



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : SCIENCES

DEPARTEMENT : SCIENCES AGRONOMIQUES

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : BENYOUCEF WAFA

DOMAINE : SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE (SNV)

FILIERE : SCIENCES AGRONOMIQUES

OPTION : PROTECTION DES VEGETAUX

Thème

« Contribution du S.I.G et de la télédétection à haute résolution à l'étude des risques d'inondation des terres agricoles de la vallée de HAMDA de la région de Laghouat (ALGÉRIE). »

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr.BEN HASSINE Mohammed	M.C.A	Président
Mr.ROUIGHI Taher	M.C.A	Examineur

Promotion : septembre - 2021

Dédicace

♣ ...Avec un très grand plaisir je dédie ce travail à ... ♣ :

A mes chers parents, ma mère Amoura, et mon père Mammar

pour leur patience, leur amour, leur soutien

A mes sœurs Baya et Meriem pour ses encouragements

*A mes frères, tous pour leur patience, leur amour,
Leur soutien.*

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le
dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

*Je remercie beaucoup la femme de mon frère Fatima pour son
aide et ses encouragements*

Et aussi à mes neveux, Chaker & El Amie Fayal

*Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour
mon éducation et ma formation.*

A tout(e)s mes ami(e)s de la Spécialité agronomie bien être.

A Toute la famille paternelle BenYoucef

A ceux que j'aime et surtout qui m'aiment

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah tout puissant qu'il nous a guidé tout au long de nous vie, qu'il nous a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, qu'il nous a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui.

Un travail de recherche, nécessite le concours d'un certain nombre de personnes. Ce mémoire est aujourd'hui l'occasion de remercier toutes les personnes qui ont collaboré à ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier l'encadreur Mr Benchatoh Ahmed . pour avoir dirigé notre projet de fin d'étude.

Nous remercions par ailleurs vivement les membres de nous avoir fait l'honneur de juger notre travail et d'assister à la soutenance.

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

Je remercie également mon ami Mohamed Lamine Ben Djemai de m'avoir aidé tout au long de mon parcours universitaire, merci.

Merci en fin à tous les enseignants dans notre carrière d'étude, collègues, amis et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin pour que ce travail voie la lumière.

RESUME :

La cartographie des risques d'inondation, via des outils spatiaux des SIG et de la télédétection, est essentielle pour la planification des futures activités de développement. Dans la présente étude, après la préparation d'un inventaire des inondations de la zone d'étude, sept facteurs ainsi que leurs sous-facteurs de données de pondération ont été étudiés pour une analyse intégrée du risque d'inondation dans le bassin versant de l'oued M'zi. Les cartes factorielles produites ont été pondérées avec la méthode multicritère AHP. Selon les jugements apportés au niveau de la matrice de comparaison, on révèle les constations suivantes: les facteurs précipitations et perméabilité contribuent davantage au phénomène d'inondation du bassin versant avec un pourcentage pondérale du poids normalisé de 39 % et 22 % respectivement. Elles sont suivies, respectivement, par le facteur altitude (15%), géologie de terrain (11 %). L'occupation du sol et couverture pédologique, la densité de drainage et la pente sont impliquées à faibles valeurs dans le phénomène d'inondation avec 7%, 4% et 3%, respectivement.

Mots clés : Cartographie, inondation, SIG et Télédétection, bassin versant , l'oued M'zi, AHP.

Abstrect:

Flood risk mapping, using spatial GIS and remote sensing tools, is essential for planning future development activities. In the present study, after the preparation of a flood inventory of the study area, seven factors along with their weighting data sub-factors were investigated for an integrated flood risk analysis in the watershed of Wadi M'zi. The factor maps produced were weighted using the AHP multicriteria method. According to the judgments made at the level of the comparison matrix, the following observations are revealed: the precipitation and permeability factors contribute more to the flooding phenomenon of the watershed with a weight percentage of the normalized weight of 39% and 22% respectively. They are followed, respectively, by the altitude factor (15%), terrain geology (11%). Land cover and soil cover, drainage density and slope are implicated at low values in the flooding phenomenon with 7%, 4% and 3%, respectively.

Keywords: Mapping, flooding, GIS and Remote sensing, M'zi wadi watershed, AHP.

يعد رسم خرائط مخاطر الفيضانات ، باستخدام نظم المعلومات الجغرافية المكانية وأدوات الاستشعار عن بعد ، أمراً ضرورياً لتخطيط أنشطة التنمية المستقبلية. في هذه الدراسة ، بعد إعداد جرد الفيضان لمنطقة الدراسة ، تم فحص سبعة عوامل إلى جانب العوامل الفرعية لبيانات الترتيب من أجل تحليل مخاطر الفيضانات المتكامل في مجمعات مياه وادي مزي. تم ترتيب خرائط العوامل المنتجة باستخدام طريقة AHP متعددة المعايير. وفقاً للأحكام التي تم إجراؤها على مستوى مصفوفة المقارنة ، تم الكشف عن الملاحظات التالية: تساهم عوامل الترسيب والنفذية بشكل أكبر في ظاهرة الفيضانات في مجمعات المياه بنسبة وزنية للوزن الطبيعي تبلغ 39% و 22% على التوالي. ويتبعهم ، على التوالي ، عامل الارتفاع (15%) ، جيولوجيا التضاريس (11%). إن الغطاء الأرضي وغطاء التربة وكثافة الصرف والمنحدرات متورطة بقيم منخفضة في ظاهرة الفيضانات بنسبة 7% و 4% و 3% على التوالي.

الكلمات المفتاحية: الخرائط ، الفيضانات ، نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد ، مجمعات مياه ، وادي مزي ، AHP.

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

ملخص Abstract & Résumé

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Concepts généraux sur les inondations

	Page
Introduction	1
Connaissance de l'aléa aux inondations	3
Evaluer l'aléa « inondation » et ses incertitudes	3
Hydrologie	4
Hydraulique	4
Incertitudes dans l'évaluation de l'aléa	5
Connaissance de la vulnérabilité aux inondations	5
Evaluation de la vulnérabilité	5
Démarches quantitatives	6
Démarches qualitatives	6
Les inondations	6
Type des inondations	7
Torrentialité des pluies	7
Les inondations des plaines	8
Inondations par ruissellement en secteur urbain	9
Inondations par rupture d'ouvrage ou d'embâcle	10
Inondations marines	11
Inondations par remontées des nappes phréatiques	12
Cause des inondations	13
Causes naturelles	13
Causes humaines	13

Causes directes	13
Causes indirectes	13
La gestion des risques	14
Prévision	14
La prévision immédiate	14
La prévision à long terme	14
Prévention	15
Protection	15
L'aménagement du bassin versant	15
Au niveau des versants	15
Au niveau du lit	16
Pendant et après la crise	16
La mise en place d'un service d'annonce de crues	16
Les inondations en Algérie	17
Les évènements historiques des inondations en Algérie	17
Politique de gestion des inondations en Algérie	18

Chapitre 2 : Matériel et Méthodes

Etude du milieu	19
Situation géographique	19
Etude climatique du milieu	20
Présentation de la station climatique retenue	20
Précipitations	21
Température	21
Synthèse climatiques	22
Indice De Martonne	23
Détermination des étages bioclimatiques de la zone d'étude	23
La technique AHP L'AHP	24

