (\text{Eq.II.12})$$

T_c: Temps de concentration (heure)

L: Longueur du talweg principal (Km)

H_{max}, H_{min}: Respectivement l'altitude maximale et minimale du B.V (m).

- **Formule de VENTURA**

$$T_c = 0,1272 \cdot \sqrt{\frac{A}{I_{moy}}} \quad (\text{Eq.II.13})$$

A: Surface du bassin versant (Km²).

I_{moy}: Pente moyenne du bassin.

T_c: Temps de concentration (heure).

II.4.4. Résultats de l'étude morphométrique du bassin versant d'oued Ghazouana

Le bassin versant d'Oued Ghazouana englobe plusieurs oueds (fig.II.3) :

- Oued Tlata qui draine l'Est et le Sud du bassin,
- Oued Taima au Sud de la commune de Ghazaouet et Tient, avec comme affluent principal Oued El Aoun qui se trouve à l'extrémité sud du bassin versant,

Oued Tlata et oued Taima constituent les principaux affluents de l'oued Ghazouana, ils se rejoignent à l'amont de Djemaa Essakhra pour se jeter dans l'oued Marsaqui passe au milieu de la ville de Ghazaouet et constitue le cours d'eau principal du bassin.

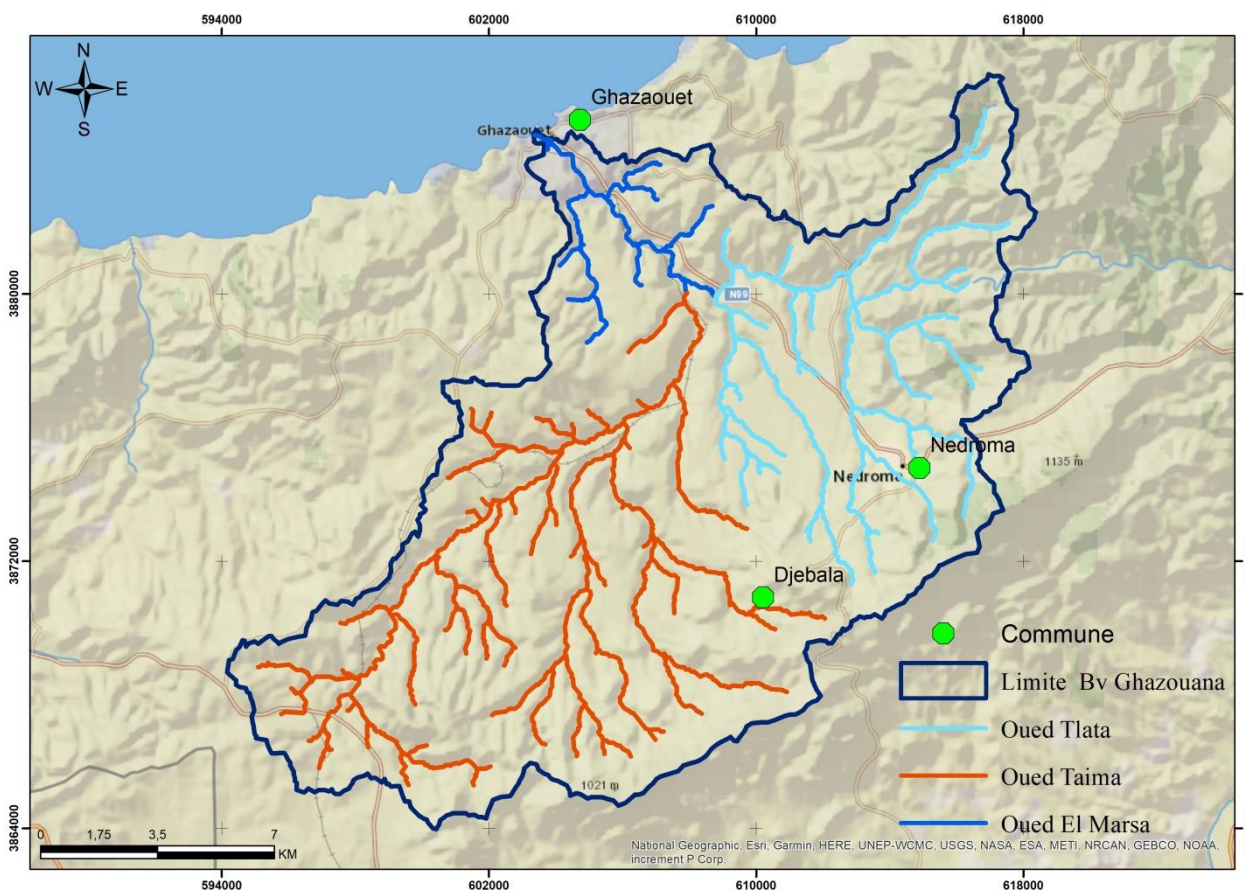


Figure II.3: Bassin versant d'oued Ghazouana et ses affluents

II.4.4.1. Forme et dimensions

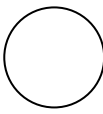


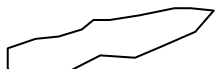

Les résultats de cette étude sont illustrés sur le tableau II.3 :

Tableau II.3 : Caractéristiques de forme du bassin

Bassin Versant	A (Km ²)	P (Km)	Kc	Longueur (Km)	largeur (Km)
Oued Ghazouana	285	102	1.69	44.61	6.39

Afin d'analyser les coefficients de compacité, nous nous sommes référés à la classification selon Karimou Barké et al., 2017 (tableau II.4) :

Tableau II.4. Classes de formes de cuvette suivant les valeurs de l'indice de Gravelius.
(Karimou Barké et al. 2017).

Forme	Valeurs de l'indice	Définition	Schéma stylisé
Circulaire	1 à 1.03	Cuvettes ayant la forme de cercle	
Ovoïde	1.03 à 1.3	Cuvettes ovoïdes	
Amiboïde	1.3 à 1.4	Cuvettes caractérisées par une association de plages irrégulières, lobées, d'aspect amiboïde, à contours nets, très contrastés	
Étirée	1.4 à 1.7	Cuvettes allongées	
Très étirée à tendance amiboïde	>1.7	Cuvettes plus étirées que les précédentes. Elles présentent souvent des fragments amiboïdes c'est-à-dire des contours lobés	

Les valeurs de l'indice de compacité de Gravelius, soit 1,69 pour le bassin versant de l'Oued Ghazouana permet de le classer dans la catégorie des bassins versants de forme allongée et étirée.

II.4.4.2. Réseau hydrographique

La formation d'un réseau hydrographique, c'est-à-dire l'ensemble des cours d'eau qui drainent une région, est le résultat d'un processus complexe influencé par divers facteurs géologiques, climatiques et biologiques, contraignant ainsi l'eau à s'écouler à travers une série de dépressions et de ravins.

La configuration du bassin versant, qui est la zone géographique drainée par un réseau hydrographique, détermine le flux global de l'eau. Nous avons tracé le réseau hydrographique à l'aide de ArcGis 10.5 qui est une plateforme de systèmes d'information géographique (SIG) développée par Esri (Environmental Systems Research Institute) et qui nous a permis de créer, gérer, analyser et visualiser des données spatiales et géographiques (fig.II.4 et fig.II.5).

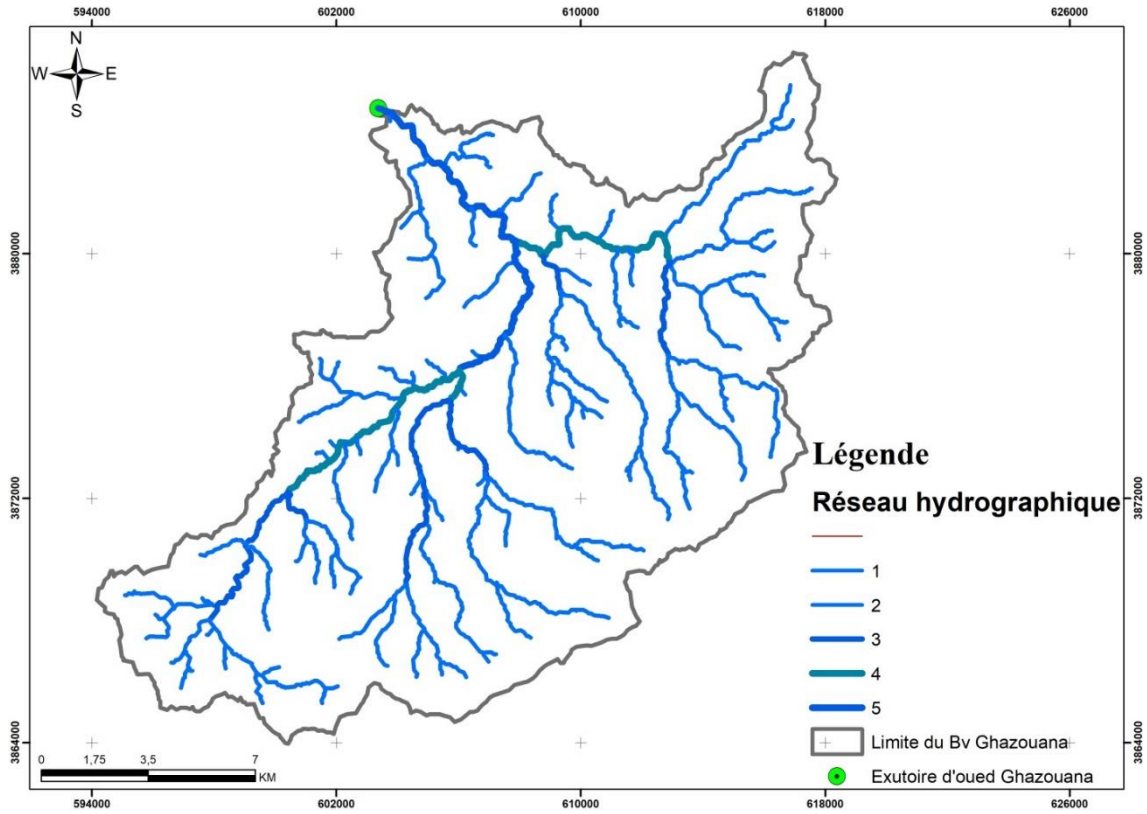


Figure II.4 : Réseau hydrographique du bassin d'oued Ghazouana

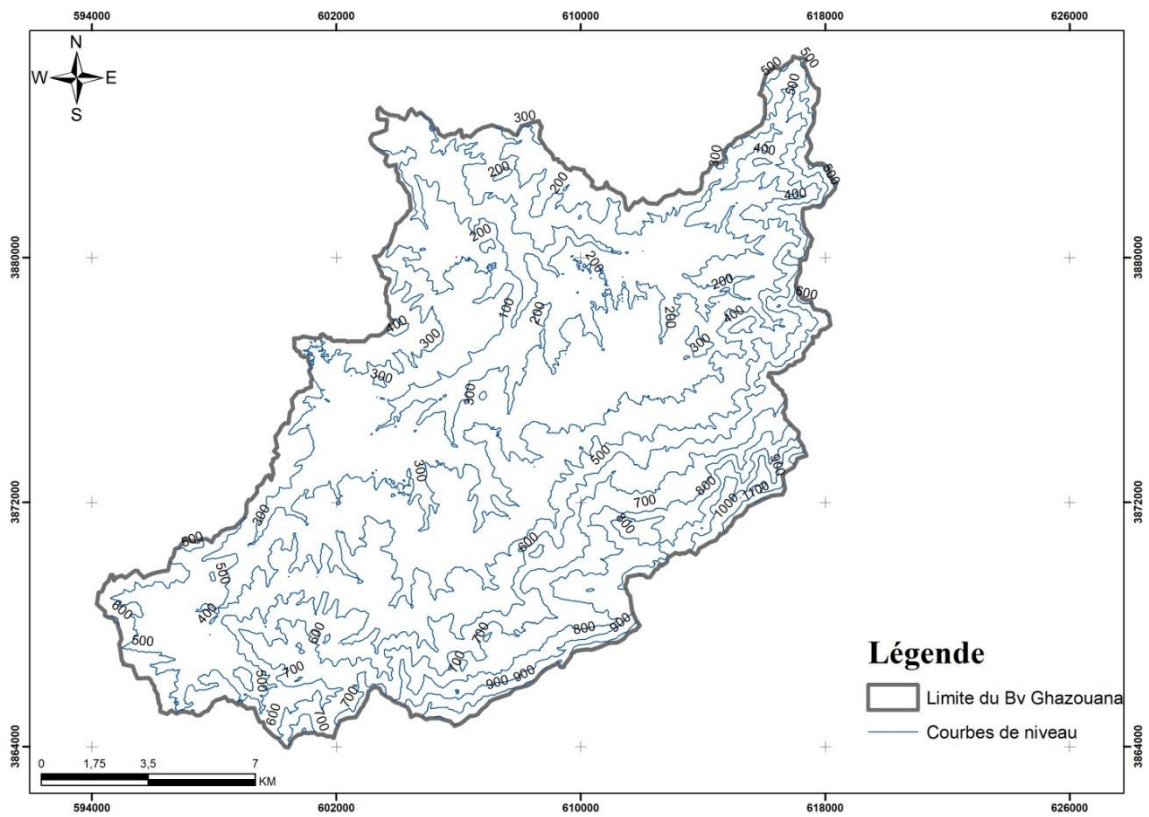


Figure II.5: Répartition altimétrique du bassin versant d'oued Ghazouana

II.4.4.3. Hypsométrie du bassin

La segmentation du bassin versant en différentes tranches d'altitude revêt une importance dans les études hydrologiques, étant donné que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont impactés par l'altitude. Pour ce faire une approche planimétrique des surfaces entre les courbes de niveau a été utilisée pour notre bassin versant à l'aide de ArcGis.

La figure II.6, met en évidence la répartition des hautes et basses altitudes dans le bassin de l'oued Ghazouana et donne une idée détaillée sur la topographie de la région. Les couleurs claires correspondant aux basses altitudes signalent la présence de plaines, par contre à partir de 200m d'altitude, le relief devient plus accentué indiquant la présence de montagnes.

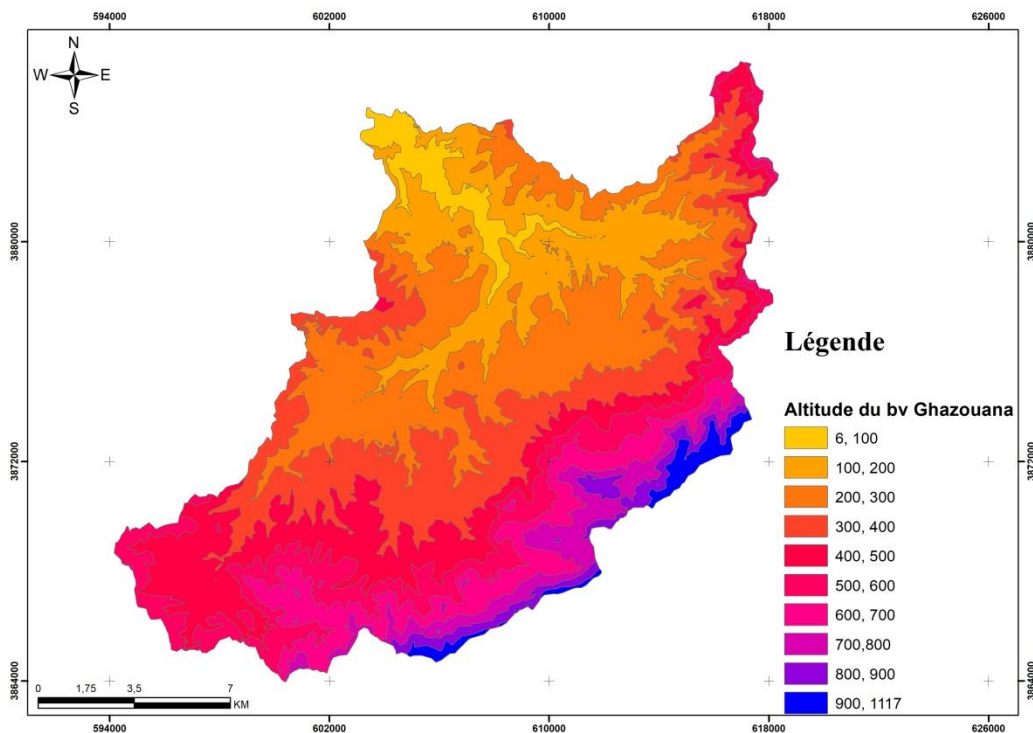


Figure II.6: Carte hypsométrique du bassin de l'oued Ghazouana

La courbe hypsométrique représente la répartition de la surface du bassin versant en fonction de son altitude (tab. II.5, et fig.II.7). Elle porte en abscisses le pourcentage de surface du bassin qui se trouve au-dessous de l'altitude représentée en ordonnée Elle exprime ainsi la superficie du bassin ou le pourcentage de la superficie, au-delà d'une certaine altitude. Les courbes hypsométriques demeurent un outil pratique pour comparer plusieurs bassins entre eux ou les diverses sections d'un seul bassin.

Tableau II.5: Répartition du bassin versant d'oued Ghazouana en tranches d'altitudes

Altitudes (m)	Superficies Partielles		Superficies cumulées	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
1117 - 900	4,42	1,55	4,42	1,55
900 - 800	6,63	2,33	11,05	3,88
800 - 700	12,55	4,4	23,60	8,28
700 - 600	21,5	7,55	45,10	15,83
600 - 500	29,69	10,42	74,79	26,25
500 - 400	41,5	14,57	116,29	40,82
400 - 300	52,42	18,39	168,71	59,21
300 - 200	68,77	24,13	237,48	83,34
200 - 100	38,12	13,38	275,60	96,72
100 - 6	9,86	3,46	285,46	100

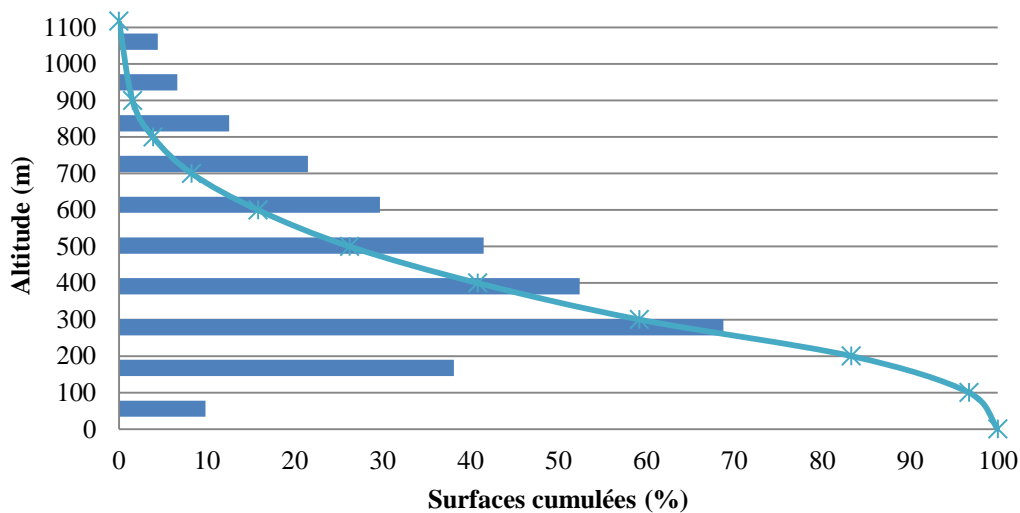


Figure II.7 : Courbe hypsométrique et histogramme des fréquences altimétrique de l'oued Ghazouana

Le tableau II.6, résume les résultats relatifs à l'étude morphométrique du bassin versant de l'oued Ghazouana :

Tableau II.6 : Récapitulatif des résultats des caractéristiques morphométriques du bassin versant d'oued Ghazouana

Désignation	Symbole	Unité	Valeur
Surface de bassin versant	S	Km ²	285
Périmètre	P	Km	102
Altitude max	H max	M	1117
Altitude Min	HMIN	M	6
Indice de compacité	Kc	-	1,69
H5%	H5%	M	55,85
H95%	H95%	M	1061,15
Pente moyenne	Imoy	%	23%
Indice de pente global	Ig	%	22,53
Longueur du rectangle équivalent	L	Km	44,61
Longueur du cours d'eau principal	Lp	Km	13,8
Densité de drainage	Dd	Km/Km ²	0,87
Dénivelée spécifique	Ds	-	380,43
Fréquence des thalwegs élémentaires	F	-	0,97
Coefficient de torrentialité	Ct	-	0,85
Temps de concentration	Tc	Heure	2,98

Selon la classification de l'O.R.S.T.O.M relative à la dénivelée spécifique et à l'indice de pente global, le relief est fort. Cela confirme la lithologie et la tectonique qui ont fragmenté par endroits le terrain devenu accidentés vers le Sud du bassin.

Un temps de concentration de 2,98 heures signifie qu'il faut environ 3 heures pour que l'eau traverse le bassin versant du point le plus éloigné jusqu'à l'exutoire. Ce temps est assez court, ce qui indique que le bassin versant répond rapidement aux précipitations. Cela peut conduire à des crues plus soudaines en cas de fortes pluies. Cette caractéristique est importante pour la gestion des risques d'inondation, car elle nécessite des mesures de prévision et de gestion rapide.

Un coefficient de torrentialité de 0,85 est relativement élevé, ce qui suggère que le bassin versant a une forte tendance à produire des écoulements rapides. Ce coefficient élevé implique également un risque accru d'érosion du sol et de transport de sédiments. Les sols dans ce bassin peuvent être rapidement érodés lors de fortes pluies, entraînant des débris et des sédiments en aval. Des précipitations intenses et fréquentes augmentent le risque de crue.

II.5. Conclusion

Le diagnostic physico-géographique et la connaissance du bassin versant sont essentiels pour caractériser les principaux facteurs naturels influençant l'alimentation en eau et l'écoulement, notamment les facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques. Leur interaction joue un rôle important dans le comportement hydrologique des bassins.

La forme allongée et le temps de concentration relativement court nécessitent des mesures de gestion des inondations, comme des systèmes de rétention d'eau et des barrages, pour atténuer les risques de crues soudaines.



Chapitre 03 :
Etude hydro-climatique

III. Introduction

L'étude hydroclimatique joue un rôle important dans la gestion durable des ressources en eau et l'atténuation des risques hydrologiques dans la région. Situé dans une zone caractérisée par des reliefs diversifiés et un climat variable, le bassin versant de Ghezouana présente des défis uniques en termes de gestion des précipitations, des écoulements de surface et des inondations potentielles. Dans ce chapitre nous visons à comprendre les interactions entre les facteurs climatiques et hydrologiques qui façonnent le comportement hydrologique du bassin.

III.1. Caractéristique des stations retenues pour l'étude

Afin de mieux appréhender les caractéristiques hydro-climatiques de la zone d'étude, nous avons choisi de nous concentrer sur des stations situées dans le bassin versant. (tableau III.1 et fig.III.1).

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

Nom de la station		Ghazaouet	Tleta
Code station		040107	040101
Coordonnées	Latitude	35.098844° N	35.076089°N
	Longitude	-1.863899° E	-1.838837°E
	Altitude (m)	6	76
Paramètres mesurés		P (mm), T (°C)	Q (m ³ /s)
Période d'enregistrement		P : (1971/1972 – 2022/2023) T : (1982/1983 – 2022/2023)	(1970-1971 à 2019-2020)



Figure III.1: Présentation des stations de mesure au niveau du bassin (tiré de la carte du réseau hydro-climatologique et la surveillance de la qualité des eaux ANRH, 2005).

III.2. Etude des précipitations

III.2.1. Précipitations moyennes annuelles

Nous avons reporté sur le tableau III.2, les précipitations moyennes annuelles au niveau de la station de Ghazaouet enregistrées durant la période 1971/72 – 2022/2023.

Le régime pluviométrique interannuel est très irrégulier d'une année à une autre, sur une période d'étude de 52 ans (tabl.III.2&fig.III.2), 29 années ont enregistré des hauteurs de pluie supérieures à la moyenne de l'ordre de 365,5mm. L'année 1972/1973 étant la plus humide avec 630,6 mm et l'année 2020/2021 la plus sèche avec un minimum de 184,1mm.