Chapitre 3 : Résultats et discussion

Evaluation de l'aléa d'inondation par la technique AHP	28
Evaluation par la technique AHP des facteurs participants à la production d'inondations	29
Les précipitations	29
La perméabilité	31
Les altitudes	32
Les pentes	33
La densité de drainage	35
Formations géologiques	36
Occupation du sol/couverture pédologique des terres	37
Evaluation des sous facteurs par la technique AHP participants à la production d'inondations	39
Cartographie des zones a risque d'inondation dans la region de hamda	42
Conclusion	44
Références bibliographique	

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1	Model conceptuel du risque	04
Figure 2	Inondation d'Oued M' zi Laghouat 2016.....	07
Figure 3	Inondation par crues torrentielles.....	08
Figure 4	Inondation de Plaine.....	09
Figure 5	Inondations par ruissellement en secteur urbain	10
Figure 6	Inondation par débordement au-dessus de la digue.....	11
Figure 7	Inondations marines.....	12
Figure 8	Procédés de remontée de la nappe.....	12
Figure 9	Localisation de la région d'étude.....	19
Figure 10	Diagramme ombrothermique de la station de Hamda (1991 ----- 2020).....	22
Figure 11	Climagramme d'EMBERGER.....	24
Figure 12	La carte des précipitations P.....	30
Figure 13	Carte de perméabilité de la zone d'étude.....	31
Figure 14	Carte des altitudes.....	33
Figure 15	Carte des pentes de la zone d'étude.....	34
Figure 16	Carte de la densité de drainage.....	35
Figure 17	Carte de la formation géologique de la zone d'étude.....	36
Figure 18	Carte du facteur couvert végétal.....	38
Figure 19	a) zone inondée à une altitude de 5m sous le pont, b) zone inondée à une altitude de 10 m sous le pont c) zone inondée à une altitude de 16m sous le pont d) zone inondée à une altitude de 20m sous le pont.	42

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux

Tableau I	Caractéristiques stationnaires de la station Hamda	21
Tableau 2	Précipitations moyennes mensuelles de la région de Hamda	21
Tableau 3	Températures mensuelles de la station de Hamda	22
Tableau 4	L'indice bioclimatique d'Emberger, L.	23
Tableau 5	L'échelle fondamentale des nombres absolus	25
Tableau 6	Matrice de comparaison par paires et calcul de son vecteur propre.....	26
Tableau 7	Valeurs de CA pour $n = 1, 2, 3, \dots, 11$	27
Tableau 8	Les valeurs de Précipitations de la région d'étude (mm).....	29
Tableau 9	Classes de perméabilité de la zone d'étude.....	31
Tableau 10	Classes d'altitude de la zone d'étude.....	32
Tableau 11	Classes de pentes de la zone d'étude.....	33
Tableau 12	Classes de la Géologie de la zone d'étude.....	36
Tableau 13	Facteurs influençant les inondations par la technique AHP.....	38
Tableau 14	Evaluation des sous facteurs par la technique AHP	39
Tableau 15	Les occupations/couverture pédologique des sols inondés en fonction des tranches d'altitudes mesurées sous le pont.....	42

Introduction

L'ampleur des conséquences des inondations sur la société justifie que l'on s'intéresse à l'évaluation des outils utilisés pour leur gestion. Force est cependant de constater que cette préoccupation est relativement récente en Algérie, comparée aux démarches développées à l'étranger. Les précurseurs en matière d'évaluation des politiques de gestion des zones inondables sont américains. Après la seconde guerre mondiale (Hubert, 2001). Compte tenu des nombreuses mesures mises en place depuis une dizaine d'années, l'évaluation des mesures de gestion du risque est un impératif urgent. Il s'agit de faire le point sur les actions de prévention ou au sens large sur les politiques de gestion du risque afin de « rentabiliser » au mieux les moyens mis en œuvre. L'évaluation se caractérise par trois éléments: les objectifs, les moments et les méthodes de l'évaluation. Les inondations représentent la source de catastrophes naturelles la plus fréquente dans le monde ; ainsi aux Etats Unis, les dommages liés aux tempêtes et crues représentent un cout annuel de l'ordre de 10 milliards de dollars. Aussi en Europe, les pertes économiques les plus importantes ont été enregistrées au cours de la période 1980-2002 en Allemagne et en Italie (11 Milliards d'euros pour ces deux pays), suivis par l'Espagne et la Grande-Bretagne (6Milliards d'euros à eux deux) (Ledoux, 2006) et (Oufella, 2003). Afin de limiter les effets dommageables de ces calamités naturelles, l'amélioration des méthodes d'évaluation et le choix de la politique optimale de gestion apparaissent comme des outils efficaces dans ce cadre. Alors comment peut-on évaluer et gérer le risque inondation ? Le but principal de ce chapitre est d'offrir une idée générale sur la manière d'évaluation du risque inondation (aléa et vulnérabilité) ainsi que de présenter une stratégie globale de gestion de ce risque

CONNAISSANCE DE L'ALEA AUX INONDATIONS

L'aléa est défini comme étant la probabilité d'occurrence d'un phénomène naturel, dans notre cas, l'inondation. Il se caractérise par plusieurs paramètres hydrauliques qui expliquent la capacité plus ou moins destructrice de l'inondation (OUERDACHI.L, 2012)

Evaluer l'aléa « inondation » et ses incertitudes

La prédominance de l'aléa a gommé partiellement la vulnérabilité de l'équation du risque (Blin, 2001). Il étant le concept phare du risque, comment est-il évalué et quantifié dans le cas du risque inondation et est-ce qu'il y a des incertitudes associées ?

Pour évaluer l'aléa inondation, il s'agit de solliciter deux disciplines principales :

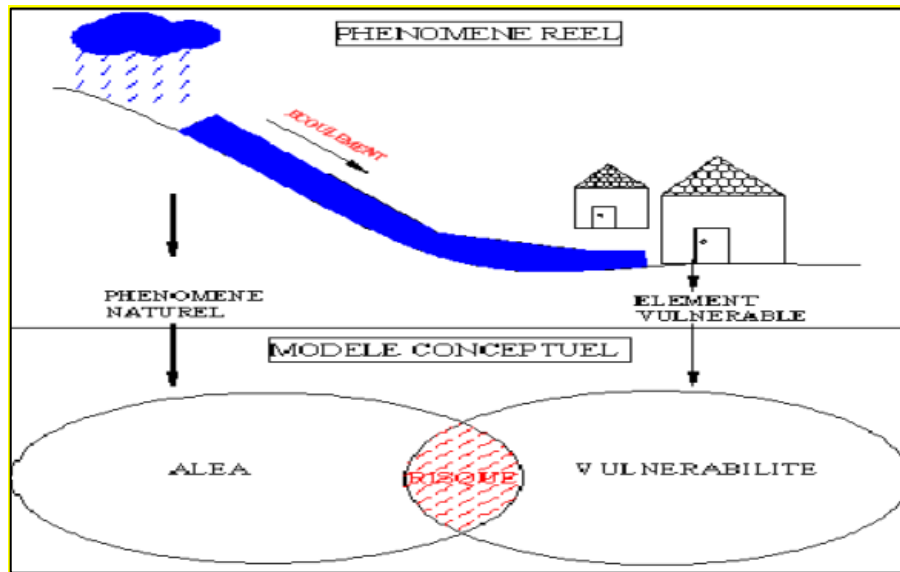


Figure 1 : Model conceptuel du risque (Benmechernane, 2013).