Tableau III.2: Précipitations moyennes annuelles à la station de Ghazaouet
(1971/72 – 2022/2023)

Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)	Années	P (mm)
1971/1972	564.8	1984/1985	277.4	1997/1998	291.0	2010/2011	353.6
1972/1973	630.6	1985/1986	340.1	1998/1999	317.4	2011/2012	371.8
1973/1974	606.7	1986/1987	494.3	1999/2000	287.5	2012/2013	559.3
1974/1975	513.8	1987/1988	241.2	2000/2001	294.6	2013/2014	419.1
1975/1976	450.2	1988/1989	343.5	2001/2002	447.7	2014/2015	344.1
1976/1977	385.5	1989/1990	343.3	2002/2003	341.4	2015/2016	261.3
1977/1978	395.2	1990/1991	412.2	2003/2004	477.9	2016/2017	251.2
1978/1979	319.7	1991/1992	443.1	2004/2005	283.0	2017/2018	367.0
1979/1980	518.8	1992/1993	372.1	2005/2006	372.4	2018/2019	216.4
1980/1981	455.7	1993/1994	315.1	2006/2007	242.5	2019/2020	295.4
1981/1982	259.8	1994/1995	428.1	2007/2008	327.0	2020/2021	184.1
1982/1983	203.3	1995/1996	288.6	2008/2009	620.1	2021/2022	229.0
1983/1984	311.6	1996/1997	321.0	2009/2010	399.7	2022/2023	215.9
P_{moyenne} = 365.5 mm							

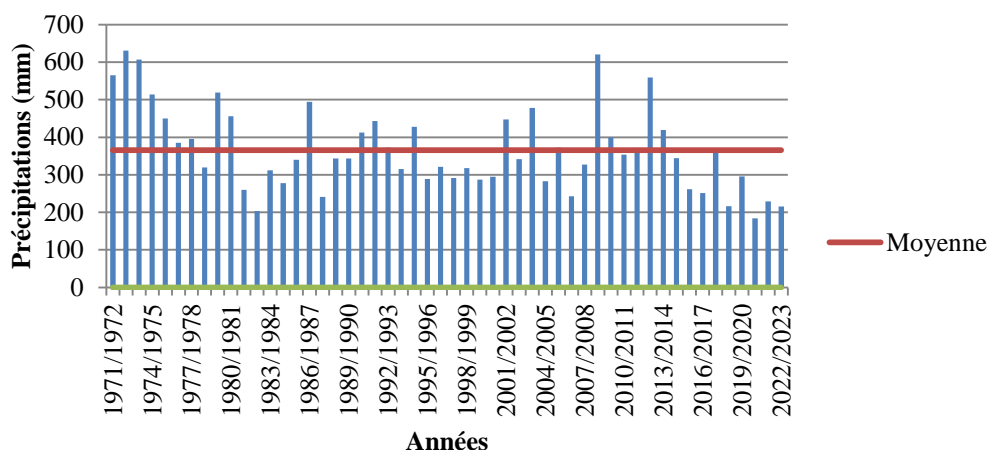


Figure III.2: Variations interannuelles des précipitations à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

III.2.2. Précipitations moyennes mensuelles

Les données des précipitations moyennes mensuelles enregistrées à la station de Ghazaouet durant la période (1971/72- 2022/2023) sont reportées sur le tableau III.3:

Tableau III.3: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

Années	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy (mm)	15.2	31.0	54.3	47.6	47.1	47.4	49.4	38.1	25.7	5.2	0.9	3.5

La figure (III.3) ci-dessous montre que le mois de Novembre est le plus pluvieux et Juillet le plus sec.

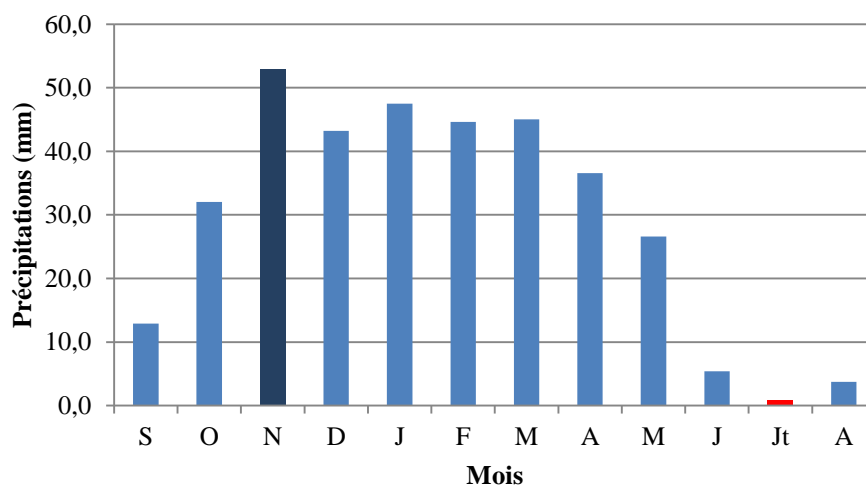


Figure 1: Précipitations moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

III.2.3. Précipitations moyennes saisonnières

Les quatre saisons de l'année avec leurs précipitations sont reportées au tableau III.4.

Tableau III.4: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté			
	Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Station de Ghazaouet (040107)	Moyenne mensuelle (mm)	15.2	31.0	54.3	47.6	47.1	47.4	49.4	38.1	25.7	5.2	0.9	3.5
	Moyenne saisonnière (mm)	100,5			142,1			113,2			9,6		

L'analyse de la figure III.4 montre que l'Hiver est la saison la plus arrosée, suivie du Printemps et de l'Automne. L'Eté est marqué par sa sécheresse avec 9.6mm.

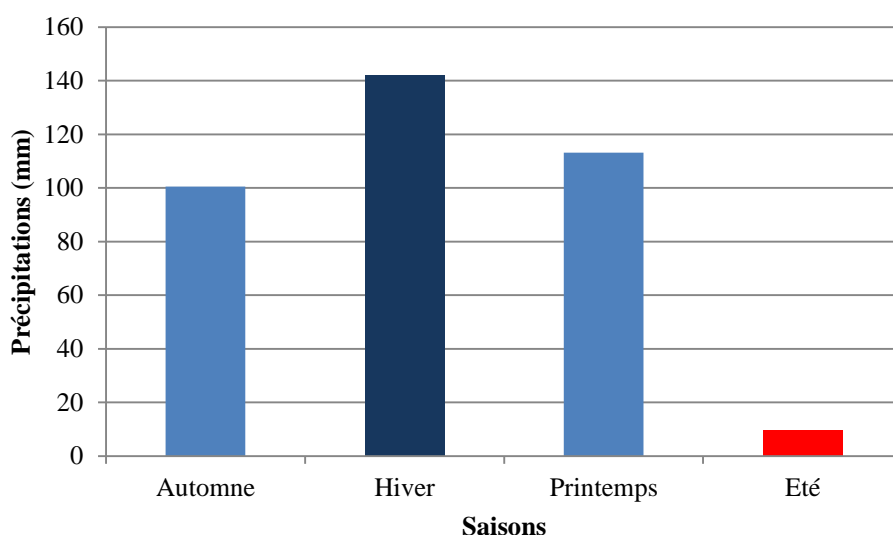


Figure 2: Précipitations moyennes saisonnières à la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

III.2. 4. Analyse statistique des précipitations

L'analyse statistique des précipitations vise à déterminer les régimes pluviométriques en utilisant des valeurs spécifiques représentatives. Pour ce faire, nous avons utilisé le code de calcul Hyfran 1.1. (Hydrological Frequency Analysis) qui est un logiciel spécialisé dans l'analyse statistique des données hydrologiques et climatiques. Il offre une suite d'outils pour l'analyse des fréquences, les lois d'ajustement et l'estimation des probabilités associées aux événements hydrologiques extrêmes.

Les résultats de calcul des paramètres de position et de dispersion sont représentés dans le tableau (III.5).

Tableau III.5: Paramètres de position et de dispersion des précipitations

	Paramètres	Formules	Valeurs
Paramètres de position	Moyenne (mm)	$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a P_i$	365.5
Paramètres de dispersion	Variance	$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^a (P_i^2 - \bar{P}^2)$	12376.56
	Ecart-type	$\delta = \sqrt{\sigma^2}$	111.25
	Coefficient de variation	$C_v = \frac{\sigma}{\bar{P}}$	0.31

avec :

N : Effectif (nombre d'années),

P_i : Valeurs des précipitations de chaque année.

Le coefficient de variation de la série étant inférieure à 0,5, on peut donc ajuster la série des précipitations à une loi symétrique dont la loi normale.

A. Test graphique

La distribution des précipitations à la loi normale en figure III.5 fournit un alignement de points acceptables que l'on peut représenter par une droite (la droite d'Henry) d'équation :

$$P = \sigma \cdot u + \bar{P} \text{ (Eq. III.1)}$$

où :

σ = Ecart-type.

\bar{P} = Moyenne des précipitations annuelles

u : Variable réduite de Gauss.

L'équation d'ajustement devient alors : $P = 111.25u + 365.5$

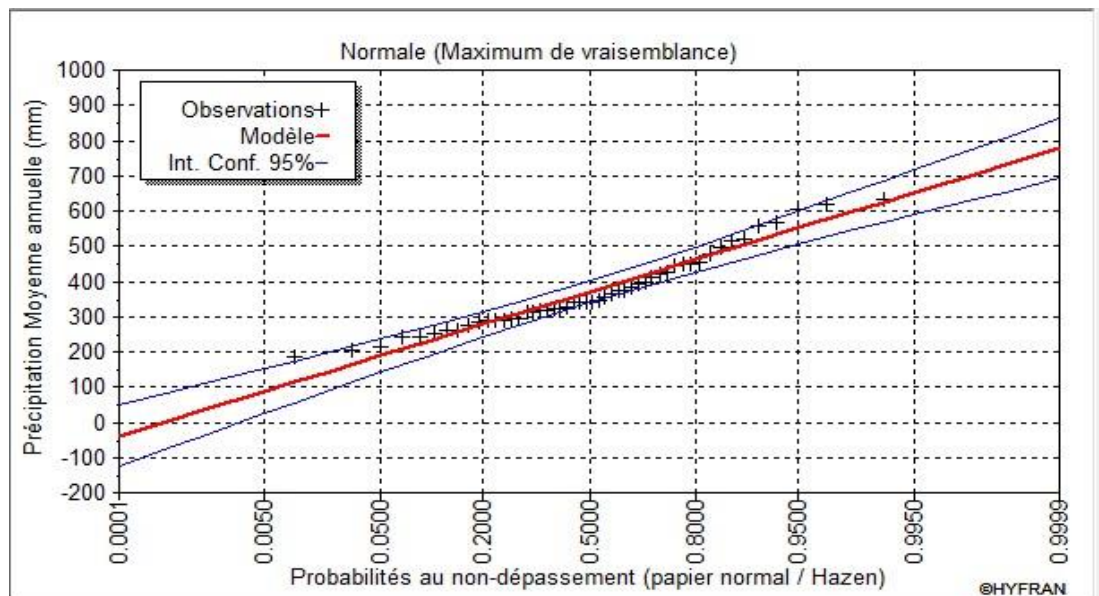


Figure III.5 : Ajustement graphique des précipitations annuelles à la loi de distribution normale. Station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

B. Test numérique

les résultats du calcul du khi-deux (χ^2) sur le tableau III.5, montre que le $\chi^2_{calculé}$ de 3.784 est inférieur au $\chi^2_{tabulé}$ égal à 10.48 pour un ddl=3, et α au seuil de 5%. L'ajustement à la loi normale est donc acceptable.

Tableau III.6: Résultat d'adéquation de loi normale par le Test χ^2

N	Limites de classes	$P=\sum(Np_i / N)$	Effectifs observé N_i	Effectifs théorique: Np_i	$(N_i-Np_i)^2/Np_i$
1	$P \leq 251$	0,13	6	6,66	0,065
2	$251 < p \leq 288$	0,27	5	6,66	0,414
3	$288 < P \leq 312$	0,4	5	6,66	0,414
4	$312 < P \leq 322$	0,53	5	6,66	0,414
5	$322 < P \leq 344$	0,67	5	6,66	0,414
6	$344 < P \leq 372$	0,8	5	6,66	0,414
7	$372 < P \leq 419$	0,93	5	6,66	0,414
8	$419 < P \leq 478$	1,07	5	6,66	0,414
9	$478 < P \leq 631$	1,2	9	6,66	0,822
$\chi^2_{calculé}$					3,784
$\chi^2_{tabulé}$					10,48

C. Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée

La distribution des précipitations annuelles suit la loi normale d'équation $P = 111.25u + 365.5$, aussi nous calculons les précipitations pour différentes périodes de retour (tableau III.7),

Tableau III.7: Calcul des précipitations pour une période de récurrence donnée avec la loi normale pour la station de Ghazaouet (1971/72- 2022/2023)

	Précipitations	P (mm)
Période humide	Précipitations décennales (u=1.28)	507.9
	Précipitations de 50 ans (u=2,05)	593.6
	Précipitations centenaires (u= 2,33)	624.7
	Précipitations millénaires (u=3.29)	731.5
Période sèche	Précipitations décennales (u= -1.28)	223.1
	Précipitations de 50 ans (u= -2.05)	137.4
	Précipitations centenaires (u= -2,33)	106.3
	Précipitations millénaires (u= -3.29)	-

III.2.5. Etude des apports à Ghazaouet au niveau de l'exutoire d'oued Ghezouana

En l'absence de données hydrométriques à l'exutoire du bassin, l'apport moyen interannuel sera estimé à l'aide de formules empiriques. Il existe en Algérie de nombreuses formules empiriques d'estimation des apports, quelques-unes d'entre elles sont employées pour approcher au mieux la valeur de l'apport moyen interannuel.

a- Formule de Dery

$$A_{\text{moy}} = M_0 \cdot A \cdot k \quad (\text{Eq. III.2})$$

A_{moy} : Apport moyen annuel (Hm^3)

k : Constante donnée = $31,54 \cdot 10^3$

A : Superficie du bassin versant (Km^2)

M_0 = Module spécifique moyen annuel (L/s/km^2)

$$M_0 = 11.8 \cdot P_{\text{moy}}^{2.82} \quad (\text{Eq. III.3})$$

b- Formule de Medinguer

$$Le = (0.06 - 0.00145 \cdot \sqrt{A}) \cdot P_{\text{moy}} \quad (\text{Eq. III.4})$$

$$A_{\text{moy}} = Le \cdot A \quad (\text{Eq. III.5})$$

A_{moy} : Apport moyen annuel (Hm^3)

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m)

A : Surface du bassin (km^2)

Le : Lame d'eau écoulée (m)

c- Formule de Samie

$$A = Le \cdot S \cdot 10^{-3} \quad (\text{Eq. III.6})$$

$$Le = (293 - 2 \cdot 2\sqrt{S}) \quad (\text{Eq. III.7})$$

P : Pluie moyenne annuelle (m),
 S : Surface du bassin (km²),
 Le : Lamé d'eau écoulée (mm),
 A : Apport liquide annuel moyen (m³).

d- Formule dite algérienne

$$Le = P_0 (1 - 10^{-k \cdot P_0^2}) \quad (\text{Eq. III.8})$$

Le : Lamé d'eau écoulée (m),
 P0 : Pluie moyenne annuelle (m),
 S : Surface du bassin versant (km²),
 k : Coefficient dépendant de la surface du bassin versant

$$k = 0.18 - 0.01 \text{Log}_{10} (S) \quad (\text{Eq. III.9})$$

$$A = Le \cdot S \cdot 10^{-3}$$

e- Formule de l'ANRH

$$A_0 = 0,513 \cdot P_{\text{moy}}^{2,683} \cdot Dd^{0,5} \cdot S^{0,842} (10^6 \text{m}^3) \quad (\text{Eq. III.10})$$

P_{moy} : Pluie moyenne annuelle (m)
 S : Superficie du bassin versant (km²)
 Dd : Densité de drainage (km/km²)
 A₀ : Apport liquide annuel moyenne.

Les résultats de ces différentes méthodes sont consignés dans le tableau Tableau III.8 :

Tableau III.8 : Apports interannuels moyen du bassin versant de Ghazouana (1971/72- 2022/2023)

	Formules	Apport interannuel A ₀ (Hm ³)
Bassin versant de l'oued Ghazouana	Formule de Dery	6.14
	Formule de Medinguer	3.16
	Formule de Samie	7.09
	Formule dite algérienne	0.095
	Formule de l'ANRH	3.73
Moyenne = 4.76		

Remarque : La formule dite algérienne sous-estime le calcul de l'apport elle n'est pas prise en compte dans le calcul de l'Apport moyen du bassin.

III.3. Etude des températures

III.3.1. Variation des températures moyennes interannuelles

La variation des températures moyennes annuelles à la station de Ghazaouet sur la période (1982/1983 – 2022/2023) (fig.III.6) montre une moyenne annuelle de 19,18°C, avec un

maximum enregistré de 20.5 en 2022/2023 et un minimum de 18.1 en 1994/1993. On y constate aussi une tendance vers la hausse d'environ 0.03°C sur la série.

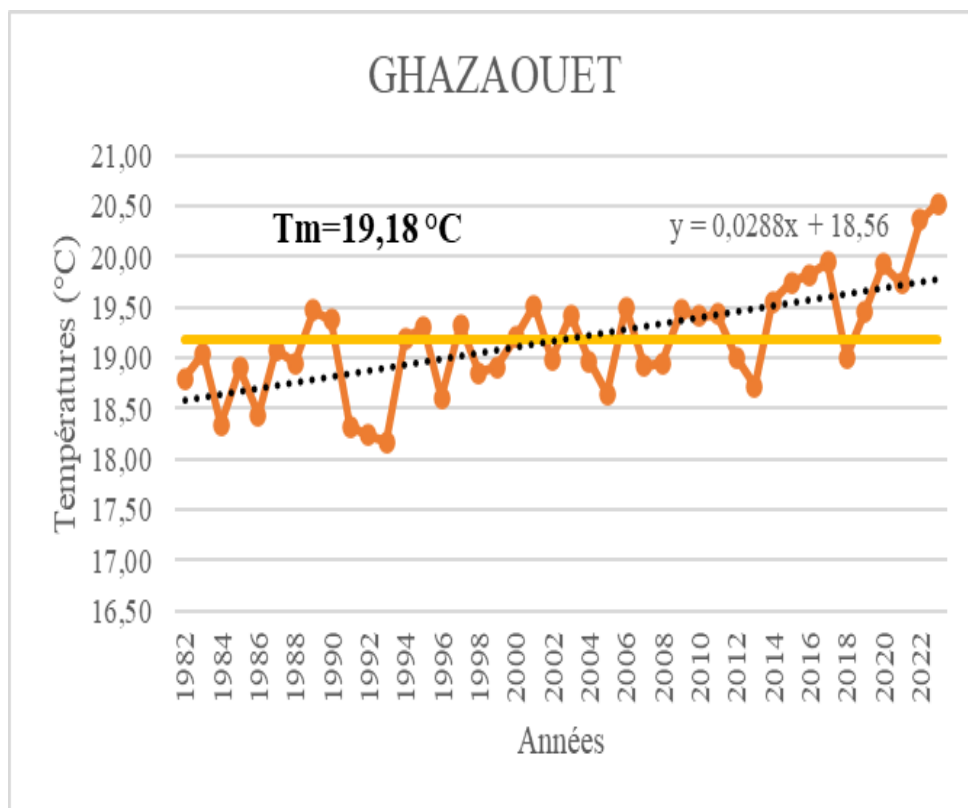


Figure III.6: Variation interannuelle des températures à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023)

III.3.2. Variation des températures moyennes mensuelles

Le tableau des températures moyennes mensuelles III.9 et la figure III.7 montrent que le mois de Janvier est le plus froid et le mois d’Août le plus chaud.

Tableau III.9: Températures moyennes mensuelles à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023)

Années	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Moy (°C)	23,87	20,67	16,28	13,15	11,87	12,96	14,99	16,97	20,42	24,26	27,21	27,51

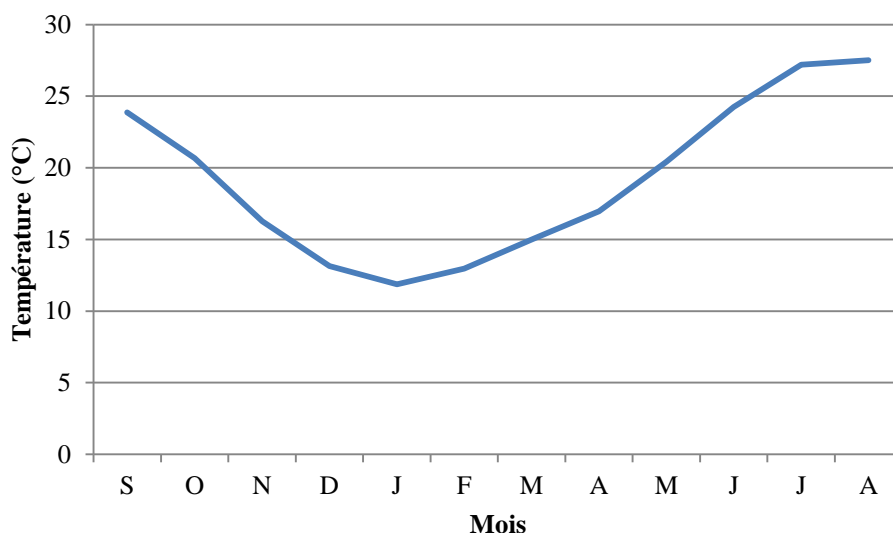


Figure III.7: Variation mensuelle des températures à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023)

III.4. Etude du climat

Afin de caractériser le climat, nous avons utilisé la méthode graphique de Bagnouls et Gaussen et l'indice de De Martonne.

❖ Courbe pluviothermique

Selon Bagnouls et Gaussen (1953), un mois est considéré comme sec lorsque les précipitations sont inférieures à deux fois la température moyenne mensuelle ($P < 2T$). Le diagramme pluviothermique (fig.III.8) illustre clairement deux périodes distinctes : une saison humide de la mi-octobre à la mi-avril et une saison sèche pour le reste de l'année.

Tableau III.10: Moyennes des précipitations et des températures à la station de Ghazaouet (1982/1983 – 2022/2023)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
P(mm)	13,7	28,5	56,7	41,2	49,5	41,2	44,4	29,4	25,5	4,4	0,8	3,7
T (°C)	23,87	20,67	16,28	13,15	11,87	12,96	14,99	16,97	20,42	24,26	27,21	27,51

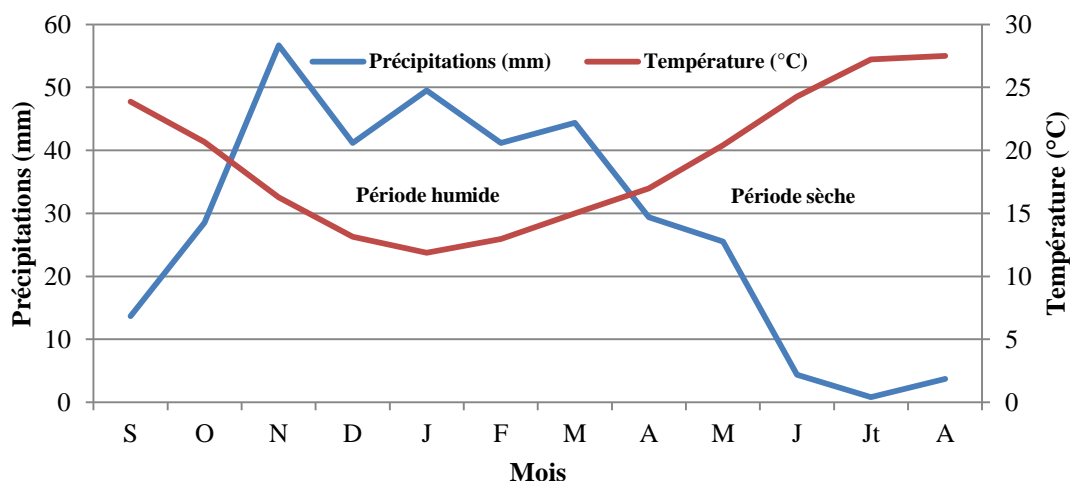


Figure III.8: Courbe pluviothermique (1982/1983 – 2022/2023)

❖ **Indice d’aridité de De. Matonne**

L’indice annuel de De. Martonne est défini par la relation suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (\text{Eq.III.11})$$

P : Précipitations moyennes annuelles = 339,2mm de la série (1982/1982 – 2022/2023)

T : Température moyenne annuelle = 19,18 °C.

I : indice d’aridité = 11,62

Le tableau III.11 donne une classification du type de climat en fonction de son indice d’aridité de De Martonne

Tableau III.11 : Classification du climat suivant l’indice d’aridité de Martonne

Valeur de I	Type de climat	Type de couvert de végétation potentielle
0à5	Hyper aride	Desert absolu
5à10	Aride	Desert
10à20	Semi-aride	Steppe
20à30	Tempéré	Prairie naturelle, forêt
>30	Humide	Forêt

L’indice d’aridité reporté sur l’abaque de De Martonne (figure III.9) traduit un régime semi-aride à écoulement temporaire et à formations herbacées.

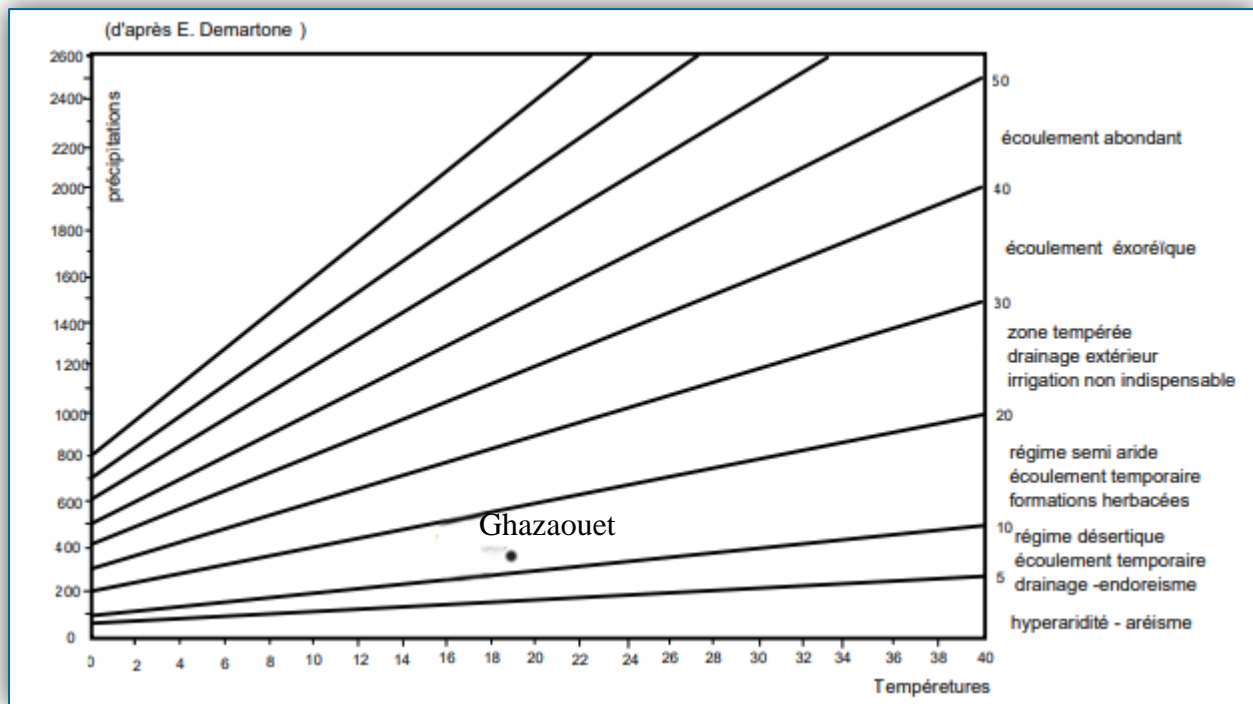


Figure III.9 : Représentation de la station de Ghazaouet sur l'abaque de De Martone

III.5. Etude des débits

Dans cette partie de l'étude, nous disposons de 50 années de données couvrant la période de 1970/1971 à 2019/2020. de débits mesurés à la station (040101) qui contrôle uniquement le sous bassin d'oued Tlata,

III.5.1. Variation interannuelle des modules

Dans cette station, le débit moyen est de 0,24 m³/s. Sur ces 50 années, 17 années présentent un débit supérieur à la moyenne.

Le débit moyen maximal est de l'ordre de 1.27 m³/s, enregistré en 1972-1973. Le débit minimum, quant à lui, n'a pas dépassé 0,01 m³/s, enregistré en 1998-1999 et 2007-2008, ce qui illustre une irrégularité prononcée (tableau III.12 et fig.III.10).

Tableau III.12: Débits moyens annuels à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020)

Années	Q (m ³ /s)	Années	Q (m ³ /s)	Années	Q (m ³ /s)	Années	Q (m ³ /s)
1970/1971	0.26	1983/1984	0.05	1996/1997	0.68	2009/2010	0.07
1971/1972	0.89	1984/1985	0.02	1997/1998	0.08	2010/2011	0.05
1972/1973	1.27	1985/1986	0.35	1998/1999	0.01	2011/2012	0.13
1973/1974	1.22	1986/1987	0.29	1999/2000	0.08	2012/2013	0.18
1974/1975	0.74	1987/1988	0.20	2000/2001	0.02	2013/2014	0.14
1975/1976	0.52	1988/1989	0.24	2001/2002	0.08	2014/2015	0.10
1976/1977	0.26	1989/1990	0.38	2002/2003	0.02	2015/2016	0.07
1977/1978	0.20	1990/1991	0.41	2003/2004	0.04	2016/2017	0.10
1978/1979	0.11	1991/1992	0.21	2004/2005	0.02	2017/2018	0.09
1979/1980	0.52	1992/1993	0.32	2005/2006	0.02	2018/2019	0.07
1980/1981	0.65	1993/1994	0.26	2006/2007	0.03	2019/2020	0.07
1981/1982	0.11	1994/1995	0.09	2007/2008	0.01	$Q_{\text{moyen}} = 0.24 \text{ m}^3/\text{s}$	
1982/1983	0.03	1995/1996	0.02	2008/2009	0.02		

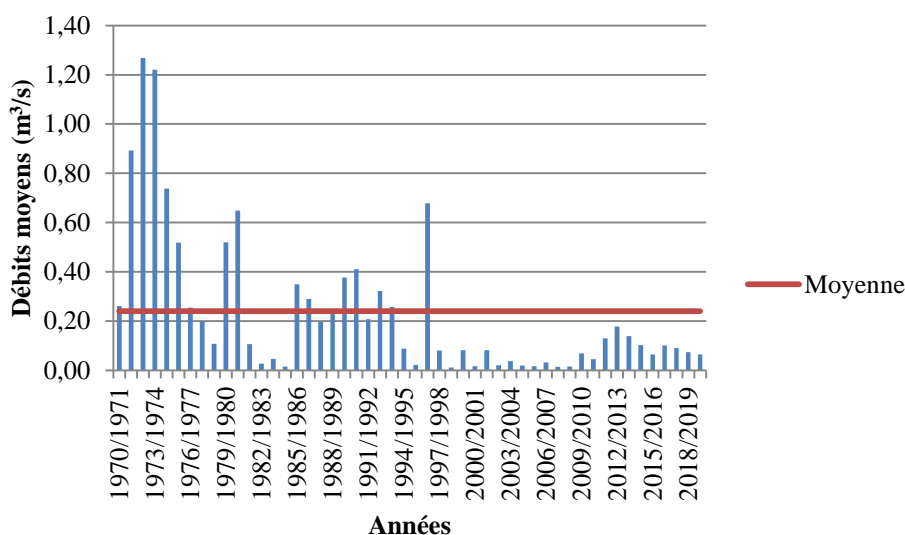


Figure III.10: Débit moyens annuels à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020)

III.5.2. Variation des débits moyens mensuels

Le tableau III.13 présente les valeurs moyennes mensuelles des débits à la station de Tleta durant la période (1970/1971 – 2019/2020).

Tableau III.13 : Valeurs mensuelles des débits (1970/1971 – 2019/2020)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	Jt	A
Q (m ³ /s)	0.08	0.11	0.18	0.36	0.29	0.36	0.54	0.43	0.27	0.09	0.06	0.05

L'analyse de la répartition des débits mensuels pour la période (1970/1971 – 2019/2020) (figure III.10), révèle un maximum de 0,54 m³/s en Mars et un minimum de 0,05 m³/s en Août.

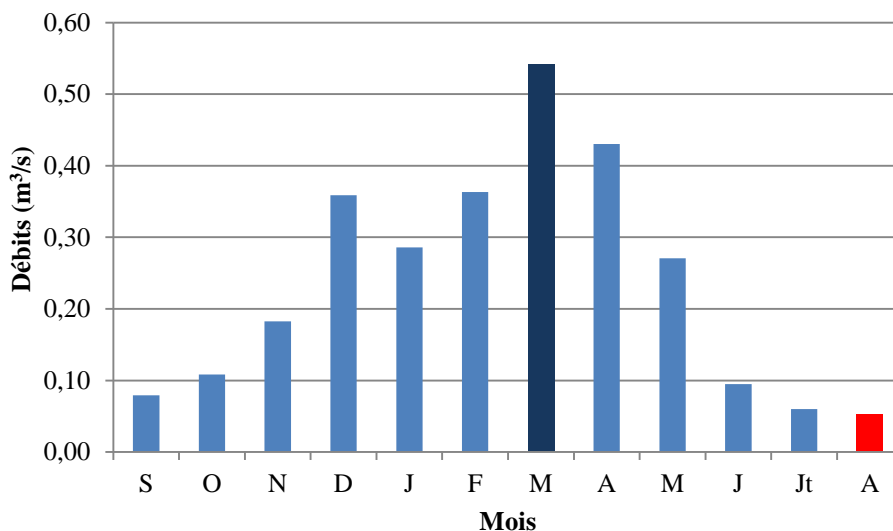


Figure III.11: Débit moyens mensuels à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020)

III.5.3. Variation des débits moyens saisonniers

Les quatre saisons de l’année et leurs débits équivalents sont donnés au tableau suivant :

Tableau III.14: Répartition des débits saisonniers (1970/1971 – 2019/2020)

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	JT	A
Moyenne (m³/s)	0.12			0.34			0.41			0.07		
	Sèche			Humide						Sèche		

D’après la figure III.12, le printemps accuse le débit le plus fort, contrairement à l’Eté et l’Automne qui enregistrent des débits faibles.

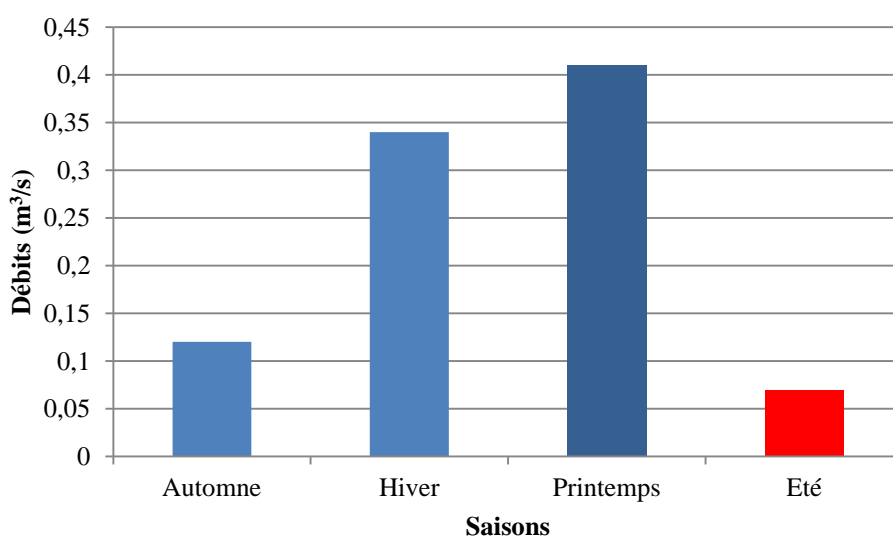


Figure III.12: Débit moyens saisonniers à la station de Tleta (1970/1971 – 2019/2020)

III.5.4. Corrélation pluie – débit au pas de temps annuel

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'influence des précipitations sur les débits des cours d'eau afin d'approfondir la compréhension des mécanismes en jeu. Nous analyserons les interactions entre les précipitations et les débits au pas de temps annuel pour comprendre l'impact de l'évaporation et de l'infiltration sur les débits observés à l'exutoire.

L'examen de la figure III.12, montre un coefficient de détermination de 0,504 qui indique que 50,4 % de la variance observée dans les débits peut être expliquée par les variations des précipitations. Cette valeur signifie qu'il existe une relation modérée entre les deux variables, mais d'autres facteurs non pris en compte dans ce modèle influencent également les débits comme l'évapotranspiration, la forme du bassin, la géologie, la topographie et la végétation.

La forme exponentielle de l'équation suggère que les débits augmentent de manière non linéaire avec l'augmentation des précipitations. En d'autres termes, de petites augmentations de précipitations peuvent entraîner de faibles changements dans les débits, tandis que des augmentations plus importantes de précipitations peuvent provoquer des augmentations disproportionnées des débits. Le modèle exponentiel indique une relation où l'impact des précipitations sur les débits devient plus significatif à mesure que les précipitations augmentent. Cela peut être dû à des seuils de saturation du sol qui après un certain temps ne peut plus absorber l'eau supplémentaire, entraînant un ruissellement plus direct vers l'oued.

L'équation exponentielle est de type $Q = ae^{bP}$ où, Q représente le débit et P les précipitations. e est la base de l'exponentielle, et a et b sont des coefficients déterminés par l'ajustement du modèle.

- Le coefficient a représenté le débit de base lorsque les précipitations sont nulles (s'il est positif, il indique qu'il y a un débit de base même sans pluie).
- Le coefficient b indique le taux de changement du débit par rapport aux précipitations. Un b plus élevé signifie que les débits augmentent plus rapidement avec les précipitations.

Cela reflète la complexité des processus hydrologiques et l'importance des autres facteurs influençant les débits.

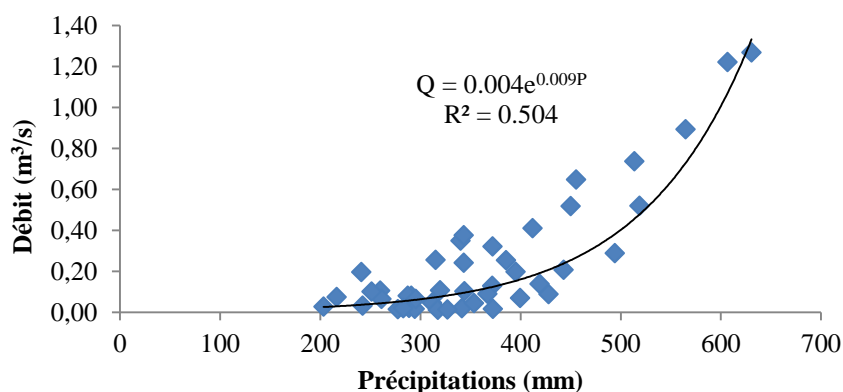


Figure III.13:Corrélation entre les précipitations de Ghazaouet et les débits moyens annuels à la station de de Tleta (1971/1972 – 2019/2020)

III.6. Conclusion

L'analyse des interactions entre les précipitations et les débits au niveau du bassin versant de Ghazouana révèle plusieurs insights importants sur les mécanismes hydrologiques en jeu. Nous avons pu identifier clairement deux périodes distinctes : une saison humide s'étendant de la mi-octobre à la mi-avril et une saison sèche pour le reste de l'année. Cette distinction saisonnière est d'une grande importance pour comprendre la variabilité des débits en fonction des précipitations.

La relation exponentielle suggère que les débits augmentent de manière non linéaire avec l'augmentation des précipitations, ce qui est cohérent avec des phénomènes comme la saturation du sol et le ruissellement accru après un certain seuil de précipitations.

Nous comprenons dans ce chapitre que bien que les précipitations jouent un rôle significatif dans la détermination des débits des cours d'eau, une compréhension complète des débits nécessite de prendre en compte une multitude de facteurs hydrologiques et climatiques.

Ces résultats renforcent notre idée d'utiliser des méthodes de cartographie, comme celle illustrée dans la Méthode FIGUSED, pour intégrer les divers paramètres influençant la répartition des flux dans le bassin versant. En employant ces techniques de cartographie, nous pouvons mieux comprendre les dynamiques spatiales des écoulements et identifier les zones à haut risque pour les inondations.

L'utilisation de méthodes de cartographie permettra de visualiser et d'analyser les multiples facteurs hydrologiques et climatiques qui influencent les débits des cours d'eau. Ces cartes peuvent intégrer des données telles que la topographie, l'utilisation des sols, la couverture végétale, et les caractéristiques géologiques, offrant une vue d'ensemble complète du bassin versant.

**Chapitre 04:
Méthode de cartographie du
risque d'inondation**

IV. Introduction

La cartographie repose sur diverses notions géographiques telles que l'inspection des terrains, l'établissement des cartes topographiques et la définition des limites administratives. Pour atteindre des résultats sophistiqués en termes de qualité, fiabilité et crédibilité des données, il est essentiel d'utiliser des outils avancés. Aujourd'hui, ces objectifs sont principalement atteints grâce aux systèmes d'information géographique (SIG), à la télédétection et au concept émergent de l'apprentissage automatique. L'intégration de ces technologies permet d'améliorer le traitement des données et d'optimiser la prise de décision.

En outre, les progrès récents dans le domaine de l'intelligence artificielle et du big data offrent des opportunités inédites pour l'analyse spatiale. Les techniques de machine learning peuvent désormais être appliquées pour détecter des tendances complexes, prévoir des phénomènes géographiques et automatiser la classification des données. Ces innovations contribuent à une meilleure gestion des ressources naturelles, à une planification urbaine plus efficace et à une réponse plus rapide et précise aux catastrophes naturelles.

IV.1. Lien entre la modélisation et la cartographie

Il existe une relation étroite entre la modélisation et la cartographie. Ces deux domaines se complètent et se renforcent mutuellement de plusieurs façons :

IV.1.1. Visualisation des Modèles

- Cartographie : La cartographie permet de visualiser les résultats des modèles géographiques, environnementaux ou urbains de manière claire et compréhensible. Les cartes sont des outils puissants pour représenter spatialement des données et des simulations issues de modèles.
- Modélisation : Les modèles utilisent souvent des cartes comme base de données pour représenter des phénomènes complexes dans un espace géographique. Par exemple, des modèles climatiques peuvent utiliser des cartes de température et de précipitations pour simuler les conditions futures.

IV.1.2. Analyse Spatiale

- Cartographie : Elle fournit le contexte spatial nécessaire pour analyser les résultats des modèles, permettant de voir comment les données varient en fonction de l'emplacement.
- Modélisation : Les modèles intègrent des données cartographiques pour analyser les relations spatiales et les influences géographiques, comme dans l'évaluation de l'impact environnemental ou la planification urbaine.

IV.1.3. Prédiction et Simulation

- Cartographie : Les cartes peuvent être utilisées pour présenter des scénarios futurs basés sur des prédictions de modèles, comme la propagation d'une pollution ou l'expansion urbaine.

- Modélisation : La modélisation permet de créer des simulations qui peuvent ensuite être cartographiées pour visualiser les résultats prévus dans un format spatial.

IV.1.4. Intégration des Données

- Cartographie : Elle facilite l'intégration de différentes sources de données spatiales, ce qui est intéressant pour créer des modèles précis et fiables.
- Modélisation : Les modèles utilisent ces données intégrées pour fournir des analyses plus complètes et des prédictions plus exactes.

IV.1.5. Aide à la Décision

- Cartographie : Les cartes issues des modèles aident les décideurs à comprendre les implications spatiales de leurs choix et à communiquer ces implications de manière efficace.
- Modélisation : Elle offre les bases analytiques nécessaires pour justifier les décisions prises en matière d'aménagement du territoire, de gestion des ressources naturelles, ou de préparation aux catastrophes.

La modélisation et la cartographie sont intrinsèquement liées, chaque domaine enrichissant l'autre par des données, des analyses et des visualisations, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et gestion des phénomènes géographiques.

IV.2. Modélisation : Concept et importance

La modélisation est un processus scientifique et technique qui consiste à créer des représentations simplifiées et abstraites de phénomènes réels pour les étudier et les comprendre. Ces représentations, appelées modèles, peuvent prendre diverses formes : mathématiques, physiques, informatiques ou conceptuelles. Le but de la modélisation est de capturer les éléments essentiels du phénomène étudié pour en prévoir le comportement, en analyser les causes et les effets, et tester des hypothèses dans un environnement contrôlé.

Les modèles permettent de simuler des scénarios, d'évaluer des hypothèses et de prédire des comportements futurs. Ils sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la science, l'ingénierie, l'économie, l'écologie et la gestion des ressources naturelles. La modélisation est une étape clé dans la recherche scientifique, le développement technologique et la prise de décision stratégique.

La modélisation, c'est l'ensemble du processus qui permet l'intervention des mathématiques dans une science basée sur l'expérience ou l'observation. Pour aboutir à un modèle mathématique nous devons passer par plusieurs étapes : Nous établissons tout d'abord des hypothèses sur les phénomènes étudiés, les hypothèses sont traduites mathématiquement en un modèle puis on étudie le modèle mathématique pour en extraire des conséquences qualitatives ou quantitatives et on fait des prévisions. On compare les prévisions aux réalités expérimentales. À la fin, Il est censé de revenir éventuellement sur les hypothèses pour modifier le modèle (Ducrot, 2008).

IV.2.1. Application de la modélisation dans le domaine de l'hydraulique

Les applications de la modélisation sont variées et comprennent notamment :

- Modélisation des systèmes hydrauliques,
- Optimisation et la conception du fonctionnement des ouvrages hydrauliques,
- Délimitation des zones inondables,
- Gestion en temps réel et les stratégies de contrôle,
- Analyse et le traitement des données pluviométriques,
- Modélisation du transport solide.

IV.3. Gestion du risque lié aux inondations

La gestion du risque lié aux inondations se décompose en trois volets : la prévention et l'atténuation, la gestion de crise, et le retour d'expérience.

Prévention et Atténuation : Ce volet repose sur la connaissance et la localisation des zones à risque et vise à réduire les vulnérabilités humaines et économiques. Il s'agit de protéger les infrastructures existantes, d'informer la population et de limiter l'implantation de biens et de personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. Cette phase est basée sur l'analyse des crues potentielles ou passées, ce qui permet de mieux comprendre les phénomènes physiques et de limiter le risque à long terme (Hostache et al., 2005).

Gestion de Crise : Ce volet concerne les actions à entreprendre pendant une inondation, y compris l'alerte, l'évacuation, le secours et la coordination des interventions. Il est d'une grande importance pour minimiser les impacts immédiats sur les populations et les infrastructures. L'objectif est de déployer rapidement les moyens d'actions et de secours les plus appropriés et ainsi de réduire les conséquences humaines et matérielles du sinistre (Henry, 2004).

Retour d'Expérience : Après une inondation, ce volet consiste à analyser les événements survenus pour en tirer des leçons et améliorer les stratégies de prévention et de gestion de crise. Il s'appuie sur l'évaluation des réponses apportées, l'identification des points faibles et la mise en œuvre de mesures correctives (Hostache et al., 2009).

IV.4. Outils de cartographie du risque d'inondation

La cartographie de l'aléa inondation en cours repose sur trois catégories d'outils : les relevés sur le terrain, la modélisation hydraulique et la télédétection. Bien que chacun de ces outils présente des avantages spécifiques, ils possèdent également des limites importantes qui peuvent réduire leur utilité pour caractériser l'aléa inondation dans un contexte de gestion de crise.

IV.4.1. Relevés sur le terrain

L'acquisition de données directement sur le terrain est une méthode couramment utilisée pour étudier les phénomènes spatiaux et environnementaux. Cependant, elle n'est pas adaptée

à la caractérisation de l'aléa inondation en phase de gestion de crise. En effet, l'échantillonnage spatial réalisé sur le terrain est souvent limité et mal réparti, ce qui empêche d'obtenir des informations précises sur les limites des zones inondées et sur les hauteurs de submersion à chaque point de ces zones (Townsend et al., 1998).