Hydrologie

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

Hydraulique

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

l'écoulement. Ensuite, lorsqu'on connaît la section en travers de l'écoulement, on peut facilement calculer la vitesse de l'eau (Barroca, 2006).

Incertitudes dans l'évaluation de l'aléa

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

Connaissance de la vulnérabilité aux inondations

La vulnérabilité se définit comme une évaluation de l'occupation humaine et économique d'un site, susceptible d'être affectée par l'aléa. Pour analyser une situation de risque sur un territoire donné, il faut combiner les deux facteurs précédant que sont l'aléa et la vulnérabilité au droit de chaque parcelle. Il existe des risques positifs ou négatifs. Si l'aléa augmente le risque augmente ; il est dit risque positif. Si la vulnérabilité augmente, le risque augmente ; il est dit risque négatif (Ouerdachi, 2012)

Evaluation de la vulnérabilité

La prise en compte du risque inondation devra nécessairement passer par la valorisation des études d'évaluation de la vulnérabilité comme base indispensable à la définition des objectifs pour une gestion territorialisée de ce risque. L'évaluation de la vulnérabilité des enjeux est en quelque sorte détermine, identifie, chiffre et quantifiée, localiser et analyser les effets dommageables de l'aléa sur les enjeux. Différentes démarches méthodologiques permettent d'analyser et d'évaluer la vulnérabilité (Barroca, 2006).

Démarches quantitatives

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

Démarches qualitatives

Dans une approche qualitative, la vulnérabilité apparaît comme la tendance d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel comme l'inondation.

Cette propension varie selon le poids de certains facteurs qu'il est nécessaire d'identifier et d'analyser car ils induisent un certain type de réponse de la société (Barroca et al, 2005)

Les inondations

Le phénomène d'inondation est défini comme l'envahissement passager des lieux émergés par l'eau de pluie (Hountondji et al. 2019) généralement sous forme torrentielle. Il résulte de l'accumulation des eaux en raison de facteurs géomorphologiques, hydrologiques, topographiques, météorologiques ou anthropiques. Il se caractérise par une durée, une fréquence, une magnitude, une extension spatiale, etc. (Wallez, 2010).

Selon Desbordes (1997), le risque d'inondation peut se définir comme la résultante du croisement entre aléa et vulnérabilité. Cet aléa représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement de cours d'eau ou de canaux de drainage et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation. Tandis que, la vulnérabilité transcrit quant à elle la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation (Pottier, 1998).



Figure 2 : inondation d'Oued M' zi Laghouat 2016 (<httpswwww.assawt.net>)

Les inondations constituent actuellement un risque naturel majeur du monde en occasionnant environ 20 000 victimes par an (Simona et Cedric, 2007). À l'instar du reste du monde, la région méditerranéenne a connu de multiples inondations qui deviennent une menace de plus en plus terrible. Les précipitations y dépassent souvent 200mm/24 heures (Ducrocq, 2006), et parfois en moins de six heures.

Ce risque majeur menace de façon significative à la fois, l'environnement et la société humaine. La menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre (Madi et al. 2014).

Type des inondations

Les causes des inondations déterminées par Afouda et al. (2004) nous conduit à identifier principalement deux types de risques : le risque d'origine pluviale et le risque d'origine fluviale (Hountondji et al. 2019).

Torrentialité des pluies

Les crues torrentielles sont des phénomènes brusques et violents résultant d'épisodes pluvieux intenses et localisés, du type d'orages convectifs. Si la vitesse de montée des eaux est extrêmement rapide, la décrue l'est également. On parle aussi de crues éclairs pour désigner des crues torrentielles survenant de très petits bassins versants et se formant en

quelques heures. De manière un peu conventionnelle, on parle de crues torrentielles lorsque la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombant sur le point "hydrologiquement "le plus éloigné atteigne l'exutoire est inférieure à 12 heures (ou 24h pour certaines hauteurs). Ces crues touchent principalement les zones de montagne, les cours d'eau du pourtour méditerranéen, mais aucun petit bassin au relief accentué, à forte capacité de ruissellement, n'est à l'abri (Lahmaza et al. 2020).



Figure. 3 : Inondation par crues torrentielles (MADI . 2014)

Les inondations des plaines

La plaine inondable est généralement une zone plate ou légèrement en pente adjacente au chenal de la rivière qui est inondée au cours des crues (Lahmaza et al. 2020).



Figure 4. Inondation de Plaine (MADI . 2014)

Inondations par ruissellement en secteur urbain

Les inondations par ruissellement recouvrent des phénomènes physiques différents selon qu'elles se produisent en milieu rural, périurbain ou urbain. Mais ces phénomènes se caractérisent par leur soudaineté et leur courte durée, ce qui les rend peu prévisibles et difficilement maîtrisables en période de crise. Il s'agit de phénomènes très locaux, intéressant les petits bassins versants. Le ruissellement pluvial urbain provoque d'importantes inondations lorsque les terrains sont plus imperméables, le tapis végétal plus faible, la pente plus forte et les précipitations plus violentes et il demeure un phénomène naturel que l'on ne peut pas empêcher. Malheureusement, l'intervention humaine est parfois source d'aggravation de ce phénomène. Ce fut le cas des inondations de Bâb El Oued du 10 novembre 2001 à Alger, des pluies exceptionnelles et intenses, sur une étendue de 40 km, de l'ordre de 214 mm pendant 24h, ont causé 750 morts et 120 personnes disparues et plus de 10000 familles sinistrées. (Ledoux, 2006)

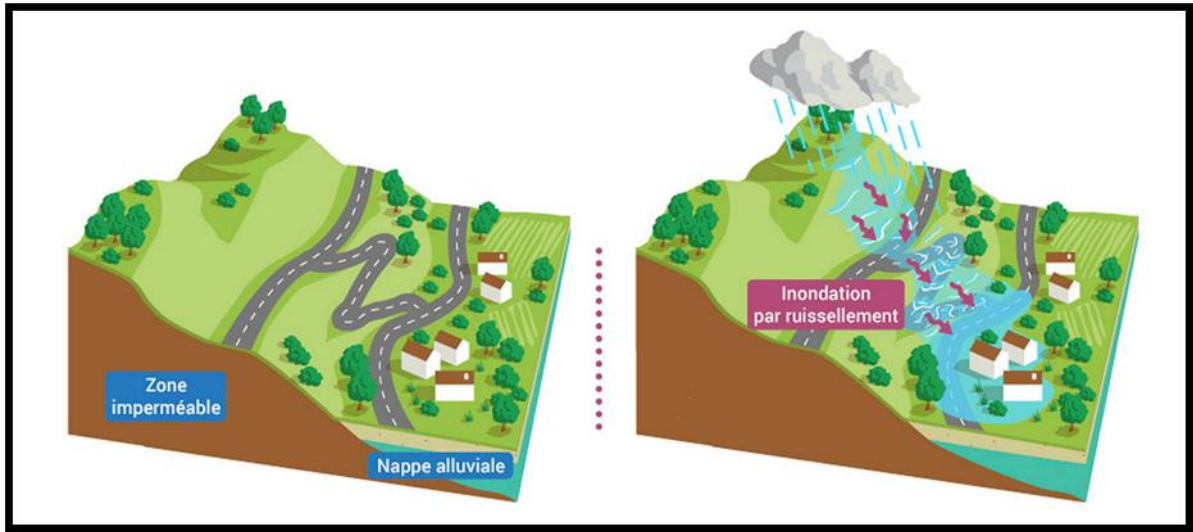


Figure 5. Inondations par ruissellement en secteur urbain

Inondations par rupture d'ouvrage ou d'embâcle

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

L'ouvrage n'atténue donc plus les débits. Le cours d'eau inonde alors sa plaine alluviale comme s'il n'y avait pas d'aménagement. (Boubchir, 2007); (Ledoux, 2006) et (SPPPI, 2004).