À cela s'ajoutent souvent des problèmes logistiques pour accéder aux zones inondées ainsi que des coûts élevés pour l'acquisition des données. De plus, et c'est une limite importante, le temps nécessaire pour recueillir les données, les traiter et produire une carte de l'aléa inondation est souvent trop long pour être adapté à la gestion de crise, surtout lorsque l'étendue des zones touchées est importante (Hess et al., 1995; Lang et al., 2008).

IV.4.2. Modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques d'une rivière lors d'une crue, telles que le débit, la hauteur d'eau, les surfaces inondées et les vitesses de l'eau (Hostache et al., 2005; L'Homme, 2006).

Cet outil est couramment utilisé dans la gestion des inondations, tant pour la prévision que pour la prévention et la gestion de crise. Toutefois, les modèles hydrauliques ne sont qu'une représentation simplifiée d'un système réel complexe et nécessitent une compréhension approfondie et une intégration précise de chaque processus du cycle de l'eau, en s'appuyant sur des données spécifiques (Estupina, 2004).

Cela nécessite un volume important de données, qui peuvent être difficiles et coûteuses à obtenir en raison du manque inévitable de stations de mesure, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain. Par conséquent, ces modèles comportent une part d'incertitude. Cette incertitude, ainsi que le manque de données nécessaires à leur fonctionnement optimal, peuvent toutefois être réduits par l'intégration de données provenant d'autres sources que les relevés manuels sur le terrain ou les stations de mesure automatisées. En effet, les données issues de la télédétection sont parfois utilisées pour le calage et la validation des modèles hydrauliques (Giustarini et al., 2011; Mason et al., 2012b; Matgen et al., 2007).

IV.4.3. Télédétection

Différents outils de télédétection peuvent être utilisés pour caractériser l'aléa inondation. La photographie aérienne, qui fournit des images haute résolution des zones inondées, est considérée comme une source de données de qualité pour la délimitation et l'analyse de ces zones (Schumann et al., 2009).

Cependant, l'utilisation de la photographie aérienne pour générer des cartes de l'aléa inondation est souvent limitée par le coût élevé des acquisitions aéroportées et par le temps nécessaire à l'acquisition des données, qui est souvent trop long en cas d'inondations étendues (Mallinis et al., 2011). De plus, les conditions météorologiques peuvent empêcher le survol de la zone inondée, et il est difficile de détecter les zones inondées sous un couvert végétal dense ou à travers un épais couvert nuageux. Les capteurs optiques satellitaires opérant dans les bandes du visible et de l'infrarouge (de 0,4 μm à 100 μm) ont permis d'améliorer l'accès aux

données nécessaires à la cartographie des inondations, à un coût moins élevé que celui de la photographie aérienne (Brivio et al., 2002).

La très haute résolution spatiale — de l'ordre du mètre — des capteurs les plus récents permet désormais l'identification précise de la ligne d'eau et des objets urbains et suburbains inondés. Cela représente une avancée significative par rapport aux capteurs optiques plus anciens (Spot, Landsat, etc.) dont la résolution spatiale était souvent de plusieurs dizaines de mètres (Van der Sande et al., 2003). Cependant, l'acquisition de données de qualité est souvent considérablement réduite par la présence récurrente de couvert nuageux durant les inondations, car les longueurs d'onde du visible et de l'infrarouge ne peuvent pas pénétrer les nuages (Horritt et al., 2003; Marti-Cardona et al., 2010; Schumann et al., 2011).

L'imagerie optique ne permet pas non plus de détecter les zones inondées sous un couvert végétal dense, ce qui limite la disponibilité de certaines informations dans ces zones. De plus, la très haute résolution spatiale des données optiques s'accompagne souvent d'une réduction de la largeur de la zone couverte (Hess et al., 1995).

IV.5. Approches de cartographie de la vulnérabilité face aux inondations

Parmi les méthodes existantes les plus connus de cartographie du risque d'inondation (Barroca 2006 et al., Blin 2005), on peut citer :

IV.5.1. Méthode Canadienne-Québécoise

Cette méthode est souvent utilisée au Canada et au Québec pour cartographier les zones à risque d'inondation. Elle repose sur une analyse approfondie des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques des zones concernées, ainsi que sur des modèles hydrauliques pour évaluer les scénarios d'inondation potentiels.

IV.5.2. Méthode des Zones d'Assurabilité des États-Unis

Cette approche, largement utilisée aux États-Unis, vise à délimiter les zones à risque d'inondation en se basant sur des critères d'assurabilité. Elle prend en compte des facteurs tels que l'histoire des inondations, les données démographiques, et les caractéristiques du terrain pour évaluer les risques et établir des cartes de zones inondables.

IV.5.3. Méthode d'Inondabilité (France)

Cette méthode, utilisée en France, se concentre sur l'évaluation de la probabilité et de l'impact des inondations. Elle intègre des données hydrologiques, topographiques et climatiques pour identifier les zones les plus susceptibles d'être inondées. Les modèles utilisés prennent en compte les variations saisonnières et les événements extrêmes pour produire des cartes de risque d'inondation.

Chaque méthode présente ses propres spécificités et critères d'évaluation, mais toutes visent à fournir des cartes précises et utiles pour la gestion des risques liés aux inondations.

IV.6. Méthode FIGUSED-S

Les principes de la méthode FIGUSED-S pour la cartographie des risques d'inondation reposent sur une approche rigoureuse basée sur l'analyse de plusieurs paramètres clés. Cette méthode a été choisie pour son efficacité et sa capacité à fournir des cartes précises et détaillées des risques d'inondation. Le choix de cette méthode est argumenté par :

- **Intégration de multiples paramètres** : La méthode FIGUSED-S prend en compte une gamme variée de paramètres, tels que les données hydrologiques, topographiques, climatiques et socio-économiques. Cette approche holistique permet une évaluation complète des risques d'inondation, prenant en considération les multiples facteurs qui peuvent influencer la probabilité et l'impact des inondations.
- **Flexibilité et adaptation** : La méthode FIGUSED-S peut être adaptée à différents contextes géographiques et environnementaux. Elle offre une flexibilité dans l'utilisation de différentes sources de données et de modèles d'analyse, ce qui permet de répondre aux besoins spécifiques de chaque zone d'étude.
- **Précision et fiabilité** : En utilisant des données et des modèles sophistiqués, la méthode FIGUSED-S permet de produire des cartes de risques d'inondation précises et fiables. Elle prend en compte la variabilité spatiale et temporelle des phénomènes hydrologiques, ce qui permet de mieux comprendre et anticiper les zones les plus à risque.
- **Approche participative** : La méthode FIGUSED-S encourage souvent la participation des parties prenantes locales, y compris les communautés locales, les autorités locales et les experts en gestion des risques. Cette approche participative favorise une meilleure compréhension des enjeux locaux et permet de développer des solutions adaptées aux besoins spécifiques de chaque communauté.

IV.7. Paramètres pris en compte dans la méthode FIGUSED-S

Dans le cadre de cette méthode de cartographie des risques d'inondation, plusieurs paramètres sont considérés pour évaluer et cartographier efficacement les risques. Ces paramètres peuvent varier selon le contexte de l'étude et les exigences spécifiques de l'utilisateur. Dans notre cas d'étude, nous nous concentrerons sur ceux que nous avons choisis en référence à la méthode FIGUSED, en les adaptant à notre analyse.

IV.7.1. Accumulation de flux

En hydrologie, une "carte d'accumulation du flux" est une représentation graphique qui montre comment l'eau s'écoule à travers un bassin versant ou un système hydrologique. Ces cartes sont utilisées pour comprendre et visualiser la manière dont les précipitations se transforment en débit dans les rivières et les cours d'eau, en tenant compte de la topographie du terrain.

Les cartes d'accumulation du flux sont des outils fondamentaux pour analyser la circulation de l'eau à travers un paysage. Elles jouent un rôle important dans la gestion des ressources en eau, la prévention des inondations et la préservation de l'environnement.

Interpréter une carte d'accumulation de flux implique de comprendre comment l'eau s'écoule à travers un bassin versant ou un système hydrologique en fonction de la topographie. Ceci revient à

A- Comprendre la topographie

- **Lignes de crête** : Identifier les crêtes et les sommets des montagnes qui représentent les points de départ de l'écoulement de l'eau.
- **Lignes de vallée** : Identifier les vallées et les dépressions. Ces zones collectent souvent l'eau qui s'écoule depuis les crêtes.

B- Reconnaître les lignes d'accumulation du flux

- **Convergence des lignes** : Là où les lignes d'accumulation convergent, cela indique des zones où l'eau de ruissellement se rassemble. Plusieurs lignes convergent vers des points de sortie tels que des rivières ou des lacs.
- **Densité des lignes** : Les zones avec une densité élevée de lignes d'accumulation indiquent des zones où l'eau s'accumule plus rapidement ou plus abondamment.

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** : Suivez 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 N et all, 2015).

IV.7.2. Intensité des précipitations

L'intensité des précipitations est exprimée à l'aide de l'indice de Fournier modifié (IFM). L'IMF est la somme de l'intensité moyenne des précipitations mensuelles à chaque station pluviométrique. La répartition spatiale de l'intensité des précipitations est réalisée en tenant compte de l'attribution des stations dans la zone étudiée. (Huang et al., 1998)

Le paramètre d'intensité des précipitations (I) est exprimé à l'aide de l'indice de Fournier modifié (IFM), qui est la somme de l'intensité mensuelle moyenne des précipitations enregistrées par les stations pluviométriques. La répartition spatiale de ce critère a été déterminée en utilisant la méthode d'interpolation spline afin de tenir compte également de l'allocation des stations.

L'intensité mensuelle moyenne des précipitations est importante pour comprendre les tendances de la pluviométrie dans une région.Elle permet de savoir combien d'eau tombe en moyenne pendant un mois donné, ce qui est important pour la planification de la gestion de l'eau, la prévision des crues et la gestion des ressources en eau.

Cette mesure peut varier considérablement selon la région et la saison. Par exemple, certaines régions peuvent avoir des mois très pluvieux pendant une saison spécifique, tandis que d'autres peuvent être plus arides.

IV.7.3. Distance du réseau de drainage

Hormis les zones où les eaux de surface sont concentrées, les débordements des rivières sont nécessaires pour le déclenchement d'une inondation. Souvent, l'inondation émane du lit des rivières et s'étend dans les environs. Le rôle du lit de la rivière diminue à mesure que la distance augmente. Cette notion de « distance au réseau de drainage » reçoit une grande importance dans la méthodologie.(Patrikaki et al.,2018).

L'Indice de distance par rapport au réseau de drainage (D) est une mesure utilisée en hydrologie pour caractériser la proximité des points à un réseau hydrographique, tel qu'un réseau de rivières, de cours d'eau ou de canaux dans un bassin versant. Cet indice est souvent utilisé pour évaluer la connectivité des points à ce réseau et pour comprendre comment l'eau peut s'écouler à travers le bassin versant.

Cet indice est calculé pour chaque point dans un bassin versant en mesurant la distance euclidienne entre ce point et le réseau de drainage le plus proche.

Le réseau de drainage est généralement représenté par des lignes qui indiquent les cours d'eau ou les canaux. Ces lignes peuvent être dérivées à partir de données topographiques, telles que les cartes hydrographiques ou les modèles numériques d'élévation (MNE).

Tout d'abord, le réseau de drainage est identifié et représenté sur une carte ou dans un modèle numérique. Chaque point dans le bassin versant est ensuite évalué pour déterminer sa distance au réseau de drainage le plus proche.

Une fois que toutes les distances ont été calculées, elles sont souvent normalisées pour obtenir des valeurs d'Indice de distance par rapport au réseau de drainage (D) comprises entre 0 et 1. Un D proche de 0 indique que le point est très proche du réseau de drainage, tandis qu'un D proche de 1 indique que le point est éloigné du réseau de drainage.

Dans notre cas, nous avons utilisé ArcGis pour calculer l'Indice (D) pour chaque point dans le bassin versant en choisissant l'option "Distance to nearest hub".

IV.7.4. Elévation

L'altitude des zones influence également les risques d'inondation. Les zones situées à des altitudes plus basses peuvent être plus exposées aux inondations, en particulier lors de crues importantes. (Lloyd, 2005).

L'obtention de cette carte d'élévation peut se faire à partir des modèles de terrain comme le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ou le Digital Elevation Model (DEM), fournissent des données d'élévation à l'échelle mondiale. Ces données peuvent être téléchargées gratuitement à partir de sources telles que la NASA ou l'USGS (United States Geological Survey).

IV.7.5. Pentés du terrain

La pente du terrain est un facteur déterminant dans la propagation des inondations. Les zones avec une pente plus prononcée peuvent être plus sujettes aux inondations et aux coulées de boue. (Demek, 1972).

Nous avons dans notre cas obtenu cette carte à partir du MNT en ayant recours à ArcGis, Nous avons utilisé l'option "Slope" pour calculer les pentes à partir des données d'élévation. Cet outil est disponible dans la boîte à outils "Spatial Analyst" sous "Surface".

IV.7.6. 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 (sub) 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.7.7. Géologie

La géologie joue un rôle significatif dans la caractérisation des zones inondables, car elle peut avoir un impact direct sur l'ampleur et l'intensité des inondations. Les caractéristiques géologiques d'une région, telles que la présence de roches imperméables ou perméables, ont des implications majeures sur la dynamique hydrologique.

Les roches imperméables, telles que l'argile ou le schiste, ont tendance à favoriser le ruissellement de surface. Lorsqu'il pleut, l'eau a du mal à pénétrer dans ces types de sols et s'écoule plutôt en surface, augmentant ainsi le volume et la vitesse du ruissellement. Cela peut conduire à une augmentation rapide des débits des cours d'eau et à une intensification des inondations, car l'eau s'accumule rapidement sur les surfaces imperméables.

Par contre, les formations géologiques perméables, comme le calcaire ou le sable, favorisent l'infiltration de l'eau dans le sol. L'eau de pluie est absorbée par le sol et peut être stockée dans les aquifères souterrains, réduisant ainsi le ruissellement de surface et atténuant le risque d'inondation. Ces formations perméables agissent comme des réservoirs naturels qui peuvent absorber et stocker de grandes quantités d'eau, aidant à réguler le débit des cours d'eau pendant les périodes de précipitations abondantes.

Dans notre étude, nous avons utilisé la carte de Guardia (1975) de l'Oranie nord occidental comme base de travail. Pour ce faire, nous avons digitalisé cette carte et avons pu créer des données spatiales numériques adaptées à nos besoins spécifiques. Ce processus nous a permis de cartographier avec précision les différentes caractéristiques du terrain, telles que les cours d'eau et la lithologie de la zone d'étude. Ce travail, nous a fourni une représentation géographique détaillée de la région d'intérêt, ce qui nous a permis de mieux comprendre les caractéristiques topographiques, hydrologiques et géologiques de la zone étudiée.

IV.8. Interpolation des cartes

La méthodologie proposée consiste à combiner linéairement les paramètres sélectionnés en tenant compte de leurs poids relatifs. Cette approche implique la superposition des cartes thématiques avec des poids différents dans un environnement SIG. Finalement, une carte des risques d'inondation est créée, définissant cinq classes de vulnérabilité aux inondations : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée. Cette classification est basée sur les informations intrinsèques des données dérivées et leur combinaison linéaire.

Le processus de classification des ensembles de données pour la carte des risques d'inondation repose sur :

- ❖ **Identification des points de rupture** : Les points de rupture (ou seuils) dans les ensembles de données sont déterminés en analysant les variations des valeurs des données. L'objectif est de minimiser la variabilité à l'intérieur de chaque classe tout en maximisant la variabilité entre les classes. Cela signifie que chaque classe doit être aussi homogène que possible en termes de valeurs de données, et les différences entre les classes doivent être aussi grandes que possible.

- ❖ **Minimisation de la variabilité intra-classe** : Pour chaque classe, la variabilité des valeurs des données est calculée. Les points de rupture sont choisis de manière à ce que les valeurs des données au sein de chaque classe soient les plus similaires possibles, ce qui minimise la variabilité intra-classe.
- ❖ **Maximisation de la variabilité inter-classe** : Simultanément, on cherche à maximiser les différences entre les classes. Cela signifie que les points de rupture doivent être placés de manière à ce que les valeurs des données dans des classes différentes soient aussi distinctes que possible. Par exemple, une classe "faible risque" doit être clairement différente d'une classe "élevé risque" en termes de valeurs de données.
- ❖ **Segmentation des données** : En utilisant ces points de rupture, les ensembles de données sont segmentés en groupes ou classes. Chaque classe est définie par une plage spécifique de valeurs de données. Les limites de ces classes sont établies là où il y a des changements significatifs dans les valeurs des données, ce qui permet de capturer les principales variations dans les ensembles de données.
- ❖ **Création des groupes** : Les données sont alors divisées en groupes en définissant des limites précises basées sur les points de rupture identifiés.

Cette méthodologie permet de classer les ensembles de données de manière objective et rigoureuse, en s'assurant que les classes créées sont significatives et reflètent les variations importantes des données. Cela aboutit à une carte des risques d'inondation qui est précise et utile pour la planification et la gestion des risques.

IV.9. C'est quoi un système d'information géographique ?

IV.9. 1. Définition et fonctionnement

Un système d'information géographique (SIG) est une plateforme permettant de collecter, gérer et analyser des données. Fondé sur les principes de la géographie, le SIG intègre divers types de données, analyse les emplacements spatiaux et organise les couches d'information en visualisations, notamment des cartes et des scènes 3D. Cette capacité unique permet au SIG de révéler des informations plus approfondies sur les données, telles que les motifs, les relations et les situations, aidant ainsi les utilisateurs à prendre des décisions plus avisées. [7]

Les données d'un SIG offrent une représentation simplifiée des entités physiques, telles que les routes, les montagnes, les lieux d'accidents et autres caractéristiques que nous souhaitons identifier. Ces données incluent des informations sur l'emplacement spatial et l'étendue des entités, ainsi que des informations sur leurs propriétés non spatiales. Chaque entité physique est représentée par un objet spatial dans le SIG, établissant ainsi une correspondance directe entre l'entité et l'objet. (Bolstad P, 2016).

Les entités spatiales utilisées par le SIG pour représenter les données sont divisées en deux catégories principales : le format « vecteur » et le format « raster ».

➤ **Format Vecteur**

Un modèle de données vectorielles utilise des ensembles de coordonnées et des données d'attributs associés pour définir des objets discrets. Les groupes de coordonnées définissent l'emplacement et les limites des objets discrets, et ces données de coordonnées ainsi que leurs attributs associés sont utilisés pour créer des objets vectoriels représentant les entités du monde réel (Bolstad, 2016)

➤ **Format Raster**

Les modèles de données Raster définissent le monde comme un ensemble de cellules dans un modèle de grille. En général, ces cellules sont carrées et uniformément espacées dans les directions x et y. Les phénomènes ou objets en question sont représentés par des valeurs d'attribut associées à l'emplacement de chaque cellule. (Bolstad, 2016).

IV.9.2. Utilité et fonctionnalité du SIG

Ces utilités sont assurées principalement par des fonctionnalités qui représentent la majeure partie des outils du SIG et qui sont nécessaires pour l'analyse spatiale tels que :

➤ **Géo référencement**

Le géo référencement, également appelé géocodage, est le processus de spécification de l'emplacement spatial des données géographiques. Cette fonctionnalité permet d'attribuer des coordonnées géographiques aux attributs des données, facilitant ainsi leur intégration et leur analyse dans un système d'information géographique (SIG). En géo référençant des données, on peut effectuer des analyses spatiales précises et visualiser les informations sur des cartes, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications géo spatiales. [7]

➤ **Adéquation et distance**

Une des principales capacités d'un système d'information géographique (SIG) est de mesurer les distances entre les objets et de déterminer si ces objets sont adjacents les uns aux autres. Cela permet aux utilisateurs d'effectuer des analyses spatiales précises, essentielles pour la planification, la gestion des ressources et la prise de décision. (Régis et al., 2011).

➤ **Superpositions et requêtes**

Une autre capacité essentielle d'un système d'information géographique (SIG) est de superposer plusieurs couches d'informations et d'y accéder simultanément. Cela facilite l'analyse spatiale en permettant de combiner différentes sources de données de manière fluide et efficace. (Régis et al., 2011).

➤ **Base de données géographique (Geodatabase)**

La géodatabase est une architecture de données évolutive permettant de stocker tous les aspects d'une application géographique dans un format de base de données relationnelle. (Régis et al., 2011).

➤ **Analyse spatiale des données**

L'analyse spatiale regroupe un ensemble de techniques et de modèles qui se concentrent spécifiquement sur les motifs et processus spatiaux. Lors de l'exploitation de la base de données dans un système d'information géographique (SIG), l'analyse spatiale constitue une phase dominante du cycle de l'information géographique. Cela s'explique par le fait que toutes les données, qu'elles soient de nature géographique, sociale, économique ou environnementale, sont représentées sous forme de cartes et de schémas (données spatiales). (Serraoui, et al., 2018).

L'analyse spatiale permet de décrire, comprendre et interpréter les relations géographiques entre différents éléments. Par exemple, elle peut aider à identifier les zones à risque d'inondation en superposant des couches d'information sur les précipitations, l'utilisation des terres, la topographie et la géologie. Elle permet également de mesurer les distances, d'analyser les proximités, et d'identifier les relations spatiales telles que la contiguïté ou la connectivité entre différents objets géographiques.

Cette analyse spatiale est essentielle car elle permet de tirer des conclusions significatives à partir des données géographiques représentées dans un SIG, facilitant ainsi la prise de décisions informées et la planification stratégique.

La forme circulaire dans la figure IV.1, illustre que le SIG est un système adaptable qui évolue en fonction des résultats récurrents et des nouveaux besoins, et qu'il n'est pas statique ni immuable. (Régis et al., 2011).

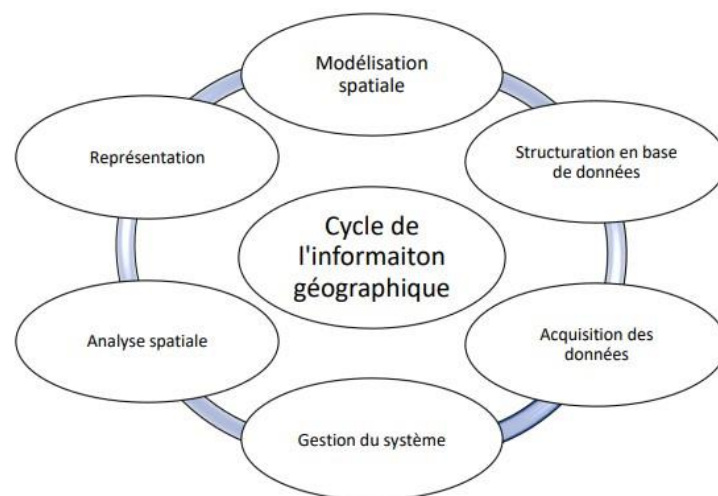


Figure IV.1: Cycle de vie de l'information géographique. (Régis, et al., 2011)

IV.9.3. Limites du SIG dans le domaine de cartographie

Malgré ses avantages dans le domaine de l'analyse spatiale, le SIG présente encore des lacunes en matière d'aide à la décision. Chakhar (2006) a identifié plusieurs de ces insuffisances, à savoir :

➤ **Manque d'analyse multi-échelles**

bien que les SIG soient des outils puissants pour l'analyse spatiale, ils nécessitent des améliorations pour offrir des analyses multi-échelles plus robustes, capables de traiter des données temporelles, multidimensionnelles et diversifiées de manière plus intégrée et efficace. En effet le manque d'analyse multi-échelles dans les systèmes d'information géographique (SIG) se réfère à plusieurs limitations spécifiques :

- **Analyse temporelle insuffisante** : Les SIG traditionnels peuvent avoir des difficultés à intégrer et analyser des données temporelles de manière efficace. Cela signifie qu'ils ne sont pas toujours bien équipés pour suivre et analyser les changements au fil du temps, ce qui est essentiel pour de nombreuses applications comme la surveillance de l'évolution des risques d'inondation, la gestion de l'urbanisation ou le suivi des changements environnementaux.
- **Analyse multidimensionnelle limitée** : Bien que les SIG puissent représenter des données en 3D, ces représentations sont souvent basées sur un Modèle Numérique d'Élévation (MNE). Un MNE fournit une vision simplifiée du terrain, généralement limitée aux variations de la surface terrestre. Cette limitation réduit la capacité des SIG à intégrer pleinement des analyses en plusieurs dimensions, comme celles nécessaires pour étudier la structure souterraine, l'atmosphère, ou les dynamiques marines, par exemple.
- **Intégration de données de sources diverses** : Les SIG peuvent rencontrer des difficultés à traiter et à intégrer des données provenant de différentes sources et formats. Cela inclut des données spatiales provenant de satellites, des informations géologiques, des données climatiques, et des relevés de terrain. Chaque type de donnée peut avoir ses propres caractéristiques et formats, ce qui complique leur intégration et leur analyse cohérente au sein d'un même système.