Figure 6. Inondation par débordement au-dessus de la digue (MADI . 2014)

Les végétaux, arbres et arbustes, arrachés aux berges puis entraînés par le courant viennent parfois se coincer et boucher les ponts. Il en résulte une inondation aggravée en amont. La rupture de l'embâcle peut provoquer une vague qui augmente le risque d'inondation à l'aval.

Les ouvrages munis de piles, trop petits pour laisser passer les embâcles (la hauteur libre ou tirant d'air sous le pont étant insuffisant) sont les plus vulnérables à ce phénomène. Le risque de contournement, voire de submersion de l'ouvrage est augmenté par la présence de ces bouchons ce qui peut entraîner de gros dégâts voire la ruine complète du pont et/ou de ses remblais d'accès, les remblais routiers n'étant pas conçus pour retenir l'eau ni protégés contre l'érosion du courant. (MADI 2014)

Inondations marines

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

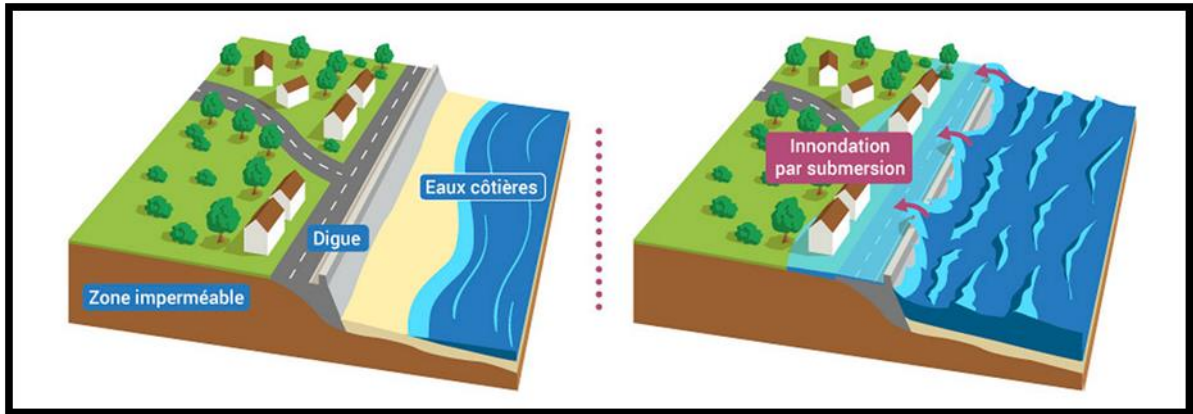


Figure 7. Inondations marines

Inondations par remontées des nappes phréatiques

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

Les désordres liés à ce type d'inondation se traduisent par des remontées sous bâtisses, l'engorgement des ouvrages souterrains, tassements de remblai, des glissements de terrain, des perturbations sur les réseaux publics, des pressions sous les constructions, etc. (Boubchir, 2007)

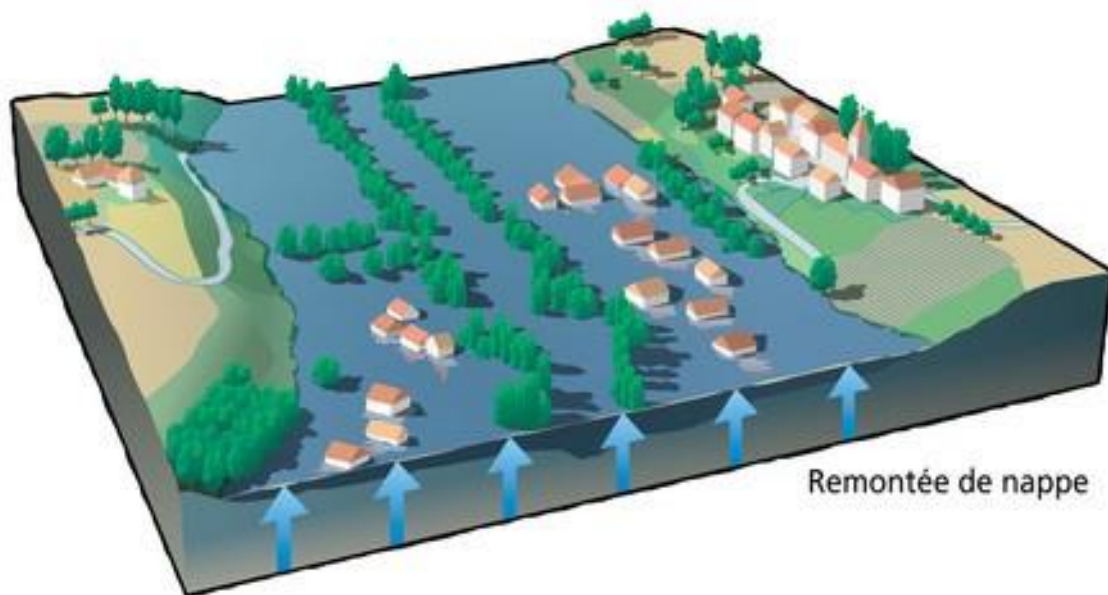


Figure 8. Procédés de remontée de la nappe (Graphithèque, 2015)

Cause des inondations

Selon **Hountondji et al. (2019)**, les inondations résultent de l'accumulation des eaux dues aux facteurs géomorphologiques, hydrologiques, topographiques, météorologiques ou anthropiques.

Causes naturelles

Les causes naturelles sont liées aux aléas climatiques attendus tel que les fortes pluies et le glissement de terrain qui peut empêcher l'écoulement habituel de l'eau.

Causes humaines

Causes directes

L'établissement des barrages, le changement de paysage du cours d'eau par la création des sablières, l'urbanisation chaotique sont à l'origine des inondations. Aussi, le drainage, l'irrigation, l'imperméabilité du terrain et la dégradation des sols, certaines pratiques agricoles intensives peuvent accélérer le ruissellement de l'eau et en limiter l'infiltration.

Causes indirectes

Ces causes sont liées aux modifications climatiques globales (l'effet de serre) qui entraînent la fonte des glaciers et qui provoquent une montée du niveau des océans, des cours d'eau, ou qui pourrait entraîner des cyclones plus intenses.

La période de retour

Est l'inverse de la probabilité d'occurrence du phénomène. Un phénomène ayant une période de retour de cent ans (**phénomène centennal**) a une chance sur cent de se produire ou d'être dépassé chaque année. Cela est vérifié à condition de considérer une très longue période. Mais elle peut aussi, sur de courtes périodes (quelques années, parfois une seule), se répéter plusieurs fois. Autrement dit, en vingt ans, un individu a une chance sur cinq de vivre la crue centennale.

La gestion des inondations

Définition de la gestion des risques

Dans le domaine de la gestion des risques, on peut distinguer la notion des trois P comme la pierre angulaire de toute action :

Prévision

La compréhension et la connaissance du risque passe par la prévision de l'aléa crue. Les éléments qui déterminent la réponse hydrologique des bassins sont ainsi :

- ☞ Le débit probable par rapport à une averse d'intensité donnée
- ☞ Il est nécessaire de disposer d'informations pluviométriques météorologiques fiables
- ☞ Mettre en place une banque de données régionale et nationale
- ☞ Savoir évaluer le niveau du risque c'est mieux le maîtriser

Donc, prévenir, mettre au point des modèles mathématiques expliquant le processus de fonctionnement du phénomène.

La prévision immédiate

Avec l'alerte des populations quelques heures avant que la crue n'intervienne. Ce rôle était joué par des observateurs chargées de suivre la montée des eaux et de transmettre les informations par les moyens de communication. Les mesures sont progressivement automatisées et les services ont même la possibilité d'interroger les stations en cas de besoins que ce soit sur la pluie, les débits, les volumes d'eau des retenues, l'onde de crue, etc... L'implantation d'un réseau de radar météorologique qui mesure la pluie tombée, avant son accumulation au sol, permet d'anticiper au mieux et peut représenter un véritable outil d'aide à la décision. Cependant la prévision notamment pour les phénomènes brutaux, n'est pas facile, car même le recours aux documents, radars et satellitaires, ne permet ni de localiser avec précision les points d'impacts majeurs des phénomènes de grande ampleur, ni d'évaluer leur importance réelle (Yahiaoui, 2012).

La prévision à long terme

Elle peut se faire en utilisant les documents historiques et les cartes à risques. L'analyse sur réseau hydrographique peut être d'un grand intérêt quand la prévention. Un "chevelu" dense concentré, des pentes fortes sur terrain imperméables, une incision importante,

l'absence d'une couverture végétale dense, sont autant de facteurs favorables à la production d'une crue importante.

Aussi, la cartographie de l'occupation du sol, base d'une analyse de vulnérabilité des biens, obtenus par traitement des données multiples, permet d'évaluer la densité du couvert végétal et d'estimer la proportion du ruissellement des différentes parcelles. La pertinence d'une cartographie géomorphologique spécialisée est largement démontrée (Lambert, 1996). Elle permet de situer les ouvrages et travaux susceptibles de modifier le fonctionnement hydro Morphologique de base (freinage ou d'accélération de l'écoulement des eaux, amplification des crues etc...). A partir des analyses effectuées, l'action devrait se tourner prioritairement vers l'aménagement du bassin versant **(Yahiaoui, 2012).**

Prévention

Cette phase est chargée de mettre en place des dispositions à savoir, prévention routière, prévention de la délinquance. Il y a 03 niveaux de mesure de prévention du risque :

Prévention primaire : agir sur les facteurs de risque

Prévention secondaire : prévenir le dommage

Prévention tertiaire : limiter le dommage

Protection

La protection est une combinaison d'utilisation d'équipements de sécurité et de procédures pour se défendre et éliminer les menaces.

Chaque risque nécessite une réponse spécifique, cependant, la protection à deux orientations majeures : S'opposer à l'expression d'un phénomène :

☞ la défense active : laminer une crue en retardant ses effets qui risquent d'inonder un espace urbain

☞ Modification des enjeux : de modifier suffisamment les enjeux pour réduire leur vulnérabilité

L'aménagement du bassin versant

Du point de vue de la prévention des crues, l'aménagement du bassin versant apparaît comme fondamental tant au niveau des versants que du lit proprement dit.

Au niveau des versants

Le reboisement apparaît comme la première solution envisageable pour la protection des versants, car la forêt intercepte la pluie (réduction ou anéantissement de l'effet 'Splash'), et retarde la fonte des neiges sous son couvert, accroît l'évapotranspiration (en particulier en été ou la transpiration des arbres contribue à l'assèchement des sols et l'abaissement du niveau des nappes phréatiques, au bénéfice de la rétention). L'humus forestier qui est relativement abondant, est capable d'absorber jusqu'à 10 fois son poids d'eau. Inversement, la destruction d'une forêt provoque un accroissement annuel de l'écoulement, mais aussi l'apparition de ravins. En cas d'absence de couverture végétale, l'érosion (depuis l'effet Splash jusqu'à l'écoulement concentré) se développe (**Salomon, 1997**).

Au niveau du lit

La correction des lits est souvent la solution proposée par les ingénieurs qui cherchent à accroître la section mouillée en élargissant les lits ou encore à les approfondir par des dérochements ou encore en érigeant des digues, etc... Tous ces travaux ont pour but de minorer les niveaux, encore faut-il que ces interventions soient précédées d'une connaissance préalable de la crue maximale probable, et mieux encore du bassin versant. Le recalibrage qui consiste à rectifier la section d'écoulement et à augmenter le débit, permet d'évacuer plus rapidement la crue, mais déplace le risque sur le secteur aval, sur des zones intermédiaires ne permettant pas de stocker une partie des eaux. Le mieux est de chercher à étaler la crue que la contenir, un bon aménagement devrait donc examiner avec soin la solution des retenues de ralentissement, dans toutes les variantes axiales ou latérales selon les configurations locales et non pas seulement celle des barrages réservoirs.

Pour le lit des cours d'eau, il convient de cesser tout dragage, et d'interdire toute gravière de basse terrasse, notamment dans les zones amont des agglomérations (**Salomon, 1997**).

Pendant et après la crise

En dépit de toutes les mesures de protection et/ou de prévention que l'homme peut arrêter, les crues et les inondations imprévues seront toujours probables. Aussi, il importe d'envisager des scénarii tenant compte de l'inévitable.

Les plans d'organisation des secours, sont des dispositifs d'urgence, destinés à faire face à tout événement calamiteux, d'ordre exceptionnel, dépassant les possibilités opérationnelles

de secours locaux. Les dispositions législatives et réglementaires confient à l'état la responsabilité de la prévention et de la réponse aux besoins des populations en cas de catastrophes naturelles.

Cependant, il est à signaler que le choc de la phase d'urgence ne représente en fait que le début des difficultés rencontrées, pour les familles sinistrées. Le règlement ou l'indemnisation sont accompagnés d'une série de vicissitude. Les aides immédiates (évacuation, hébergement : distribution de vivres, sanitaires et habillements) sont généralement correctement effectuées et largement médiatisées. Les aides postérieures, à la crise (collectivités locales, mouvement association, état) sont plus aléatoires, généralement longues à intervenir et toujours jugées insuffisantes par ceux qui ont été affectés. (**Salomon, 1997**).