➤ **Manque d'unicité des chemins**

La diversité des approches pour atteindre des résultats similaires crée une lacune dans l'uniformité des chemins empruntés. En l'absence de démarches explicites unifiées, chaque utilisateur est laissé à sa propre intuition pour accomplir une même tâche (Chakhar, 2006).

➤ **Une situation riche de données et pauvre en théorie**

Cette observation met en lumière une lacune dans l'utilisation des systèmes d'information géographique (SIG). Les SIG sont des outils puissants pour manipuler et analyser des données géographiques, mais leur fonctionnement est souvent basé sur des relations mathématiques et géométriques, sans toujours tenir compte pleinement de la

complexité théorique et de la réalité des phénomènes étudiés. En d'autres termes, les SIG peuvent parfois privilégier les calculs et les modèles mathématiques au détriment d'une compréhension approfondie des phénomènes géographiques dans leur contexte réel. Cette approche peut conduire à une diversité de méthodes et d'interprétations par les utilisateurs, contribuant ainsi au manque d'unicité des chemins et à la nécessité pour chaque utilisateur de suivre son intuition pour atteindre des résultats similaires. (Chakhar, 2006).

➤ **Difficultés d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG**

Parce que l'analyse spatiale se concentre sur le traitement et la mise au point des mesures et des calculs pour illustrer la réalité du phénomène alors que le SIG s'occupe des éléments que constitue cette réalité. Une compréhension approfondie des principes et des techniques des deux domaines est essentielle pour une intégration efficace de l'analyse spatiale aux SIG. (Serraoui, et al., 2018).

III. 10. Conclusion

Le chapitre suivant sera consacré à l'application de la méthode FUGUSED sur le bassin versant d'oued Ghazouana par l'utilisation de la plateforme de ArcGis qui offre des outils avancés d'analyse spatiale permettant d'appliquer efficacement cette méthode pour détecter les zones à risque d'inondation. Nous y focaliserons sur la cartographie des résultats d'analyse, ce qui est essentiel pour communiquer les risques d'inondation aux décideurs et au public.



Chapitre 05 :
Résultats et discussions

V. Introduction

La croissance démographique et le changement climatique sont des sujets d'une importance cruciale dans le contexte actuel. Les inondations, résultant souvent d'épisodes pluvieux intenses, sont devenues une problématique majeure. Bien que les précipitations soient essentielles pour la vie et l'environnement, les inondations posent des défis en raison des volumes d'eau parfois incontrôlables. À l'échelle mondiale, les inondations sont parmi les phénomènes naturels les plus fréquents, dangereux et destructeurs, touchant environ 170 millions de personnes chaque année. La corrélation entre la croissance démographique, le changement climatique et l'augmentation des risques d'inondations souligne l'importance de prendre des mesures adaptées pour atténuer ces impacts. (Fiorillo E et all 2015)

V.1. Matériel et méthode

Le bassin versant de l'oued Ghazouana se distingue par un relief accidenté avec des pentes raides. Les altitudes culminent au sud à plus de 1100 mètres au djebel Fillaoucène, conférant ainsi au bassin un potentiel d'écoulement rapide. Cette topographie entraîne une réactivité élevée aux crues, qui peuvent survenir en un temps relativement court.

La méthode FIGUSED-S a été appliquée pour détecter les zones à risque d'inondation. Cette méthode fonctionne dans un environnement SIG et traite les informations de sept paramètres dont les initiales forment le nom de la méthode "FIGUSED". Ces paramètres sont :

- Accumulation de débit (Flow accumulation (F)),
- Intensité des précipitations (Rainfall Intensity) (I),
- Géologie (Geology) (G),
- Utilisation des terres (Land use) (U),
- Pente (Slope) (S),
- Altitude (Elevation) (E),
- Distance par rapport au réseau de drainage (Distance from Drainage) (D).

Pour élaborer ce travail, nous avons utilisé ArcGis, qui permet de rassembler, visualiser et d'intégrer divers types de données géospatiales nécessaires à l'application efficace de la méthode FIGUSED et qui nous aidera à identifier les risques d'inondation.

V.2. Analyse des paramètres de la méthode**V.2.1. Accumulation de flux (F)**

L'accumulation de débit est un indicateur clé pour identifier les zones à risque d'inondation car elle permet de localiser les endroits où l'eau se concentre. Combinée aux autres paramètres physiques du bassin versant, cette méthode offre une évaluation détaillée du risque d'inondation.

Cette méthode permet d'estimer le débit accumulé, un critère nécessaire pour évaluer l'occurrence des inondations. Elle fonctionne en agrégeant les flux d'eau de l'amont à l'aval

sur la grille de sortie. Des valeurs élevées de débit accumulé indiquent les cellules où l'eau qui s'écoule a tendance à se concentrer, rendant ces zones plus vulnérables aux inondations.

Les valeurs d'accumulation de débit (fig.V.I) varient de 0 à 400000 pixels avec une prédominance de la classe 0-14000 qui couvre 99,25% de la surface du bassin d'Oued Ghazouana.

La Figure V.2, illustre la répartition de l'indice d'accumulation de débit dans la zone étudiée, montrant que les valeurs élevées se limitent aux affluents et leurs exutoires.

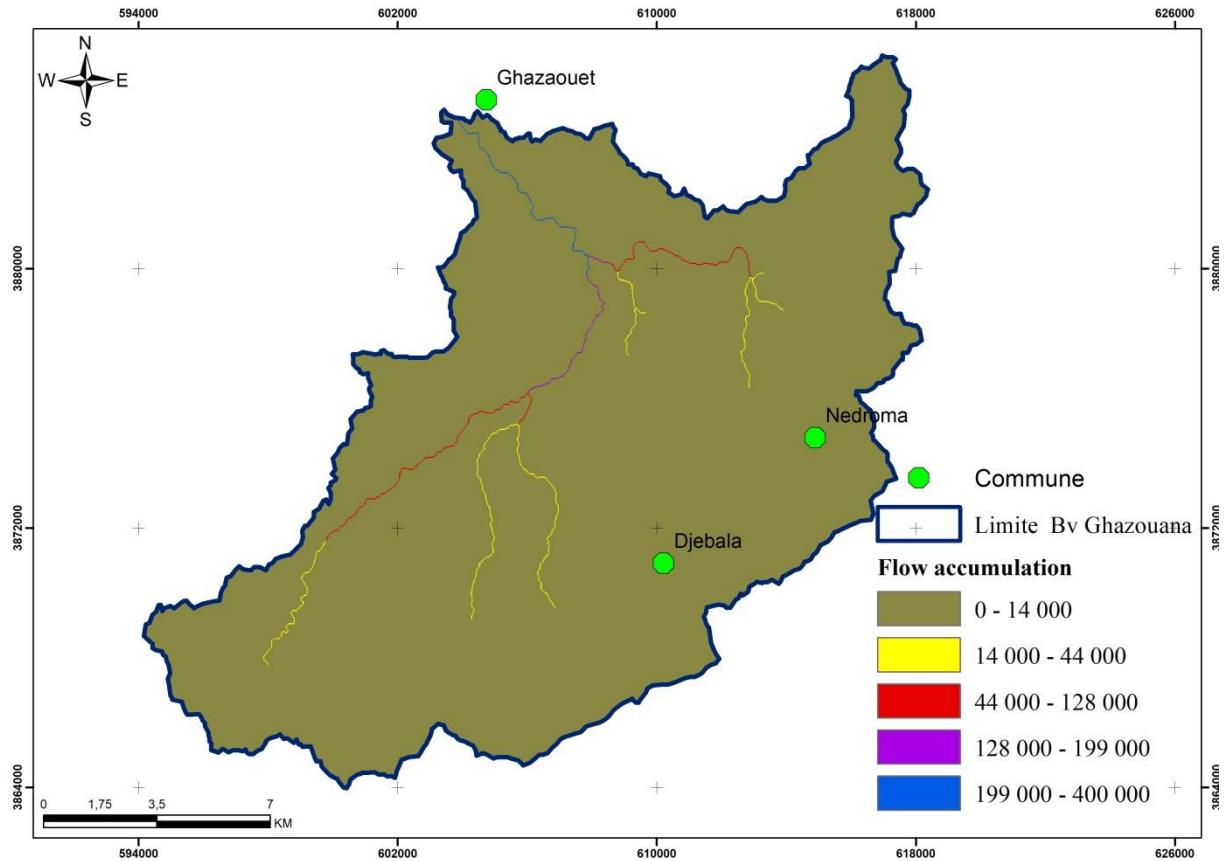


Figure V.1: Cartographie de l'accumulation de flux (F) dans le bassin de Ghazouana

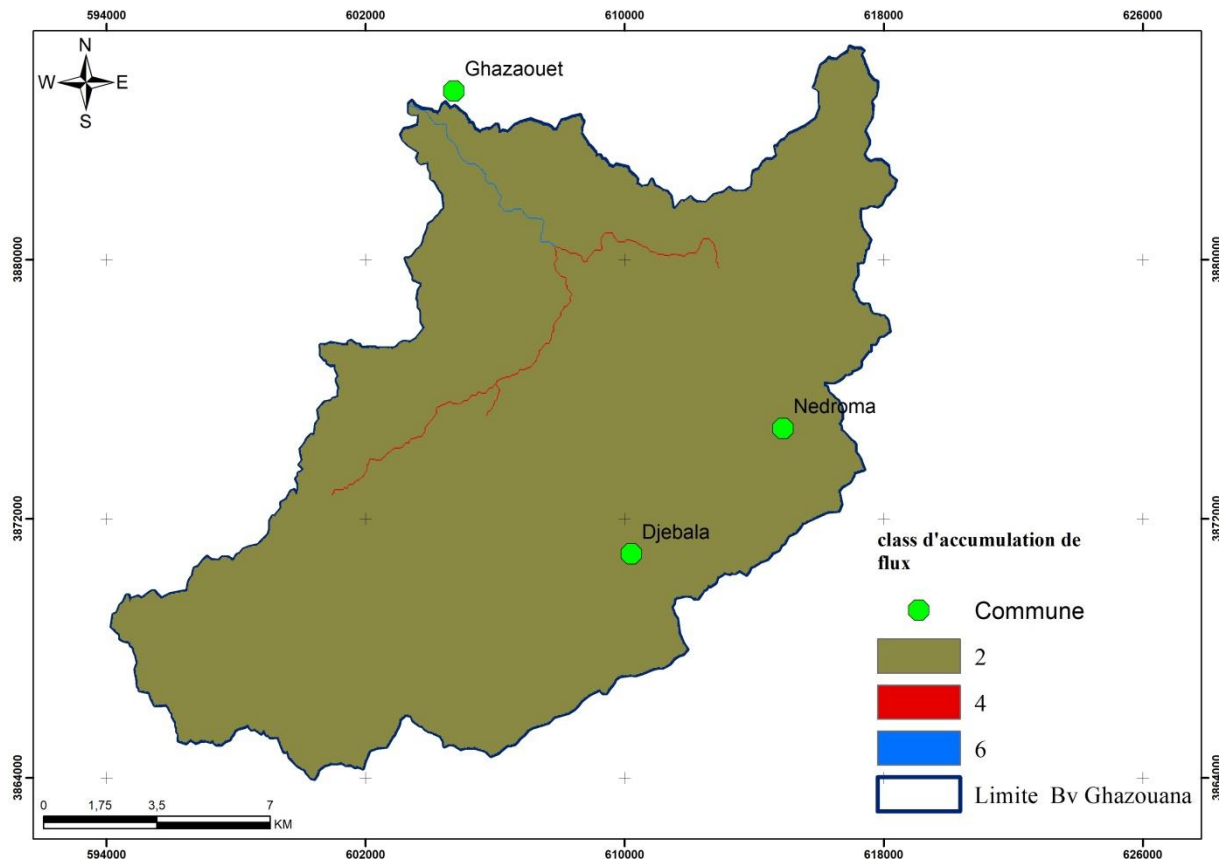


Figure V.2 : Répartition de l'indice de flux dans le bassin de Ghazouana

V.2.2. Intensité des précipitations (I)

La répartition spatiale des valeurs d'intensité de la pluie, comme représentée dans la Figure V.3, démontre une concentration significative des précipitations dans les zones montagneuses et à l'exutoire du bassin (> 350 mm). Cette répartition suit les principes de la pluviosité qui sont influencés par l'altitude et la proximité de la mer. En d'autres termes, les précipitations sont plus abondantes dans les zones montagneuses en raison des effets orographiques, tandis que la proximité de la mer peut également influencer la quantité de précipitations en raison des conditions météorologiques régionales.

Les valeurs du paramètre d'intensité des précipitations (I) sont divisées en cinq classes, (fig.V.4) montrant que les valeurs les plus élevées se trouvent dans la partie sud-est de la zone étudiée correspondant aux zones montagneuses au niveau de Nedroma (oued Tleta) et aussi à l'exutoire du bassin au niveau de l'oued Marsa. Dans le bassin de Ghazouana, les valeurs de l'indice (I) moyen présentent une variabilité spatiale considérable. Nous notons une diminution potentielle du risque d'inondation au sud ouest en raison de la baisse des précipitations annuelles, il est paradoxal de constater que la région nord est la plus touchée, en raison de facteurs tels que les constructions et le type de sol et la pente.

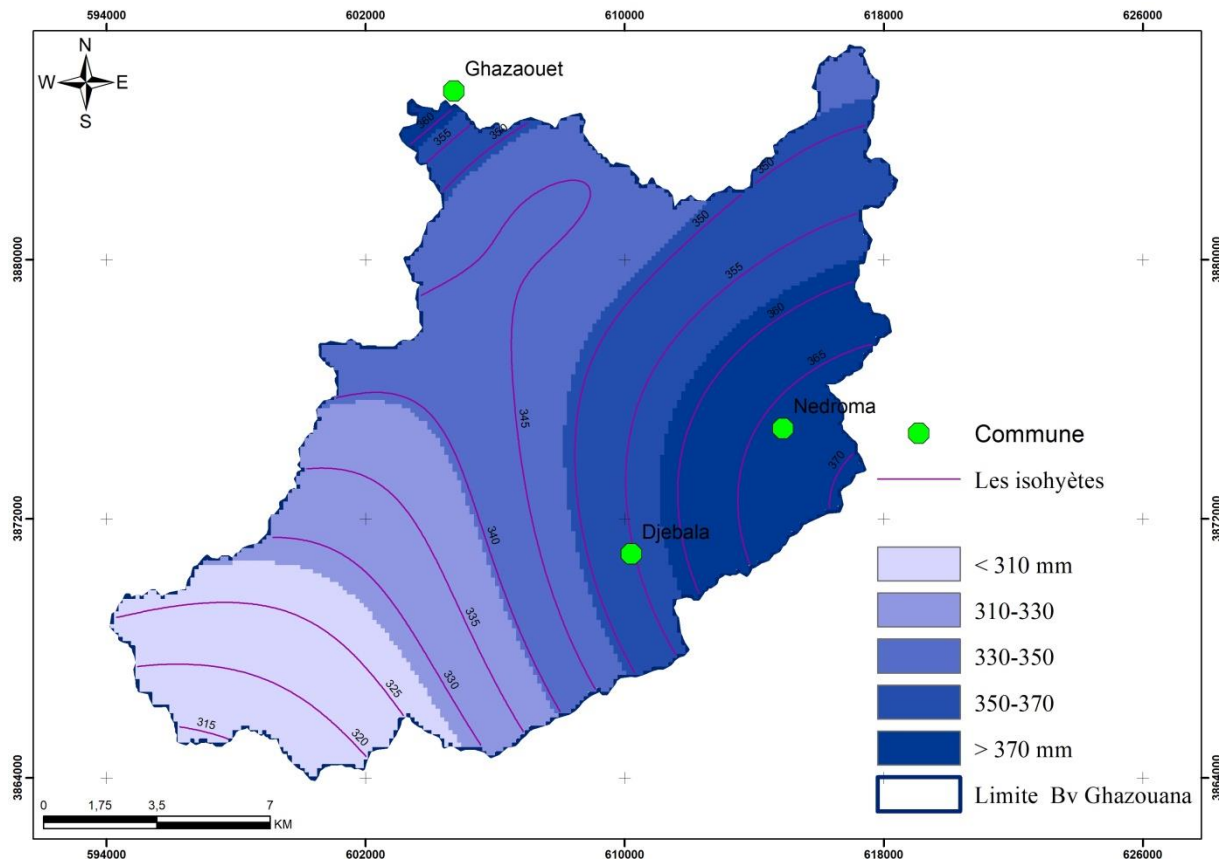


Figure V.3: Cartographie de l'intensité des précipitations (I) dans le bassin de Ghazouana

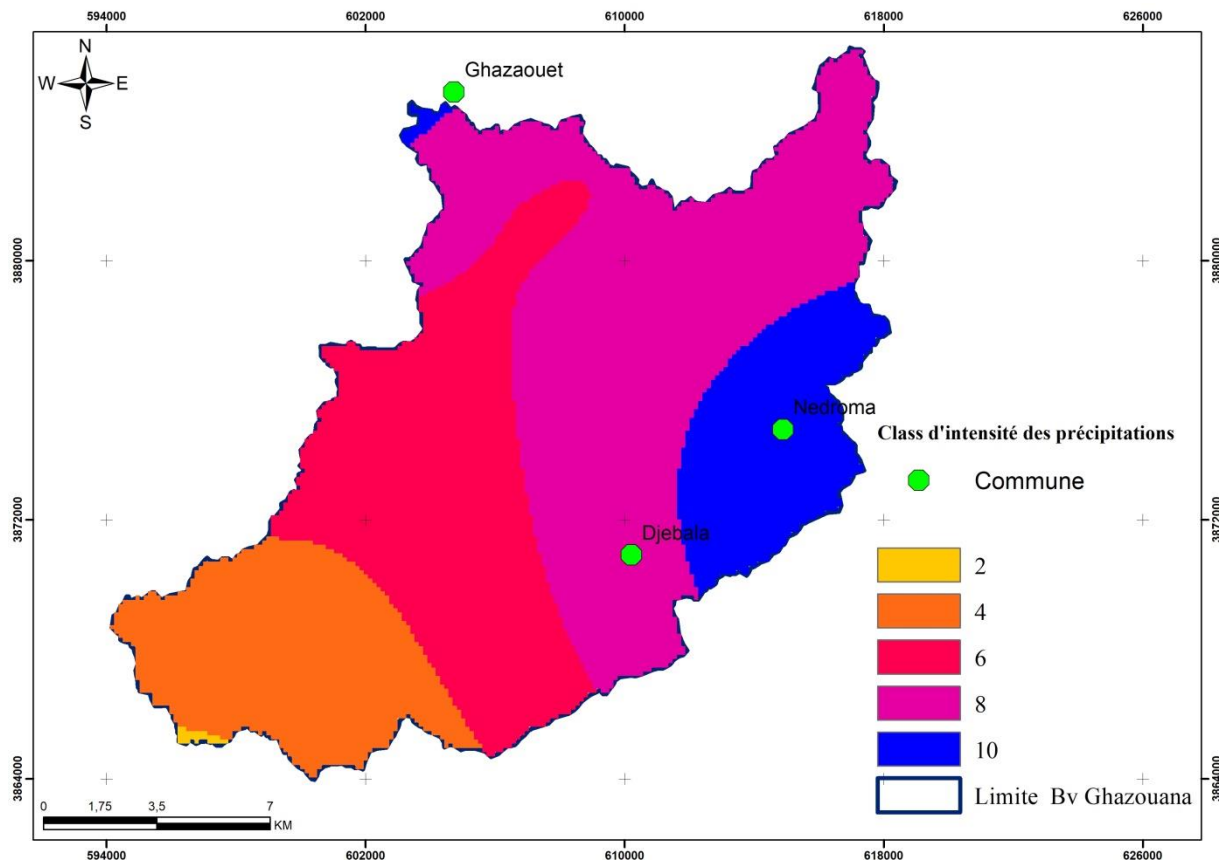


Figure V.4 : Répartition de l'indice de l'intensité des précipitations dans le bassin de Ghazouana

V.2.3. Géologie (G)

La géologie exerce une influence significative sur la formation des inondations. Les zones caractérisées par des roches imperméables sont plus vulnérables aux inondations intenses, tandis que celles avec des formations perméables favorisent une meilleure infiltration, réduisant ainsi le risque d'inondation.

Selon la géologie, cinq couches ont été notées, les roches marneuses qui représentent 19,8% de la surface du bassin d'oued Ghazouana voyant attribuer la valeur la plus élevée (10) et les calcaires allochtones post nappes (Guardia, (1975) qui recouvrent les formations marneuses du Miocène (avec 16.5% de la surface du bassin) sont notés 8. Les basaltes sont notés 4 (la couche la plus importante du bassin avec 69,1%), les argiles triasiques et les alluvions notés 2.