Les inondations en Algérie

Les événements historiques des inondations en Algérie

Au cours de la décennie écoulée, nous avons pu avoir les données de quelques inondations parmi lesquelles :

- ✓ Le 20 octobre 1993 (ouest algérien) : 22 décès et 14 blessés à Oued Rhiau (à Relizane).
- ✓ Mois d'octobre 1994, des inondations ont été signalés dans plusieurs régions du pays. Le bilan a été 60 décès et des dizaines de disparus au cours de dix jours d'inondations.
- ✓ Le 22 octobre 2000 : des inondations à l'ouest algérien, plus de 24 décès.
- ✓ Les 10 et 11 novembre 2001 : à Bab El Oued (Alger), les pluies diluviennes ont fait 733 victimes, 30 000 personnes sans-abris et d'importants dégâts matériels.
- ✓ Le 1^{er} octobre 2008 : des pluies diluviennes s'étaient abattues sur la région de Ghardaïa, faisant dangereusement en montant les cours d'eau. Au moins 33 personnes sont mortes, quatre-vingt-quatre personnes ont été blessées et près de 600 maisons détruites dans des inondations très importantes.
- ✓ Le 09 octobre 2008 : dans la wilaya d'Ain Defla, les intempéries ont causé six décès et huit autres blessées parmi la population, suite à une inondation qui a surpris la région.
- ✓ La nuit du 12 octobre 2008 a été fortement pluvieuse, de 20h45mn à 23h35 mn, de pluie ont été enregistrée, surtout dans les localités de Khemis Miliana et Sidi Lakhdar où la force de l'averse a fait que le revêtement bitumeux de la chaussée en certains endroits a été

endommagé, de même que des habitations noyées par des eaux chargées de terre argileuse et de gravier. Des torrents de boue provenant des collines surplombant la ville de Khemis Miliana ont envahi la majorité des quartiers. Même la voie ferrée n'a pas été épargnée par ces inondations. Durant ce mois d'Octobre 2008, d'autres crues et inondations sont signalées à Batna (450 km au sud-est d'Alger) où deux personnes ont été emportées par les eaux d'oueds en crue. A Bechar, région habituellement désertique et aride, situé à plus de 1.000 km au sud-ouest d'Alger, au moins huit personnes sont mortes noyées dans des inondations qui l'ont frappé mercredi et jeudi 15 et 16 octobre 2008.

✓ Le soir du 01 octobre 2011 a été fortement pluvieuse de $P=60$ mm à la ville d'El Bayadh, de 17h à 18h30 mn, Au moins 11 personnes sont mortes, et près de 170 maisons détruites, et deux ponts dans des inondations très importantes (Boudjerda et al, 2005).

✓ 30 septembre 2016 , la vallée de M'zi ,dans l'état de Laghouat, a connu une montée des eaux , n'a pas causé uniquement des dégâts matériels considérables, dont l'effondrement de deux ponts et l'inondation d'exploitations agricoles

Politique de gestion des inondations en Algérie

Face au bilan catastrophique des inondations en Algérie au cours de deux dernière décennies, Etat Algérien s'est mobilisé en adoptant en 2005 la loi n° 05-12 du 28 *Jumada Ethania* 1426 correspondant au 4 août 2005 relative à l'eau et à la gestion des risques d'inondation. L'Algérie s'est par ailleurs dotée de moyens de surveillance et de vigilance météorologiques et hydrologiques performantes pour pouvoir anticiper la survenue de crues et prendre les mesures nécessaires en situation de crise.

La prévention contre ces risques représente un intérêt particulier pour le développement durable du pays. La stratégie Algérienne prise en compte au risque d'inondation s'introduit dans la politique générale de prévention des risques majeurs, elle se résume à une politique de prévention basée sur l'évolution de la législation et des comportements ; ce sont les procédures et les règles visant à limiter la vulnérabilité des hommes et des biens face aux aléas naturels. Le cœur de cette politique préventive est l'institution d'un (PGP) ; il s'agit de :

Un établissement de la carte nationale d'inondations avec les zones inondables ;

1. Mise en place du système de veille et d'alerte. Ensuite, l'Agence Nationale de Prévention et de Gestion des Risques Majeurs a apparu pour prendre en charge les activités suivantes:

2. Proposer les éléments d'une stratégie nationale dans le domaine de la prévention et la gestion des risques majeurs ;
 3. Mener des études sur les systèmes de gestion des catastrophes naturelles et écologiques;
 4. Assister les institutions chargées d'élaborer les plans en matière de prévention et de réduction des risques majeurs;
 5. Collecter, traiter, diffuser et conserver les données à caractère scientifique, statistique, technique, économique et social en matière de prévention et gestion des risques majeurs ; ♣ Contribuer à la formation des compétences nationales chargées de la de prévention et gestion des risques majeurs. Et enfin et afin de garantir la protection des biens et des personnes, la loi prévoit deux autres mesures importantes:
 6. Le recours obligatoire au système national d'assurance, dans le cadre des plans;
 7. Le recours à la procédure de l'expropriation pour cause d'utilité publique face aux risques majeurs. **(Rahmani, 2004)**
- .

Chapitre II : Matériel et Méthodes

La vallée de Hamda est réputé pour le problème des inondations dû aux grands changements climatiques des précipitations, le développement des activités agricoles dans le lit principal de l'oued M'zi, ainsi que la géomorphologie du terrain avec le relief montagneux où l'entrée nord de la ville de Laghouat.

Notre travail s'inscrit dans une vision visant à trouver une solution pour éviter la progression chaotique des activités agricoles vers le cours d'eau principal de la vallée, qui peut être sujet à des inondations causant des pertes matérielles et humaines énormes.

Situation géographique de la zone d'étude

La délimitation de notre zone d'étude a été faite à l'aide du logiciel ArcGis, en prenant en compte le doublant ponts du rentré nord de la ville de Laghouat étant l'exutoire du bassin versant.

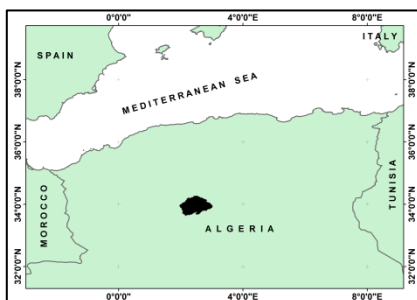
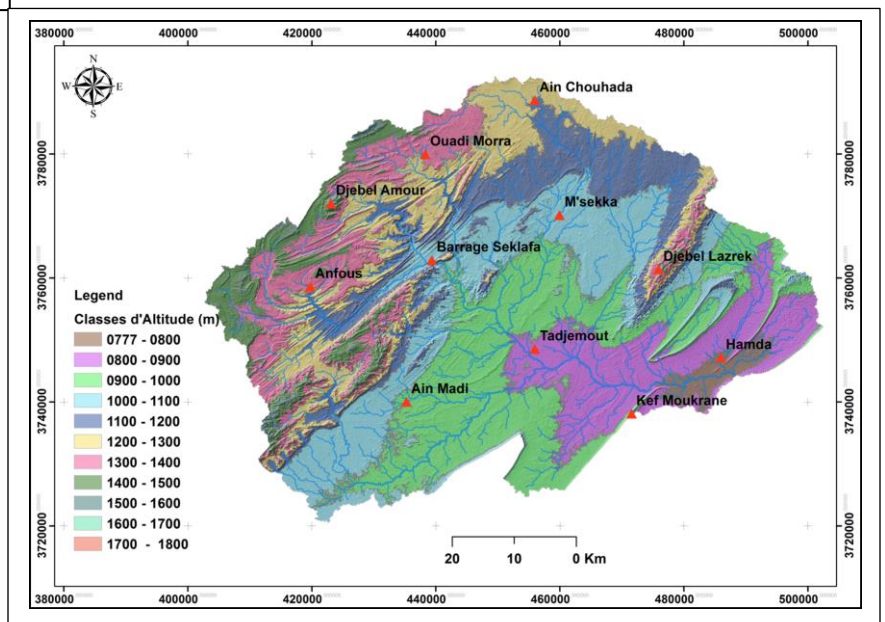


Fig. 9 Localisation de la région d'étude



Cette délimitation a été réalisée après vérification à l'aide de Google Earth Pro. Le bassin versant de l'oued M'zi situé dans la région centrale de l'Algérie Méridien entre $33^{\circ} 36' 32''$ et $34^{\circ} 15' 50''$ latitude nord et $1^{\circ} 57' 5''$ et $3^{\circ} 1' 36''$ longitude Est.. D'une superficie de 4378 Km² et d'une forme allongée ($K_G = 1,7$), il est encadré par les monts du djebel Amour au Nord, et ceux du djebel Lazreg à l'Est. A l'Ouest limité par les monts d'El-Ghaicha (Fig. 9). L'altitude du bassin versant varie de 770 m à 1716 m. Elle décroît du nord vers l'est avec une élévation moyenne de 1096 m. Ses reliefs présentent des caractères très contrastés, constitués de plateaux entaillés et de versants raides.

Etude climatique du milieu

Le climat peut se définir comme étant l'ensemble des états habituels et fluctuants de l'atmosphère qui, dans leurs successions saisonnières, caractérisent une région ou un site, l'identification des climats fait intervenir les données atmosphériques, traitées isolément ou combinées entre elles.

Les facteurs climatiques sont des phénomènes aléatoires les plus déterminants du comportement hydrologique des cours d'eau et de l'alimentation des nappes. Ils interviennent dans le bilan de l'écoulement, essentiellement par les précipitations et par les températures. Ils jouent un rôle capital dans le comportement hydrologique

La synthèse des données climatiques c'est une étape nécessaire permettant de mieux caractériser le climat de la région d'intérêt.

Présentation de la station climatique retenue

Les données climatiques des précipitations et des températures ont été recueillies à partir du site web : <https://power.larc.nasa.gov/> sur une période de 30 ans (1991- 2020). On note que ce site a été utilisé par de nombreux chercheurs dans le domaine de l'érosion hydrique

(Benchettouh et al. 2017), dans le domaine de l'agro-climatologie (Aboelkhair et al. 2019) et dans le domaine du réchauffement climatique (Marzouk, 2021).

La station de Hamda a été retenue parmi 11 stations réparties sur la zone d'étude comme une zone de référence pour étudier ces paramètres climatiques et leur composition climatique.

Tableau 1 : Caractéristiques stationnaires de la station Hamda

Station	Altitude (m)	Latitude (degrés décimaux)	Latitude (degrés décimaux)	Période d'observation
Hamda	790	33.87	2.85	1991- 2020

II.2.2- Précipitations

Les précipitations constituent un facteur essentiel pour définir le climat régnant dans la région et pour l'analyse des ressources en eau. Elles constituent un phénomène physique qui décrit le transfert de l'eau, dans une phase liquide (pluie) ou solide (neige, grêle), entre l'atmosphère et le sol, elles sont aussi représentées l'élément le plus important du cycle hydrologique.

Les précipitations mensuelles moyennes de la région enregistrées au niveau de la station de Hamda sont représentées dans le **tableau 02**.

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles de la région de Hamda (1991-2020)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
p (mm)	15.3	11.2	15.6	34.4	15.1	8.1	5.3	11.3	46.5	21.3	14.3	13.1	211.5

Les précipitations annuelles moyennes sont de l'ordre de 211.5 mm pour la période considérée. Le mois le plus arrosé est Septembre avec 46.5 mm et le mois le plus sec étant Juillet avec 5.3 mm.

II.2.1. Température

Le tableau suivant indique les moyennes des températures mensuelles. D'une façon générale, la température moyenne mensuelle maximum est observée au mois d'aout et elle se décroît à

partir de ce mois, jusqu' au mois de janvier ou elle atteint sa valeur moyenne minimale. Les dernières années ont connu des amplitudes de variation plus accentuées, caractérisant la période de sécheresse.

Tableau 3: Températures mensuelles de la station de Hamda (1991-2020)

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy
Tmin °C	1.2	1.9	4.9	8.0	12.9	18.1	22.2	44.4	17.3	12.1	5.9	2.5	18.6
Tmax °C	13.1	15.0	19.0	47.2	28.4	34.1	38.3	37.1	31.2	25.1	17.9	26.4	27.7
Tmoy. °C	7.1	8.5	11.9	27.6	20.7	26.1	30.2	40.8	24.3	18.6	11.9	14.4	23.2

L'analyse des températures mensuelles montre que les mois de Juillet et Août sont les plus chauds de l'année ce qui correspond à des températures moyennes de 30,2 et 40.8 °C respectivement, le mois de Janvier enregistre des températures basses pouvant atteindre 7.1°C. La température moyenne interannuelle sur une période de 30 ans est de 23.2 °C.

II.2.3- Synthèse climatiques

Diagramme Ombrothermique

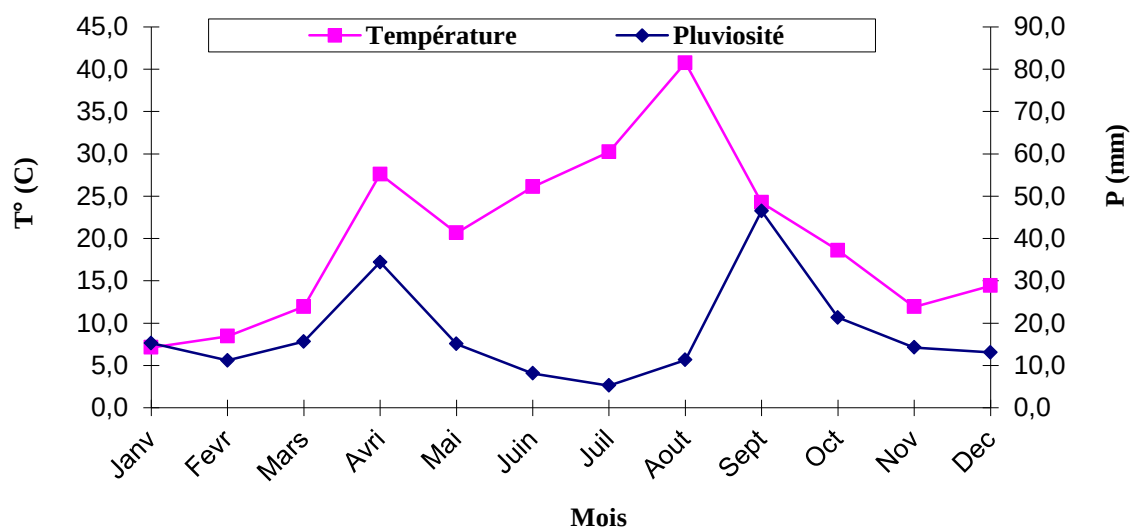


Fig.10. Diagramme ombrothermique de la station de Hamda (1991 ----- 2020)

un mois est considéré comme sec, lorsque les précipitations en millimètres sont inférieures ou égales au double de la température moyenne mensuelle en degrés Celsius ($P \leq 2T$). À partir du diagramme ombrothermique de Gaussen (Fig. 10), on remarque que la région de Hamda, sur la période de 30 ans, est marquée par une longue saison sèche, qui s'étale sur tous les mois de l'année.