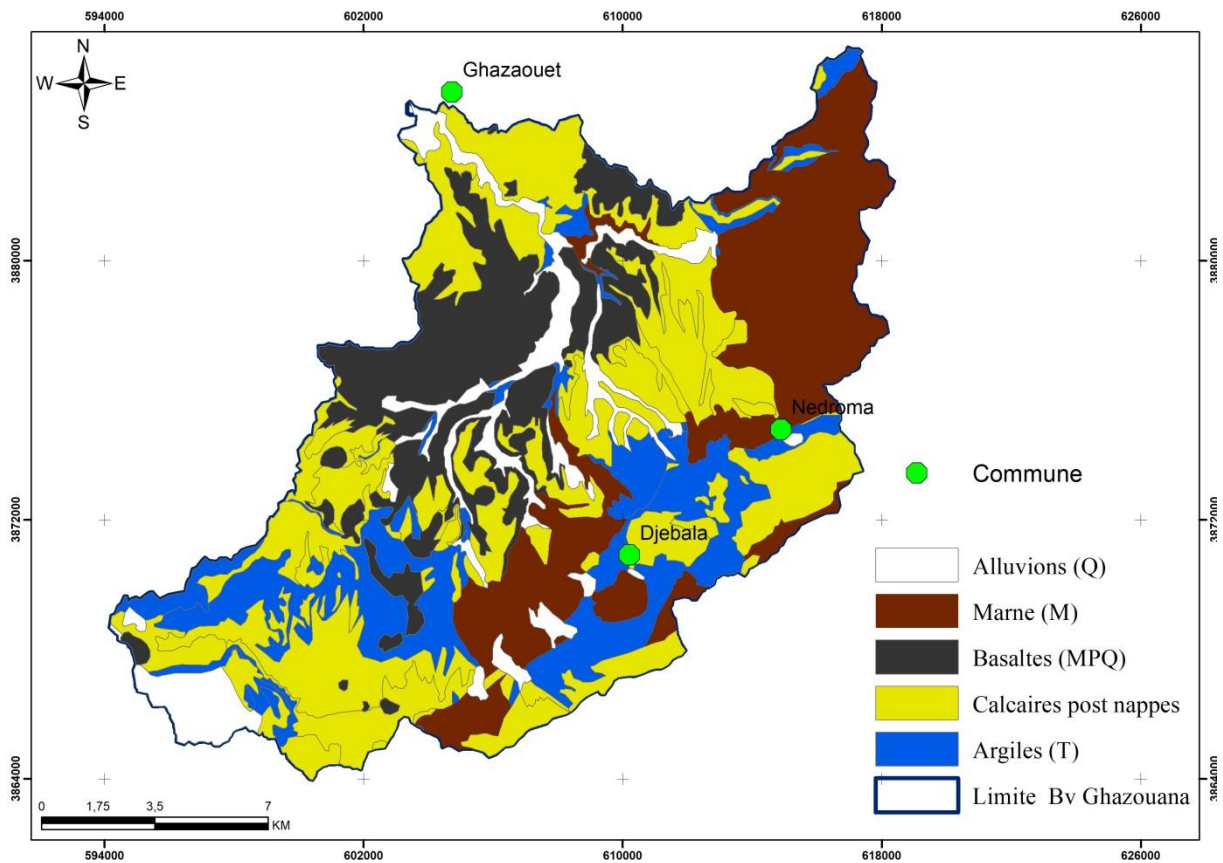


Figure V.5: Cartographie de formations géologiques (G) dans le bassin de Ghazouana (Digitalisée par Chachoua A., 2024)

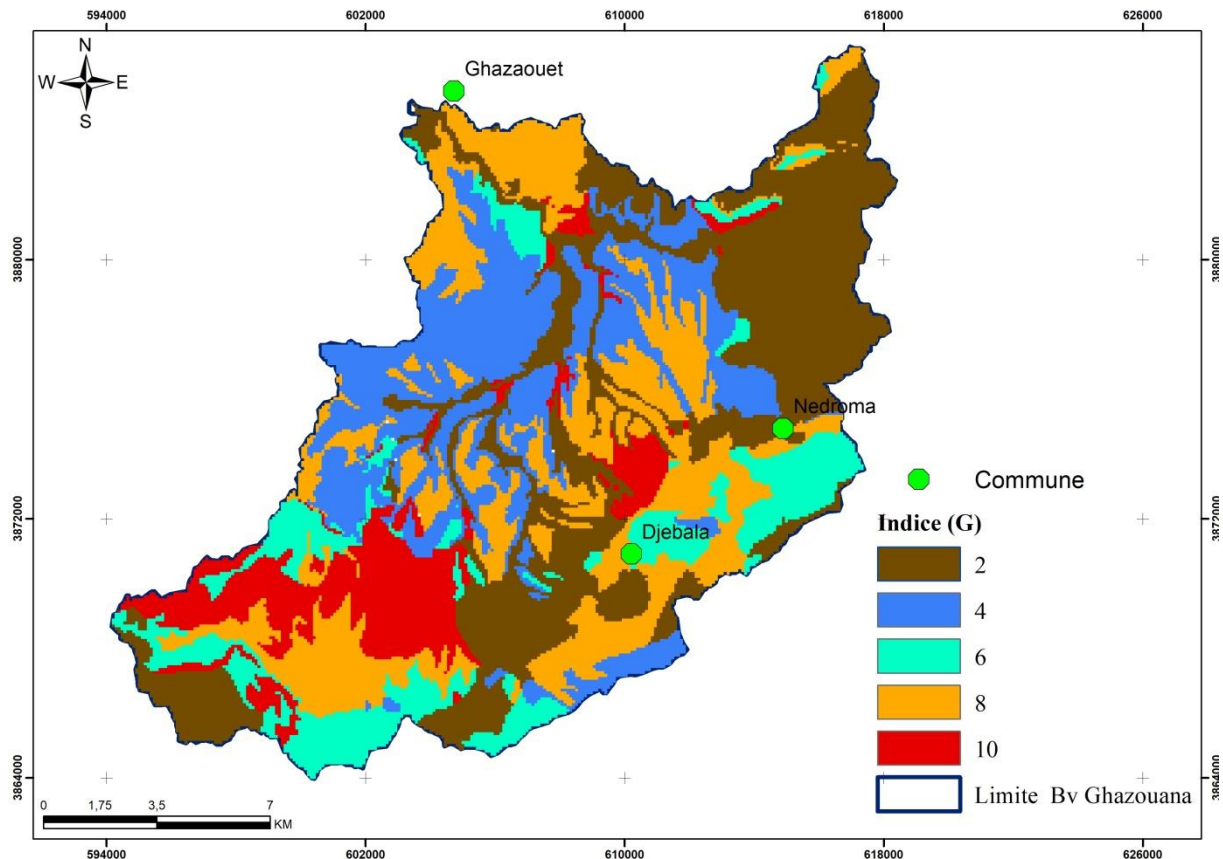


Figure V.6 : Répartition de l'indice de Géologie (G) dans le bassin de Ghazouana

V.2.4. Utilisation des terres (Land use) (U)

L'utilisation des sols a un impact direct sur le taux d'infiltration de l'eau en raison de la corrélation entre les caractéristiques de surface et les processus de ruissellement et d'infiltration. Les différents types d'utilisation des sols, tels que les zones agricoles, les forêts et les zones urbanisées, présentent des propriétés de surface distinctes qui influencent la capacité d'infiltration. Par exemple, les terres agricoles et les zones urbanisées ont souvent des surfaces plus compactes et imperméables, réduisant ainsi l'infiltration et augmentant le ruissellement. En revanche, les forêts et autres zones naturelles, avec leurs sols souvent plus perméables, permettent une meilleure infiltration de l'eau, contribuant ainsi à la réduction du risque d'inondation.

La carte d'utilisation des sols (U) (fig.V.7), générée par ArcGis met en évidence la présence de quatre classes d'occupation qui sont :

- Végétation maximale : se réfère à des zones où la couverture végétale est très dense ou abondante. Cela inclut des forêts, des prairies denses et les zones où la végétation naturelle est prolifique.
- Végétation minimale : se réfère à des zones où la couverture végétale est très faible ou presque inexistante. Cela peut inclure des terrains nus, des déserts, des zones rocheuses ou des surfaces artificialisées comme les zones urbanisées ou industrielles où la végétation est absente ou très limitée. Ces zones sont importantes à identifier

car elles peuvent avoir un impact significatif sur les processus hydrologiques, notamment en augmentant le ruissellement et en réduisant l'infiltration, ce qui peut contribuer à un risque accru d'inondation. Cette zone est très répandue au niveau des deux communes de Nedroma et de Ghazaouet.

- Terres : comprenant les terres agricoles et les terrains nus permettent à l'eau de s'écouler en plus grande quantité sous forme de ruissellement de surface ou de sub surface.
- Eau : zones couvertes par des plan d'eau correspondant dans notre cas les affluents des oueds Tleta et Taima.

Quant à la carte de répartition de l'indice d'occupation des terres (U), (fig.V.8), elle fait ressortir quatre classes notées respectivement 2, 6, 8, et 10 avec prédominance des terres agricoles.

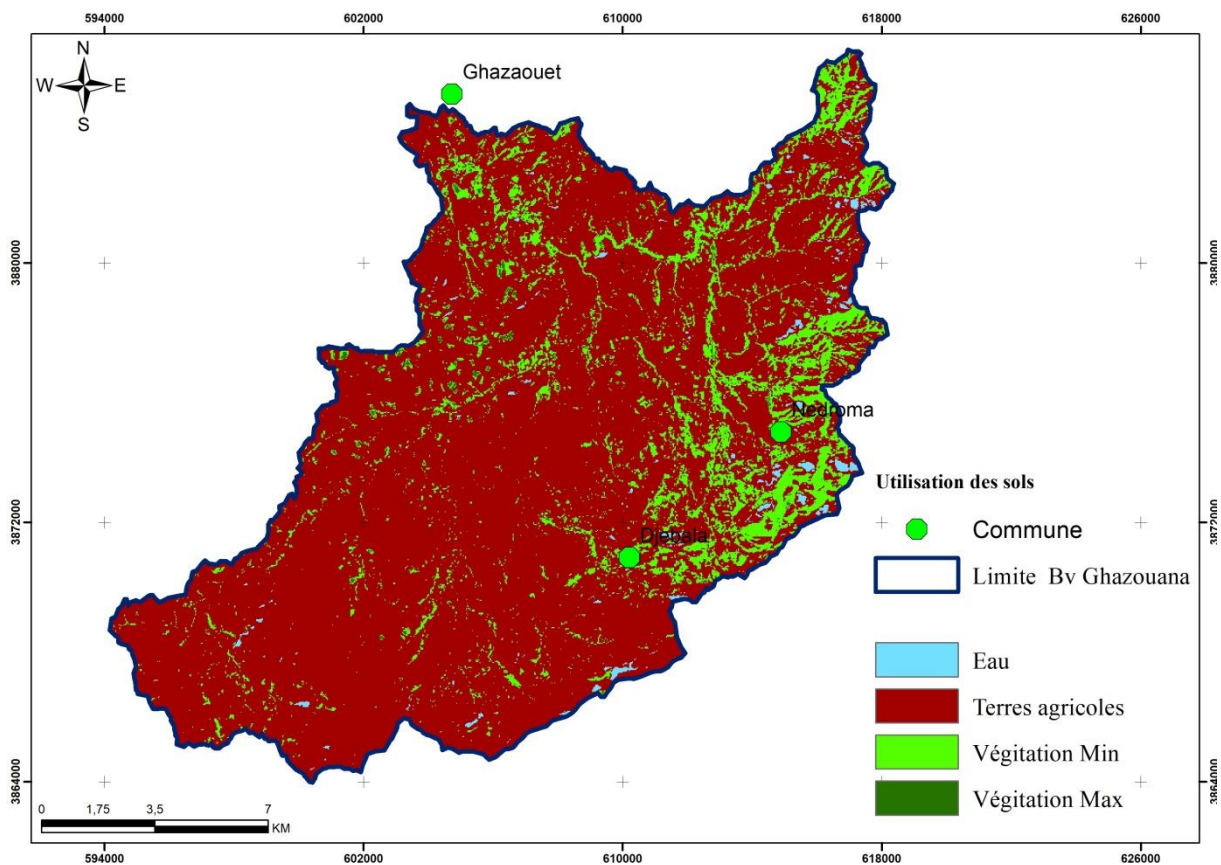


Figure V.7: Cartographie d'utilisation des sols (U) de Ghazouana

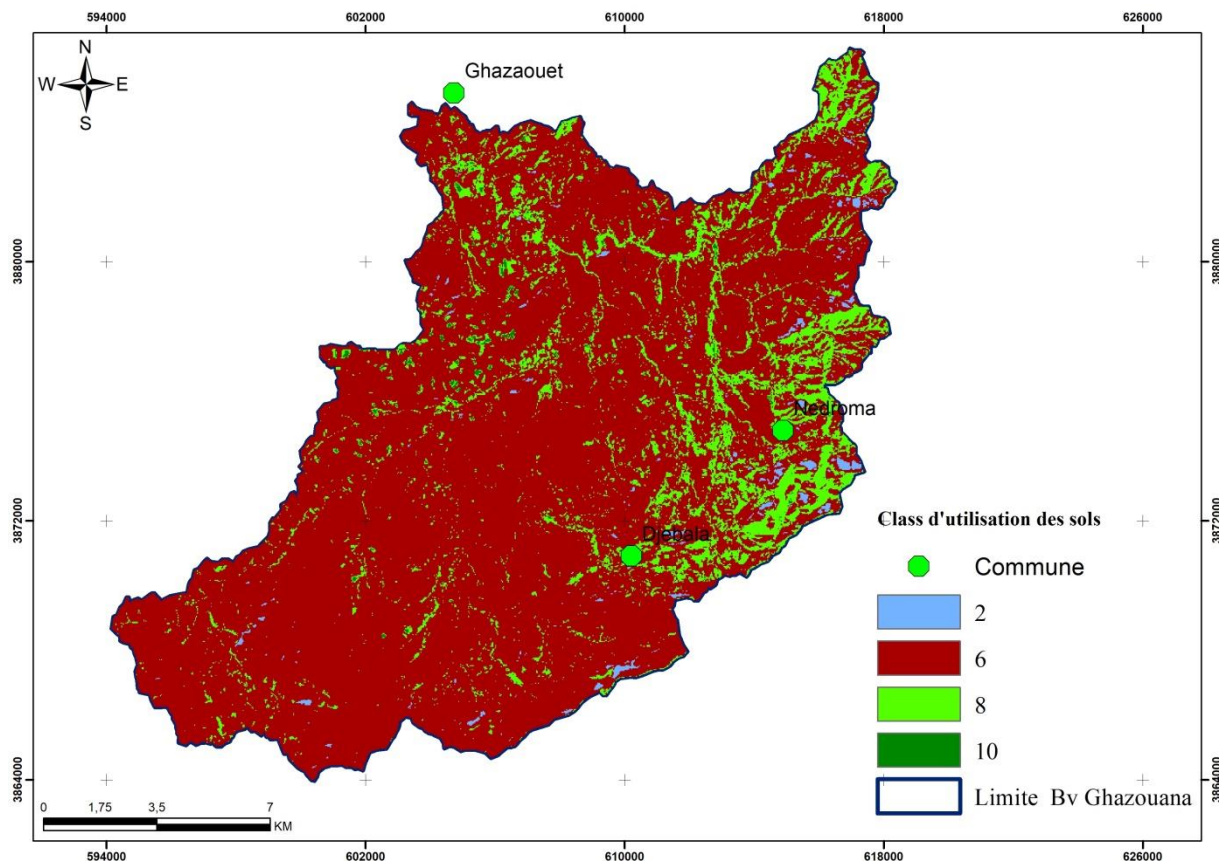


Figure V.8 : Répartition de l'indice d'utilisation des terres (U) le bassin de Ghazouana

V.2.5. Pente (Slope) (S)

La pente est fortement liée à la fois au volume et à la vitesse du ruissellement de surface, ainsi qu'à l'infiltration dans les eaux souterraines. Les zones plates ont tendance à s'inonder plus rapidement que les zones inclinées où le ruissellement s'écoule plus rapidement. La carte des pentes du bassin d'oued Ghazouana a été générée à partir du modèle numérique de terrain (MNT) dérivé du SRTM 30 m de l'USGS. Cette carte divise les pentes en cinq classes :

La Figure V.9 présente la distribution spatiale de la pente, mettant en évidence les caractéristiques topographiques du bassin. On observe que la partie Est et sud-est du bassin présente des pentes abruptes, indiquant une topographie montagneuse ou accidentée dans cette région. En revanche, les zones les moins pentues se situent généralement près des exutoires des sous-bassins Tleta et Taima, ainsi qu'au niveau d'oued el Marsa. Ces zones moins pentues peuvent indiquer des vallées ou des plaines où l'eau a tendance à s'accumuler, ce qui peut avoir des risques d'inondation.

La figure V.10, donne les classes de pente notées de 2 à 10 correspondant à la zone d'étude.

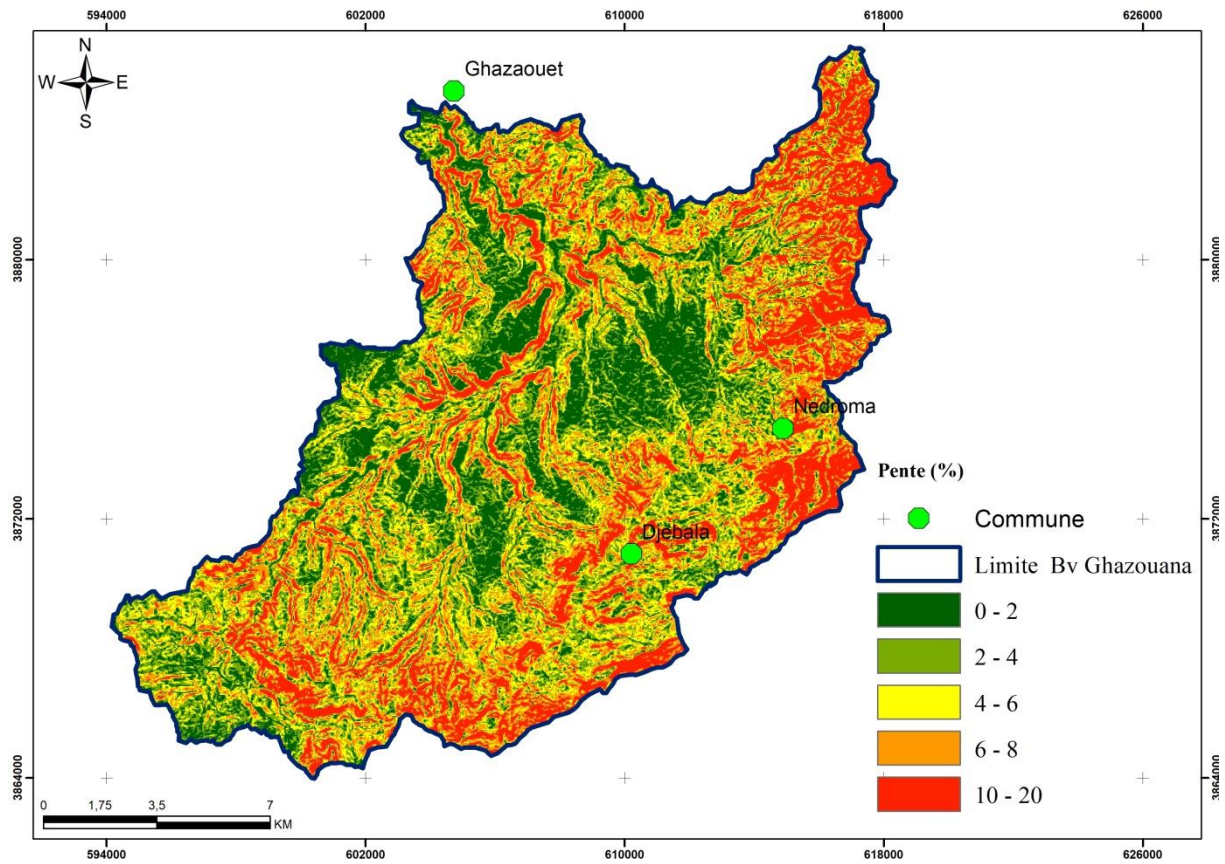


Figure V.9: Cartographie de la répartition des pentes (S) de Ghazouana

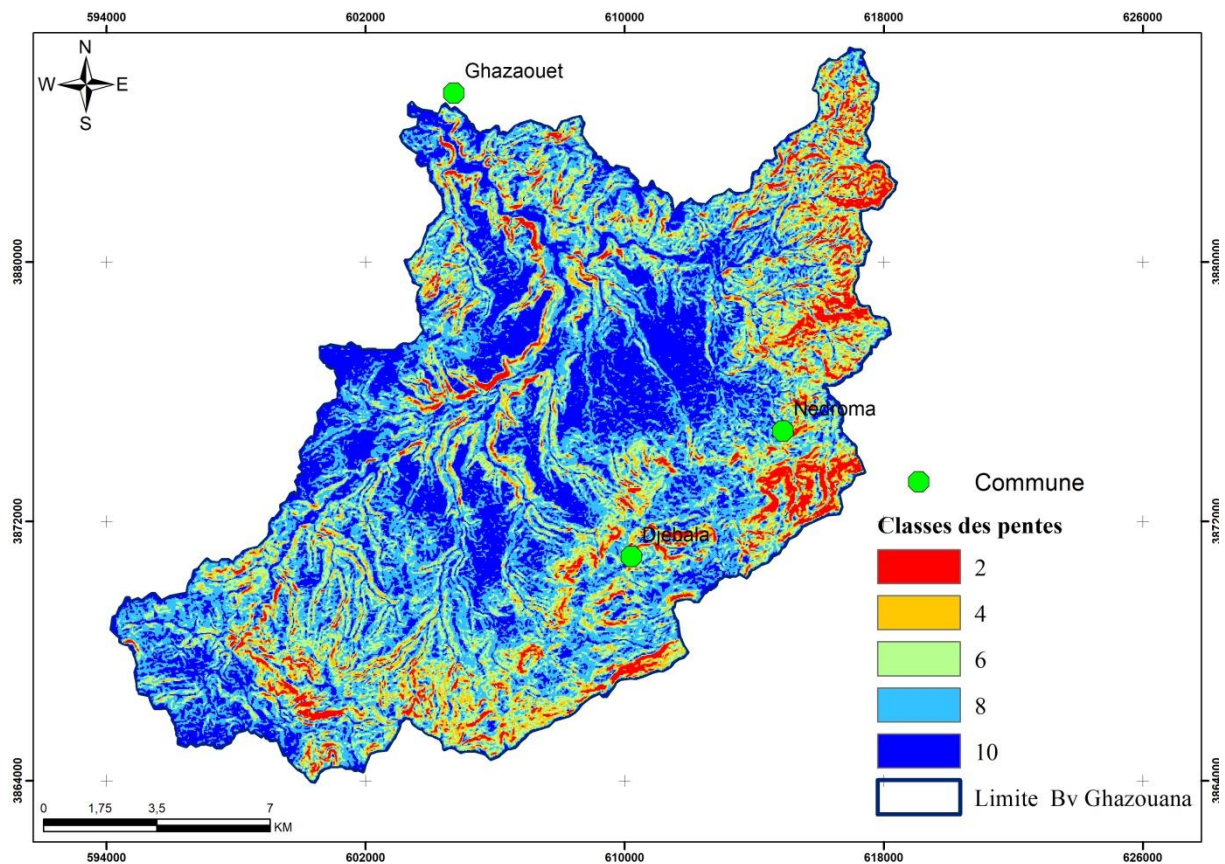


Figure V.10 : Répartition de l'indice de pente (S) dans le bassin de Ghazouana

V.2.6. Elévation (E)

La carte d'élévation a été générée à partir de la reclassification du Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin d'oued Ghazouana, comme illustré dans la figure V.11. Cette carte montre une augmentation de l'élévation Du Nord ouest au Sud Est variant de 250 m à plus de 1000 mètres (environs de Djebel Fillaoucène), mettant en évidence la nature abrupte de la partie sud-est du bassin.

Les zones de faible altitude se trouvent principalement dans la partie nord du bassin. Les classes d'altitudes comprises entre 6-250 mètres et 250-500 mètres représentent la plus grande partie de la surface du bassin, occupant respectivement 25% et 45% de la superficie totale. Cette répartition altitudinale offre des informations importantes sur la topographie du bassin d'oued Ghazouana. Les zones à basse altitude, principalement situées dans la partie nord, peuvent être des plaines ou des vallées où l'eau a tendance à s'accumuler. En revanche, les zones de haute altitude, telles que celles observées dans la partie Sud-Est, sont souvent associées à des reliefs montagneux ou accidentés, ce qui peut avoir un impact significatif sur les schémas de ruissellement, la distribution des précipitations et la vulnérabilité aux inondations dans la région.

La figure V.12, montre cinq classes d'élévation notées de 10 vers les zones montagneuses et de 2 vers les zones de plus faibles altitudes.

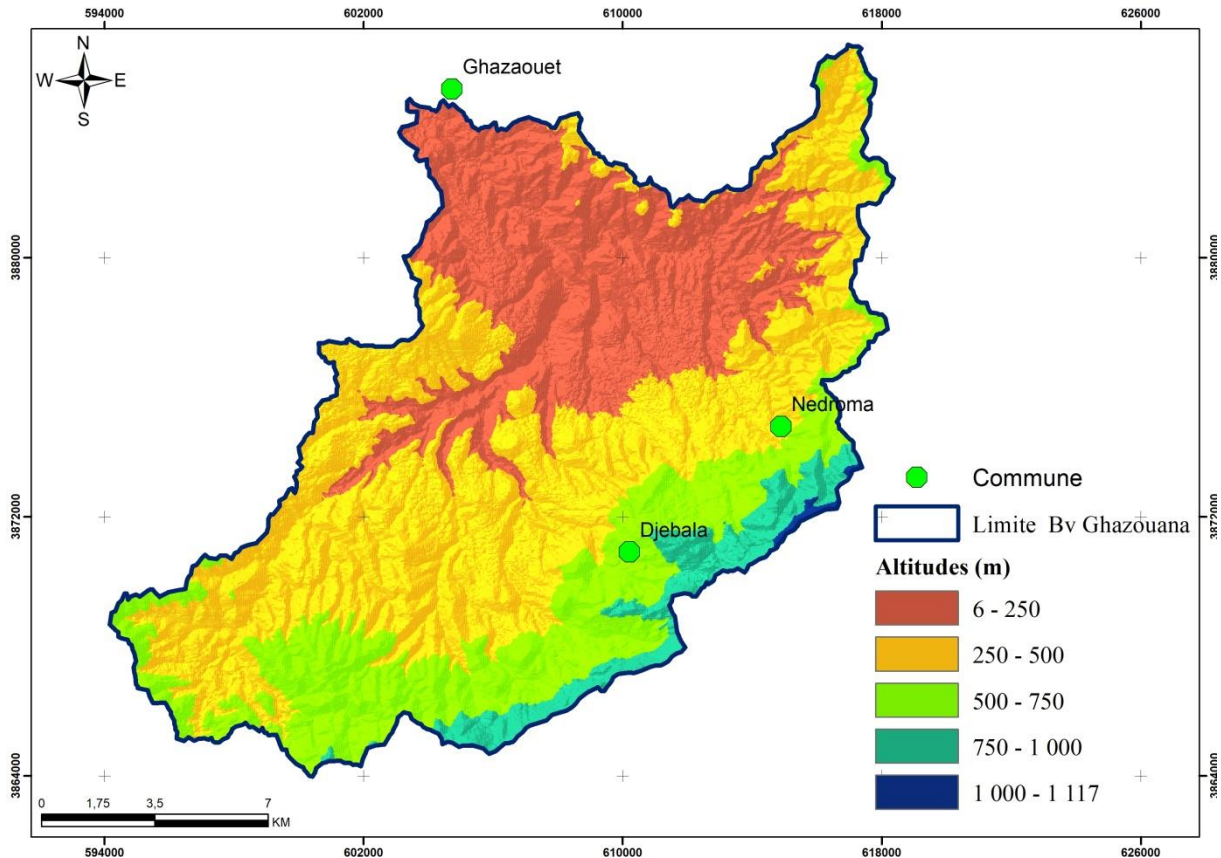


Figure V.11: Cartographie de la répartition des altitudes (E) de Ghazouana

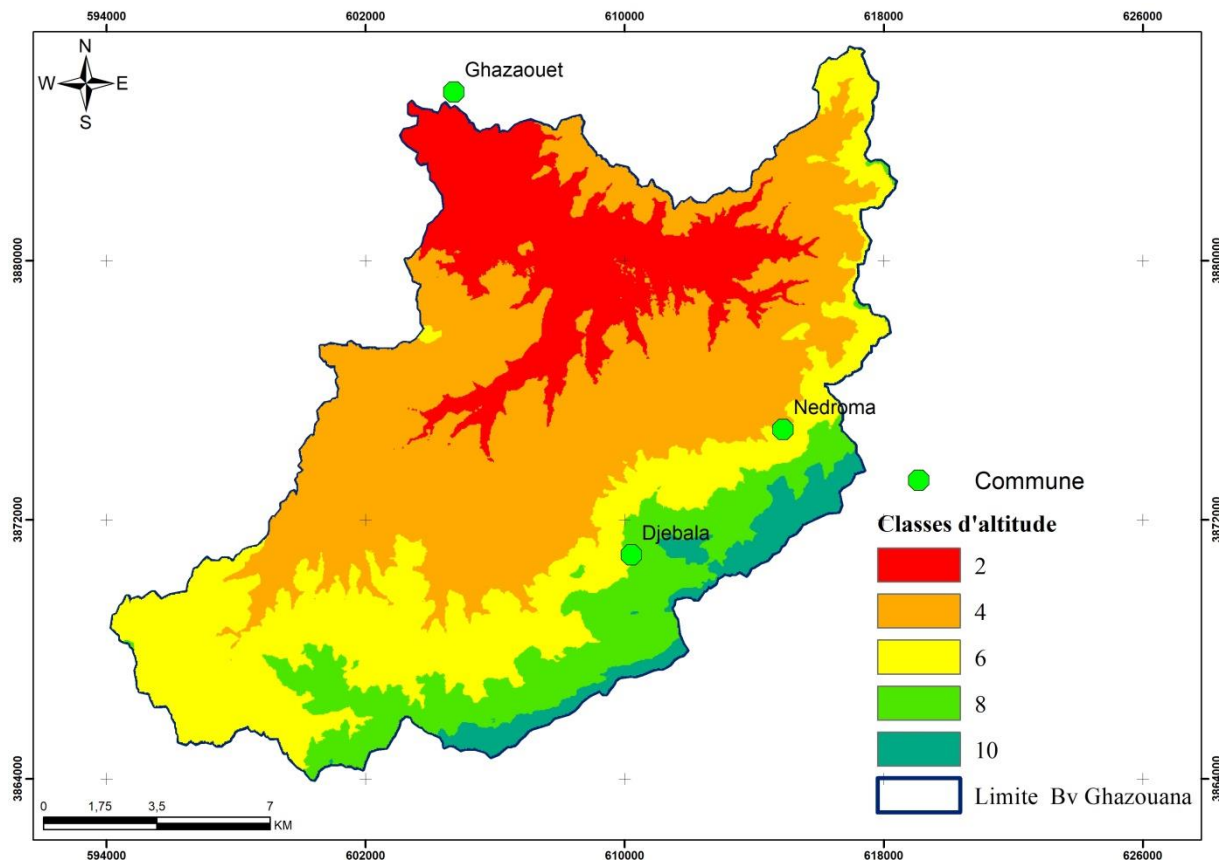


Figure V.12 : Répartition de l'indice d'élévation (E) dans le bassin de Ghazouana

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

Les débordements de rivières sont des événements pouvant entraîner des inondations, car l'eau déborde de son lit et se propage dans les zones avoisinantes. Cette propagation peut être causée par des précipitations abondantes, la fonte des neiges ou d'autres facteurs. La probabilité d'inondation diminue généralement à mesure que l'on s'éloigne du cours d'eau, car les zones les plus proches du réseau fluvial sont les plus exposées à ce risque. Cela est dû à la capacité de l'eau à se déplacer plus facilement le long du lit de la rivière et à s'étendre dans les plaines adjacentes en cas de crue. Ainsi, les zones riveraines sont souvent les plus vulnérables aux inondations, tandis que les régions plus éloignées peuvent présenter un risque moindre.

Dans notre étude (fig.V.13), les zones situées à proximité immédiate du réseau de drainage ont été définies comme celles se trouvant à moins de 200 mètres du cours d'eau, couvrant ainsi 12% de la superficie du bassin d'oued Ghazouana. Cependant, l'importance de ce critère diminue progressivement pour les distances supérieures à 1000 mètres, ces zones représentant alors 40% de la surface totale du bassin.

Cette approche prend en compte le principe selon lequel les zones les plus proches du réseau de drainage sont généralement les plus vulnérables aux inondations, car elles sont directement exposées aux débordements des cours d'eau. À mesure que l'on s'éloigne du cours

d'eau, l'impact des inondations diminue progressivement, car les terrains deviennent moins susceptibles d'être affectés par les débordements fluviaux directs. Ainsi, cette analyse permet de mieux comprendre la répartition spatiale du risque d'inondation dans le bassin d'oued Ghazouana, en identifiant les zones les plus exposées et celles présentant un risque moindre en fonction de leur proximité par rapport au réseau de drainage.

La figure V.14 représente les valeurs de l'indice de distance par rapport au réseau de drainage (D) dans le bassin d'oued Ghazouana. Cet indice évalue la proximité de chaque cellule de la grille par rapport au réseau de drainage, ce qui permet d'établir un lien entre la géométrie du réseau fluvial et la distribution spatiale des valeurs de l'indice.

Les valeurs les plus élevées de l'indice (D) sont observées à proximité immédiate des cours d'eau et des affluents, ce qui signifie que ces zones sont les plus proches du réseau de drainage. En conséquence, ces régions présentent un risque plus élevé d'inondation, car elles sont directement exposées aux débordements des rivières en cas de crue.

Par contre, à mesure que l'on s'éloigne du réseau de drainage, les valeurs de l'indice (D) diminuent, indiquant une réduction de la proximité par rapport aux cours d'eau. Ces zones plus éloignées du réseau fluvial sont généralement moins vulnérables aux inondations, car elles sont moins susceptibles d'être affectées par les débordements directs des cours d'eau.

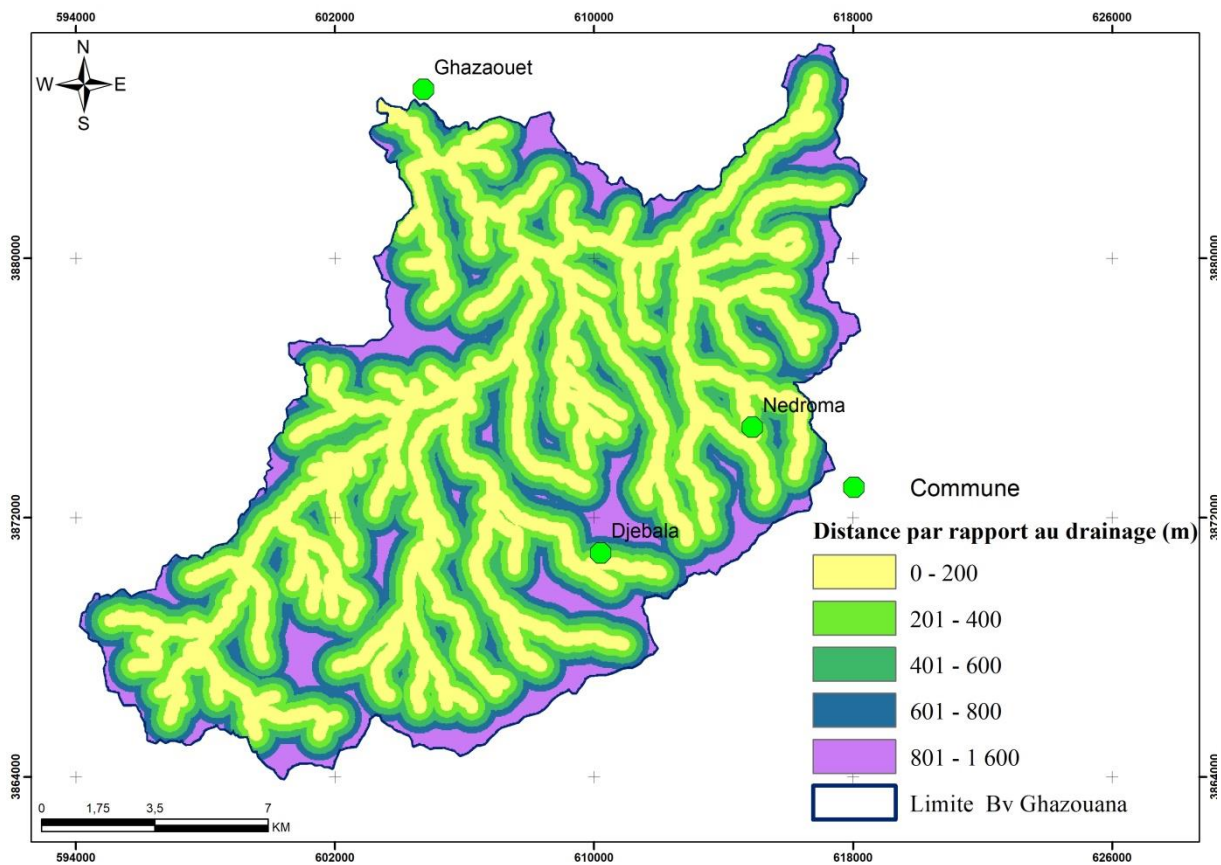


Figure V.13: Cartographie de la Distance par rapport au drainage (D) de Ghazouana

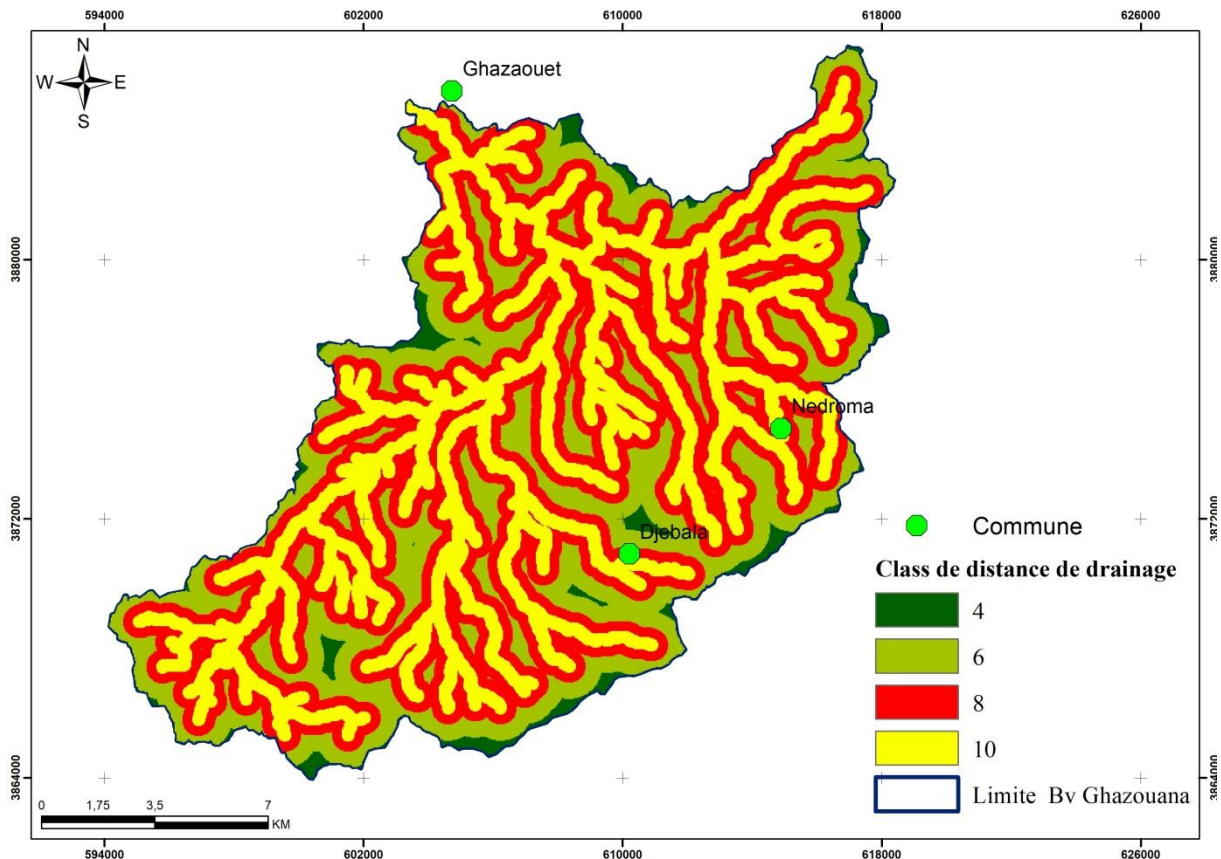


Figure V.14: Répartition de l'indice d'élévation (E) dans le bassin de Ghazouana

V.3. Interpolation des indices

La méthode FIGUSED analyse les paramètres géologiques et morphologiques, et leur attribue un poids relatif. Dans notre étude, chaque point de la grille a été évalué pour chacun des sept paramètres sur une échelle de 2 à 10, comme présenté dans le tableau V.1, indiquant également la zone correspondante et sa part. Les valeurs obtenues ont été traitées pour calculer l'importance relative de chaque critère et son facteur de pondération correspondant (w). Ces pondérations relatives ont été déterminées par un processus analytique hiérarchique (AHP), décrit en détail dans l'étude de Kazakis et al., (2015). Ensuite, l'outil de calcul matriciel du SIG a été utilisé pour superposer les paramètres évalués et ajuster les poids produits. En fonction des valeurs obtenues, une carte des risques d'inondation a été produite, où les sept paramètres ont influencé la superposition de la carte selon l'équation suivante :

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

Cette équation montre comment chaque paramètre contribue à l'élaboration de la carte des risques d'inondation en fonction de son poids relatif.

L'équation permet de quantifier l'importance relative de chaque paramètre dans la définition du risque d'inondation. Les paramètres d'élévation (E) et de distance par rapport au réseau de drainage (D) ont les poids les plus élevés dans cette équation, ce qui indique qu'ils sont les plus déterminants dans la prédiction du risque d'inondation.

- ❖ **Élévation (E)** : c'est un paramètre nécessaire et important car elle influence la direction du ruissellement et la concentration des eaux de crue. Les zones de faible altitude ont tendance à être plus sujettes aux inondations, en particulier lorsqu'elles sont proches du réseau de drainage, car elles sont plus susceptibles de recevoir les eaux de crue provenant des zones plus élevées.
- ❖ **Distance par rapport au réseau de drainage (D)** : La proximité du réseau de drainage est également un facteur déterminant. Les zones situées à proximité des cours d'eau sont plus exposées aux inondations en raison de la facilité avec laquelle l'eau peut s'écouler dans ces zones en cas de crue. Ainsi, les zones proches du réseau de drainage sont considérées comme présentant un risque plus élevé d'inondation.

D'autres paramètres comme l'accumulation de flux (F) et l'utilisation des terres (U) sont également importants dans la définition du risque d'inondation, bien que leur poids relatif soit moins élevé que celui de l'élévation et de la distance par rapport au réseau de drainage. L'accumulation de flux reflète la concentration des eaux de ruissellement dans certaines zones, tandis que l'utilisation des terres peut influencer la capacité du sol à absorber l'eau et à réduire le ruissellement.

Quant à l'intensité des précipitations (I) et le paramètre géologique (G) semblent avoir un poids moindre dans l'équation. Cela peut être dû au fait que, bien que ces facteurs puissent influencer les conditions hydrologiques, leur impact direct sur le risque d'inondation peut être moins prononcé que celui de l'élévation et de la proximité du réseau de drainage dans cette région spécifique.

V.4. Résultats

Le Tableau V.1 présente la répartition des zones du bassin de Ghazouana en fonction de leur niveau de risque d'inondation. Les données indiquent que seulement 12,91% de la surface totale du bassin est exposée à un risque d'inondation très élevé. De plus, une part supplémentaire de 26,12% du bassin présente un risque d'aléa élevé. Ainsi, plus de 39% de la superficie du bassin est soumise à un risque d'inondation élevé ou très élevé.

Par ailleurs, 32,50% de la zone du bassin présente un risque d'aléa modéré, suggérant une probabilité significative mais moins élevée d'inondation. Par contre, 19,80% de la superficie est exposée à un risque faible d'inondation.

Cependant, seulement 8,67% du bassin est soumis à des risques d'inondation très faibles. Cette proportion relativement faible indique que certaines parties du bassin présentent des conditions hydrologiques moins propices à l'inondation, ce qui peut être attribuable à des facteurs tels que l'altitude, la distance par rapport au réseau de drainage, ou d'autres caractéristiques géographiques qui réduisent le risque.

Nous notons donc la répartition inégale du risque d'inondation dans le bassin de Ghazouana, avec une prédominance des zones exposées à un risque élevé ou modéré, tandis que d'autres zones présentent des risques relativement faibles d'inondation. Ces résultats sont essentiels pour la planification et la mise en œuvre de mesures d'atténuation des risques dans la région.

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

Paramètre	Classes	Classement	Superficie (km ²)	Part (%)
F Accumulation de flux	0 - 14000	2	282,86	99,25
	14000 - 44000	4	1,43	0,50
	44000 - 128000	6	0,71	0,25
	128000 - 199000	8	0,00	0,00
	199000 - 400000	10	0,00	0,00
I Intensité des précipitations	<310	2	42,75	15,00
	310-325	4	32,78	11,50
	325-340	6	101,18	35,50
	340-355	8	79,80	28,00
	355-370	10	28,50	10,00
G Géologie	Alluvions fluviales récentes et les argiles	2	16,96	5,95
	Basaltes	4	102,03	35,80
	Alternances de marnes et de	6	64,61	22,67
	Calcaires allochtones	8	54,38	19,08
	Marnes miocènes	10	47,03	16,50
U Utilisation des terres	Eaux libres	2	8,24	2,89
	Forêts	4	0,00	0,00
	Terres agricoles et terrains nus	6	228,29	80,10
	Végétation minimale	8	32,43	11,38
	Végétation maximale	10	16,05	5,63
S Pente	0 - 2	10	51,32	18,01
	2 - 4	8	38,19	13,4
	4 - 6	6	85,5	30
	6 - 8	4	31,92	11,2
	10 - 20	2	78,06	27,39
E Élévation	6 -250	2	65,55	23,00
	250 - 500	4	108,30	38,00
	500-750	6	54,15	19,00
	750-1000	8	34,20	12,00
	1000-1117	10	23,66	8,30
D Distance par rapport au drainage	<200	10	161,60	56,70
	200-400	8	60,42	21,20
	400-600	6	45,60	16,00
	600-800	4	17,39	6,10
	800-1600	2	0,00	0,00
FIGUSED Risque d'inondation	20-60	Très faible	24,71	8,67
	60-90	Faible	56,43	19,80
	90-130	Modéré	92,63	32,50
	130-170	Elevé	74,44	26,12
	170-205	Très élevé	36,79	12,91

L'établissement de la carte des risques d'inondation du bassin de Ghazouana (fig.V.15), résultant de la superposition pondérée des critères analysés, met en évidence plusieurs observations significatives. Tout d'abord, la carte révèle que les zones présentant un risque d'inondation élevé ou très élevé se trouvent principalement dans les régions proches du réseau de drainage, en particulier aux altitudes les plus basses.

Cette répartition spatiale du risque d'inondation est en grande partie attribuable à la topographie et à la proximité des cours d'eau. Les basses altitudes sont naturellement plus vulnérables aux inondations, car l'eau a tendance à s'accumuler dans ces zones lors de fortes précipitations ou de crues. De plus, la proximité des cours d'eau accroît le risque d'inondation car ces zones sont directement exposées aux débordements des rivières et des affluents.

Aussi, la carte met en évidence une corrélation étroite entre le réseau de drainage et les zones à risque d'inondation. Les zones les plus à risque sont effectivement situées près des cours d'eau, où les conditions hydrologiques favorisent les inondations en cas de crue.

Il est important de souligner l'impact de l'urbanisation dans les zones à risque, notamment au niveau de la ville de Ghazaouet. Cette urbanisation accrue aggrave souvent les risques d'inondation, car les surfaces imperméabilisées telles que les routes, les bâtiments et les parkings limitent l'infiltration de l'eau dans le sol, augmentant ainsi le ruissellement et la probabilité d'inondation.

Par conséquent, il est impératif que les mesures d'atténuation des inondations commencent précisément dans ces zones urbaines à risque élevé. Ces mesures devraient être conçues pour renforcer la résilience des zones habitées face aux inondations, en tenant compte des infrastructures existantes, de la densité de population et des activités économiques.

Cela pourrait impliquer des stratégies telles que la construction de systèmes de drainage efficaces pour évacuer rapidement l'eau de pluie et la régulation de l'expansion urbaine pour éviter la construction dans les zones à haut risque d'inondation.

Nos résultats sont en accord avec ceux de Benmia (2013), confirmant que les zones à risque d'inondation se situent principalement au Nord-ouest du bassin, à proximité de l'exutoire principal.

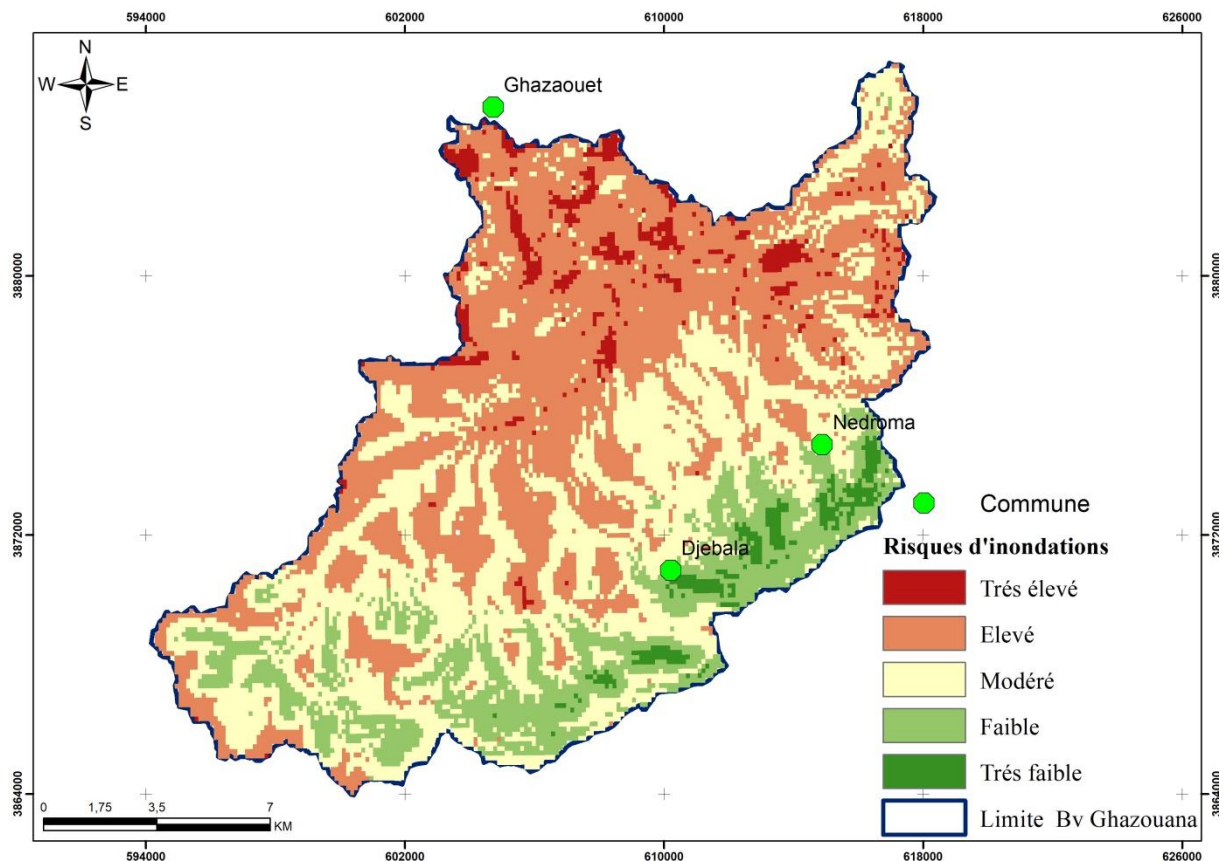


Figure V.15: Carte du risque d'inondation du bassin versant de Ghazouana par la méthode FIGUSED

V.5. Conclusion

La méthode FIGUSED appliquée au bassin versant de l'oued Ghezouana situé au Nord ouest algérien montre que seulement 8.67% des zones sont classées comme non sensibles aux inondations. En outre, 19.80% des zones sont considérées comme peu sensibles, 32.50% comme moyennement sensibles, 26.12% comme sensibles, et 12,91% sont classées comme très sensibles aux inondations.

Cette méthode peut être appliquée au niveau national avec d'autres bassins versants, en raison de l'augmentation de l'intensité des événements climatiques et des activités anthropiques, qui ont un impact direct sur les inondations. L'évaluation des risques d'inondation, en corrélant divers paramètres tels que les changements d'occupation du sol, les emplacements historiques des crues et les zones affectées par la torrencialité, constitue un outil essentiel pour la gestion des bassins versants. Cela permet de développer des stratégies de prévention efficaces pour réduire les pertes en vies humaines et les dommages aux activités socio-économiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les inondations sont des phénomènes naturels dévastateurs ayant des impacts considérables sur les populations, les infrastructures et l'environnement. Leur survenue est fréquemment associée à divers facteurs tels que les fortes précipitations, la fonte des neiges, les tempêtes tropicales, ou encore les changements climatiques. Les conséquences des inondations sont multiples et affectent divers aspects de la vie quotidienne.

L'étude menée sur le risque d'inondation et l'application de la méthode FIGUSED au bassin versant de l'oued Ghazouana a permis d'aboutir à plusieurs conclusions importantes concernant la gestion des risques hydrologiques dans cette région.

Le bassin versant de l'oued Ghazouana, également appelé oued Tleta par les habitants de Ghazaouet, fait partie des bassins côtiers oranais et se situe au Nord-ouest de l'Algérie, s'étendant sur 285 km². Il se caractérise par une forme allongée et un relief fortement accidenté. Son coefficient de torrencialité relativement élevé indique une tendance marquée à générer des écoulements rapides. Avec un temps de concentration assez court d'environ 3 heures, le bassin versant réagit rapidement aux précipitations, ce qui peut entraîner des crues soudaines en cas de fortes pluies.

L'analyse des interactions entre les précipitations et les débits dans le bassin versant de Ghazouana fournit des informations précieuses sur les mécanismes hydrologiques de la région. Le bassin, situé dans une zone au climat semi-aride, a enregistré une moyenne annuelle de précipitations de 365.5 mm au cours de la période allant de 1971/72 à 2022/2023. La température moyenne y est d'environ 19°C avec une tendance vers la hausse de 0,03°C. Le débit moyen (module) calculé pour les dernières décennies est de 0,24 m³/s. Ces données indiquent que, malgré le climat semi-aride, le bassin présente des écoulements significatifs, influencés par la variabilité des précipitations et les caractéristiques physiques du bassin.

La relation exponentielle observée entre les précipitations et les débits dans le bassin versant de Ghazouana indique que les débits augmentent de manière non linéaire avec l'augmentation des précipitations. Cette tendance est cohérente avec des phénomènes hydrologiques tels que la saturation du sol et l'augmentation du ruissellement une fois qu'un certain seuil de précipitations est dépassé. Lorsque le sol atteint sa capacité maximale de rétention d'eau, toute précipitation supplémentaire ne peut être absorbée, entraînant ainsi un ruissellement de surface plus important. Cette dynamique explique pourquoi de petites augmentations des précipitations peuvent entraîner des augmentations disproportionnées des débits, particulièrement lors d'épisodes de fortes pluies.

De là, nous comprenons que bien que les précipitations jouent un rôle important dans la détermination des débits des cours d'eau, une compréhension exhaustive des débits nécessite de considérer une multitude de facteurs hydrologiques et climatiques. En plus des précipitations, des éléments tels que la saturation du sol, l'évapotranspiration, les caractéristiques topographiques, la géologie, la végétation, et les pratiques d'utilisation des

terres influencent significativement les débits des oueds. Par exemple, un sol déjà saturé par de précédentes précipitations augmentera le ruissellement et, par conséquent, les débits. De même, des températures élevées peuvent accroître l'évaporation, réduisant ainsi la quantité d'eau disponible pour l'écoulement. La topographie et la forme du bassin versant affectent également la vitesse à laquelle l'eau se déplace vers les cours d'eau. Par conséquent, une évaluation complète des débits nécessite une approche intégrée qui tienne compte de l'ensemble de ces facteurs interconnectés.

Ces résultats renforcent notre conviction de recourir à des méthodes de cartographie, telles que la Méthode FIGUSED, pour intégrer les divers paramètres influençant la répartition des flux dans le bassin versant. En utilisant ces techniques de cartographie, nous avons pu obtenir une compréhension plus approfondie des dynamiques spatiales des écoulements et identifier les zones à haut risque d'inondation.

L'application de la méthode FIGUSED au bassin versant de l'oued Ghazouana, a révélé que seulement 8,67 % des zones sont classées comme non sensibles aux inondations. En revanche, 19,80 % des zones sont considérées comme peu sensibles, 32,50 % comme moyennement sensibles, 26,12 % comme sensibles, et 12,91% sont classées comme très sensibles aux inondations.

Ces résultats démontrent la variabilité de la vulnérabilité aux inondations au sein du bassin versant, mettant en lumière l'importance d'une évaluation détaillée des risques. La méthode FIGUSED, en prenant en compte des facteurs tels que la l'accumulation du flux, l'intensité des précipitations, la géologie, l'utilisation des terres, les pentes, la topographie et la distance par rapport au drainage a permis de cartographier précisément les zones à risque.

Cette approche peut être étendue à d'autres bassins versants au niveau national, particulièrement en raison de l'augmentation de l'intensité des événements climatiques et des activités anthropiques, qui influencent directement les risques d'inondation. En intégrant divers paramètres tels que les changements d'occupation du sol, les antécédents historiques des crues et les zones affectées par la torrencialité, l'évaluation des risques d'inondation devient un outil indispensable pour la gestion intégrée des bassins versants.

L'utilisation de la méthode FIGUSED nous a aidé à comprendre les dynamiques hydrologiques actuelles au niveau du bassin ce qui facilitera le développement de stratégies de prévention efficaces, visant à réduire les pertes en vies humaines et à minimiser les dommages aux infrastructures et aux activités socio-économiques. En outre, cette approche favorise une planification urbaine et rurale plus résiliente, capable de mieux faire face aux défis posés par les changements climatiques et les pressions anthropiques croissantes.

Les résultats obtenus grâce à l'application de la méthode FIGUSED au bassin versant de l'oued Ghazouana montrent une répartition significative des zones sensibles aux inondations. Seulement 8,67 % des zones sont considérées comme non sensibles, tandis qu'un pourcentage substantiel de plus de 62% de la superficie totale est classé à risque élevé à très élevé aux inondations. Ces données mettent en évidence une vulnérabilité élevée dans une grande partie du bassin versant, suggérant des risques importants pour les populations et les infrastructures

locales. La prévention, la préparation et la gestion des inondations doivent être des priorités avec la modélisation et la cartographie afin de réduire les risques, de protéger les vies humaines, de préserver les biens et de favoriser la résistance face à ces événements naturels dévastateurs.

Pour faire face à ces défis, nous proposons de :

- Renforcer les mesures au niveau du bassin,
- Incorporer des projections climatiques futures pour anticiper l'impact des changements climatiques sur la fréquence et l'intensité des inondations.
- Mettre en place des systèmes d'alerte pour informer les populations en temps réel des risques d'inondation imminente.
- Développer des modèles de prévision qui intègrent les données météorologiques et hydrologiques pour prévoir les débits de nos oueds et les risques de crue.
- Investir dans des infrastructures de protection contre les inondations, telles que des bassins de rétention, des digues, etc.
- Promouvoir des pratiques de gestion des sols et de reforestation pour améliorer la capacité de rétention d'eau et réduire le ruissellement.
- Mettre en place des décrets politiques qui limitent les constructions dans les zones à haut risque et encourager des pratiques de construction résistantes.
- Adopter une approche intégrée, combinant des mesures de prévention, de gestion et de sensibilisation, tout en s'appuyant sur des outils et des méthodes scientifiques robustes comme la méthode FIGUSED.
- Développer et appliquer des solutions basées sur les meilleures pratiques et les dernières avancées scientifiques.

En raison de son efficacité démontrée, la méthode FIGUSED peut être appliquée à d'autres bassins versants en Algérie. Cela permettrait une évaluation uniforme et détaillée des risques d'inondation à l'échelle nationale.

Références bibliographiques

- ANRH (2005).** Carte du réseau hydro-climatologique et la surveillance de la qualité des eaux.
- Ballais, J.-L., Chave, S., Delorme-Laurent, V. & Esposito, C. (2007).** Hydro géomorphologie et inondable. *Revue Géographie physique et Quaternaire*, 61(1), 75–84 pp. <https://doi.org/10.7202/029571ar>
- Barroca B., Bernardara P., Mouchel J. M., & Hubert G. (2006).** Indicators for identification of urban flooding vulnerability. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- Benmia K., (2013).** Evaluation de la performance des barrages de protection contre les inondations. Cas de la ville de Ghazaouet, Magister Hydraulique Université Tlemcen. 181p.
- Berbar A., Guemmou B., (2006).** Protection de la ville de Ghazaouet contre les inondations. Mémoire Ingénieur d'Etat Hydraulique, Université Tlemcen 119p.
- Bergui A., (2012).** Étude hydrologique et hydraulique du bassin versant de l'Ardèche : réalisation des cartes des zones .Projet de fin d'Etudes. Sciences de l'Ingénieur [physics]. ffdumas-01654929f
- Blin, P., Leclerc, M., Secreta, Y., Morse, B., (2005).** Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec. *Revue des Sciences de l'Eau*, 18(4): 427-451.
- Bolstad P., (2006).** GIS Fundamentals.5. Edition.US: Xan-Edu.546 p. ISBN-13 :978-150 66 9 5877.
- 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.
- Boulghobra N (2006).** Protection de la ville de Skikda contre l'inondation. Magister Aménagement des milieux physiques,
- Brivio, P.A., Colombo, R., Maggi, M., Tomasoni, R., (2002).** Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas.*International Journal of RemoteSensing*, 23(3): 429-441.
- Chachoua A., (2010).** Gestion de crue dans un bassin versant. Etude hydrologique, hydraulique et aménagement. Mémoire Magister Hydraulique. Université Tlemcen. 2010.Option : Ecoulements et transport solide 123p.
- Chakhar Salem., (2006).** Cartographie décisionnelle multicritère: formalisation et implémentation informatique .Université Paris Dauphine-Paris IX, 2006.

Damien R. (2003). Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine » Thèse Doctorat ; Science de l'eau dans l'Environnement. Université Montpellier II. 216p.

Defrance B., (2009). Plan de prévention naturel d'inondation (PPRNI) Brévenne – Turdine , Compte-rendu de 1ère réunion publique le 1ere octobre 2009 à Tarare ; chef du service Environnement Risque et Développement durable SERDD-(2009)

.Demek J. (1972): Manual of Detailed Geomorphological Mapping, Academia: San Francisco, CA, USA.

Desbordes M., (1997). La gestion urbaine du risque d'inondation : problématique et enjeux. La Houille Blanche, 1997, vol. 7, p. 20-24

Ducrot F., (2008). Qu'est-ce que la modélisation mathématique ?. France : Université Angers. Départements mathématiques.

Estupina. B. (2006). Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France. Thèses Doctorat, Sciences de l'université de Montpellier II.

Fenet, B., (1975). Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'orogène, Nord Maghrébin. Les monts de Djebel Tessala et les massifs du Littoral oranais. Thèse Doctorat d'Etat. Univ, Nice (France), 301p.

Fiorillo E. Issa H. Rocchi L et Tarchiani V., (2015). Manuel de la base de données des inondations. Rapport N° 5. Projet Adaptation au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire Anadia Niger Projet Adaptation Au changement climatique, prévention des catastrophes et Développement agricole pour la sécurité Alimentaire. 37 p.

Freddy V., (2010). Les risques inondation diagnostique et gestion. Edition TEC AND DOC Lavoisier.

Gautier, E.F., (1922). Structure de l'Algérie, Société d'éditions géographiques et scientifique France, 248p.

Gendreau N., Longhini M., Combe P.-M. (1986). Gestion du risque d'inondation et méthode inondabilité : une perspective socio-économique. Ingénieries EAT, 1998b, vol. Vol. 14, p. 3-14

Giustarini, L. et al., (2011). Assimilating SAR-derived water level data into a hydraulic model: A case study. Hydrology and Earth System Sciences, 15(7): 2349-2365.

Guardia, P., (1975). Géodynamique de la marge alpine du continent africain d'après l'étude de l'Oranie nord –occidentale. Relations structurales et paléogéographiques entre le Rif externe, le Tell et l'avant pays atlasique, Thèse Sc. Univ, Nice (France), 289p

Henry, J.B., (2004). Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine, Thèse de Doctorat, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur - Strasbourg I. 238 pages, 238 pp.

Hess, L.L., Melack, J.M., Filoso, S., Wang, Y., (1995). Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 33(4): 896-904.

Horritt, M.S., Mason, D.C., Cobby, D.M., Davenport, I.J., Bates, P.D., 2003. Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 85(3): 271-281.

Hostache, R., Puech, C., Raclot, D., (2005). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeo: European Journal of Geography, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005 (article 381).*

Hostache, R. et al., (2009). Water level estimation and reduction of hydraulic model calibration uncertainties using satellite SAR images of floods. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(2): 431-441.

Huang et coll., (1998) , Yuantu Huang , Patrick Wong , Tom Gedeon, Interpolation spatiale utilisant un raisonnement flou et des algorithmes génétiques. *J. Géogr. Inf. Décis. Anal. , 2 (2) (1998) , pages 204 à 214*

Karimou Barké M., Ousseini I., Biolders C., JEAN-MARIE AMBOUTA K., TYCHON B. (2017). Caractérisation morphologique des cuvettes oasiennes du Centre-Est du Niger. *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement. Vol. 11. p. 255-276. DOI: 10.4000/physio-geo.5607.*

Kazakis N., Kougiass I., Patsialis T., (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.*

Lang, PJ, Bradley, MM et Cuthbert, BN (2008). Système international d'images affectives (IAPS) : évaluations affectives des images et manuel d'instructions. Rapport technique A-8, Gainesville, FL : Université de Floride.

Ledoux B., (2005) La gestion du risque inondation. Edition TEC AND DOC Lavoisier 2006.

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*

L'Homme, J., (2006). Modélisation des inondations en milieu urbain: approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 298 pages pp.

Marti-Cardona, B., Lopez-Martinez, C., Dolz-Ripolles, J., Bladè-Castellet, E., (2010). ASAR polarimetric, multi-incidence angle and multitemporal characterization of Doñana wetlands for flood extent monitoring. *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2802-2815.

Mallinis, G., Gitas, I.Z., Giannakopoulos, V., Maris, F., Tsakiri-Strati, M., (2011). An object based approach for flood area delineation in a transboundary area using ENVISAT ASAR and LANDSAT TM data. *International Journal of Digital Earth*: 1-13

Mason, D.C., Schumann, G.J.P., Neal, J.C., Garcia-Pintado, J., Bates, P.D., (2012) automatic near real-time selection of flood water levels from high resolution Synthetic Aperture Radar images for assimilation into hydraulic models: A case study. *Remote Sensing of Environment*, 124: 705-716

Matgen, P., Schumann, G., Henry, J.B., Hoffmann, L., Pfister, L., (2007). Integration of SAR-derived river inundation areas, high-precision topographic data and a river flow model toward near real-time flood management. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9(3): 247-263.

Megartsi, M., (1985). Le volcanisme Mio-Plio-Quaternaire de l'Oranie nord –occidentale. *Géologie, pétrologie et géodynamique*, Thèse Doctorat d'Etat, USTHB (Alger), 296p.

Patrikaki O., (2009). Hydrogeological Research of Potamia Basin, in Kozani Prefecture, in Northern Greece. Ph.D. Thesis, Department of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece. (In Greek)

Patrikaki O., Kazakis N., Kougiass I., Patsialis 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.

Régis, Caloz et Claude, Collet (2011). Analyse spatiale de l'information géographique. Lausanne. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes .Collection Ingénierie de l'Environnement.p383

Schumann, G., Di Baldassarre, G., Bates, P.D., (2009). The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 47(8): 2801-2807.

Schumann, G.J.P., Neal, J.C., Mason, D.C., Bates, P.D., (2011). The accuracy of sequential aerial photography and SAR data for observing urban flood dynamics, a case study of the UK summer 2007 floods. *Remote Sensing of Environment*, 115(10): 2536-2546.

Serraoui, Lamine ; Mammeri, Salah et Bouamran W., A. (2018) Modélisation et cartographie du risque d'inondation en milieu urbain. Mémoire De Fin D'étude : Département De Hydraulique Et Génie Civile.

Townsend A., & Stephen J. (2018). Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing Walsh Department of Geography, University of North Carolina.

Van der Sande, C.J., De Jong, S.M., De Roo, A.P.J., (2003). A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 4(3): 217-229.

Webographie

- [1] <https://www.rtl.fr/actu/meteo/meteo-france-3-departements-en-vigilance-orange-pour-des-risques-d-inondations-7800218266> consulté le 06/02/2024.
- [2] <https://www.algerie360.com/20201110-10-novembre-2001-il-y-a-19-ans-bab-el-oued-etait-inonde/> consulté le 06/02/2024.
- [3] [Innondation de Ghardaïa \(ouadmzab\) 11 photo et image | africa, northafrica, algeria Images fotocommunity](#) consulté le 06/02/2024.
- [4] <https://books.openedition.org/septentrion/15686> consulté le 06/02/2024.
- [5] <https://books.openedition.org/septentrion/15682>. consulté le 11/02/2024.
- [6] <https://www.construction21.org/belgique/articles/h/alea-d-inondations-etudeshydrauliques.html> consulté le 12/02/2024.
- [7] [/https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview](https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview) consulté le 20/02/2024.

ملخص

مخاطر الفيضانات هي ظواهر طبيعية أو اصطناعية تؤدي إلى غمر مساحة ما بالمياه بشكل مؤقت.

يهدف هذا العمل إلى تحديد المناطق المعرضة لخطر الفيضانات بمجمع وادي غزوانة لحماية مدينة الغزوات من الفيضانات. يقع هذا الحوض في الشمال الغربي من الجزائر ويمتد على مساحة 285 كلم²، ويتميز بتضاريسه الوعرة ومنحدراته الشديدة وارتفاعاته التي تتراوح ما بين 250 إلى 1100 متر وتفضل هذه التضاريس التدفقات السريعة وردود الفعل الفورية للفيضانات.

FUGESD طريقة تم استخدامها لتحليل هذه الخصائص، مع الأخذ في الاعتبار عوامل مثل تراكم التدفق واستخدام

الأراضي والجيولوجيا والانحدار وكثافة هطول الأمطار والارتفاع والمسافة بالنسبة لشبكة الصرف الصحي .

إن التراكم الموزون للمعايير جعل من الممكن إنشاء خريطة مخاطر الفيضانات، مما يكشف أن المناطق ذات المخاطر العالية والعالية جداً تقع بشكل رئيسي بالقرب من شبكة الصرف الصحي وفي المناطق المنخفضة، خاصة حول ملتقى وادي ثلاثة وتايم

توفر النتائج التي تم الحصول عليها أساساً مثيراً لتخطيط وتنفيذ استراتيجيات الوقاية، التي تهدف إلى تقليل آثار الفيضانات على حياة البشر والأنشطة الاجتماعية والاقتصادية في المنطقة

الكلمات المفتاحية: الغزوات، غزوانة، مخاطر الفيضانات، الفيضانات، رسم الخرائط.

Résumé

Les risques d'inondations sont des phénomènes naturels ou artificiels qui entraînent la submersion temporaire d'un espace par de l'eau.

Ce travail a pour objectif de déterminer les zones à risque d'inondation dans le bassin versant d'oued Ghazouana pour la protection de la ville de Ghazaouet contre les inondations. Ce bassin est situé dans le Nord ouest algérien et s'étend sur une superficie de 285 km², il est caractérisé par un relief accidenté avec des pentes abruptes et des altitudes variant de 250 à 1100 mètres. Cette topographie favorise des écoulements rapides et des réactions immédiates aux crues. La méthode FIGUSED a été utilisée pour analyser ces caractéristiques, en prenant en compte des paramètres tels que l'accumulation de flux, l'utilisation des terres, la géologie, la pente, l'intensité des précipitations, l'altitude et la distance par rapport au réseau de drainage.

La superposition pondérée des critères a permis de créer une carte des risques d'inondation, révélant que les zones à risque élevé et très élevé sont principalement situées près du réseau de drainage et dans les zones de faible altitude, en particulier autour de la confluence des oueds Tlata et Taima.

Les résultats obtenus offrent une base solide pour la planification et la mise en œuvre de stratégies de prévention, visant à minimiser les impacts des inondations sur les vies humaines et les activités socio-économiques de la région.

Mots clés : Ghazaouet, Ghazouana, Risque d'inondation, crue, FIGUSED, Cartographie.

Abstract

Flood risks are natural or artificial phenomena which result in the temporary submergence of a space by water.

This work aims to determine the areas at risk of flooding in the Oued Ghazouana watershed for the protection of the town of Ghazaouet against flooding. This basin is located in the northwest of Algeria and extends over an area of 285 km², it is characterized by rugged relief with steep slopes and altitudes varying from 250 to 1100 meters.

This topography favors rapid flows and immediate reactions to floods. The FIGUSED method was used to analyze these characteristics, taking into account parameters such as flow accumulation, land use, geology, slope, precipitation intensity, altitude and distance per relation to the drainage network.

The weighted overlay of the criteria created a flood risk map, revealing that high and very high risk areas are mainly located near the drainage network and in low-lying areas, particularly around the confluence of rivers. Tlata and Taima wadis.

The results obtained provide a solid basis for the planning and implementation of prevention strategies, aimed at minimizing the impacts of flooding on human lives and socio-economic activities in the region.

Keywords: Ghazaouet, Ghazouana, Flood Risk, Flood, FIGUSED, Mapping