Indice De Martonne

En 1923, De Martonne a défini un indice d'aridité "A" comme suite :

$$A = P / (T + 10)$$

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

T : température moyennes annuelles (°C).

Pour :

$A < 5$: climat hyperaride ;

$5 < A < 7,5$: climat désertique ;

$7,5 < A < 10$: climat steppique ;

$10 < A < 20$: climat semi-aride ;

$20 < A < 30$: climat tempéré.

$A = 6.4$ pour la station de Hamda est donc un climat hyperaride.

Détermination des étages bioclimatiques de la zone d'étude

Emberger (1955) était le premier à réaliser l'étude des bioclimats de la région Méditerranéenne.

On se basant sur le quotient pluviométrique d'Emberger, on va déterminer l'aire bioclimatique du sous bassin versant.

$$Q_2 = 2000 * P / (M^2 - m^2).$$

P : moyenne des précipitations annuelles (mm).

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud en degré Kelvin ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273.2$).

m : moyenne des minima du mois le plus froid en degré kelvin ($T^{\circ}K = T^{\circ}C + 273.2$).

Tableau 4: L'indice bioclimatique d'Emberger, L. (d'après Stewart, 1969)

Station	P (mm)	M °K	m °K	Q ₂
Hamda	211.5	311,5	274.4	19.5

La valeur de Q₂ portée sur le climagramme en tenant compte de m, classe la station de Hamda de la zone d'étude dans l'étage bioclimatique aride à hiver froid.

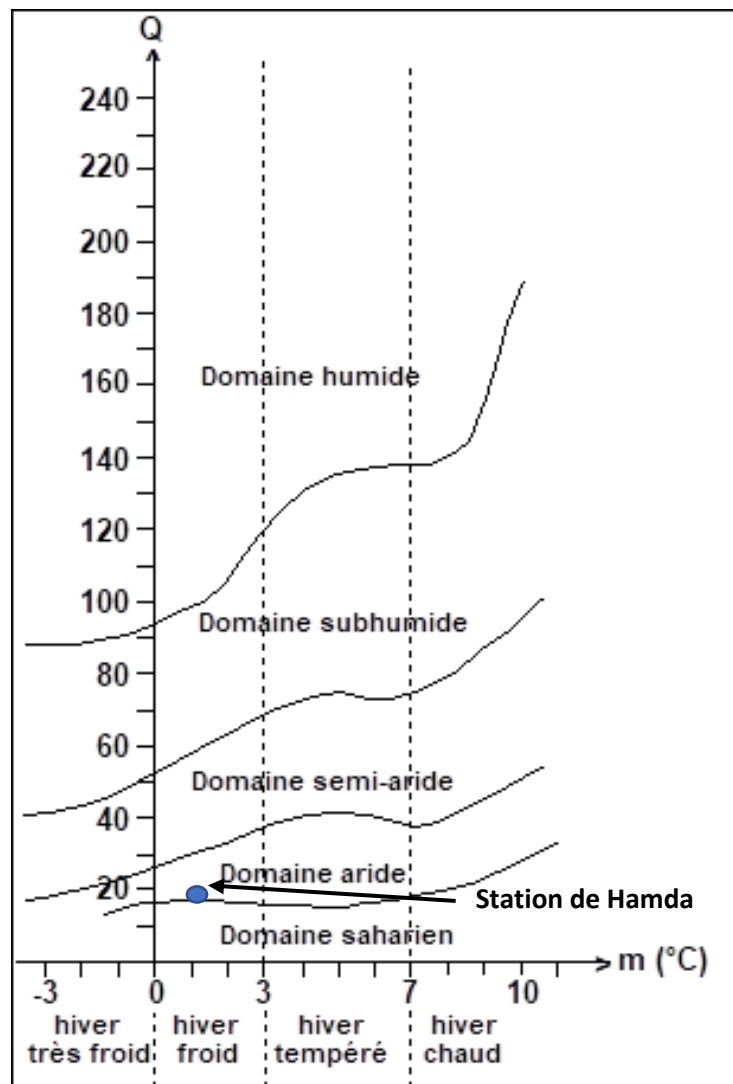


Fig.11. Climagramme d'EMBERGER

La technique AHP L'AHP

c'est une technique qui demande l'élaboration d'une matrice de comparaison binaire pour chaque facteur en précisant une échelle allant de 1/9 jusqu'à 9 selon l'importance de ce dernier (tableau 5). Les poids attribués aux facteurs (tableau 5, colonne 7) sont des valeurs relatives à leur importance dans le processus érosif. Il est nécessaire de calculer un ratio de cohérence (RC) pour indiquer la fiabilité des jugements de la matrice calculée (Saaty, 1977). Pour que cette matrice soit cohérente, il faut que la valeur de RC soit inférieure à 10 %.

Degré d'importance	Définition
1	Importance égale
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre
5	Importance forte ou déterminante
7	Importance très forte ou attestée
9	Importance absolue
2/ 4 /6 /8	Valeur associée à des jugements intermédiaires

Tableau 5: L'échelle fondamentale des nombres absolus (Saaty, 2008)

Facteurs	F1	F2	F3		F _n	W _i
F1	$1/\sum F1$	$W2-1/\sum F2$				$\sum F1/n$

F2	$W_{1-2}/\sum F_1$	$1/\sum F_2$				$\sum F_2/n$
F3	$W_{1-3}/\sum F_1$		$1/\sum F_3$			$\sum F_3/n$
...						
F _n	$W_{1-n}/\sum F_1$				$1/\sum F_n$	$\sum F_n/n$
	$\sum F_1$	$\sum F_2$	$\sum F_3$		$\sum F_n$	

Tableau 6 : Matrice de comparaison par paires et calcul de son vecteur propre

Quand w_{ij} représente le jugement quantitatif de la paire de caractéristiques C_i, C_j , il est défini par les règles suivantes : Si, $w_{ij} = \alpha$, alors $w_{ji} = 1/\alpha$, $\alpha \neq 0$ Si, C_i est considéré comme étant d'une importance relativement égale à celle de C_j , alors $w_{ij} = 1$, pour tout i . Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé par la formule suivante :

$$W_i = (\prod w_{ij})$$

En outre, celui-ci doit être normalisé pour que la somme de ses facteurs soit égale à l'unité. Pour cela, il suffit de calculer la proportion de chaque facteur par rapport à l'addition.

$$T = \left[W_1/\sum W_i \quad W_2/\sum W_i \quad \dots \quad W_n/\sum W_i \right]$$

Soit T le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque facteur. Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, Saaty (1977) propose de suivre le calcul suivant :

$$\lambda_{\max} = T \cdot W$$

Où W est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaison et $\lambda_{\max}$ est la valeur maximale d'Eigen value (Malczewski, 1999)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

. Où n est le nombre des facteurs de la matrice. Pour déterminer si les comparaisons sont conformes ou non, on a recours au calcul du ratio de cohérence (RC) selon la formule:

$$RC = \frac{CI}{CA}$$

Où RC est le ratio entre CI et l'indice de cohérence aléatoire (CA). Ce dernier présenté dans le tableau 4 est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives gérées de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Tableau 7: Valeurs de CA pour $n = 1, 2, 3, \dots, 11$ (Saaty, 1980)

EVALUATION DE L'ALEA D'INONDATION PAR LA TECHNIQUE AHP

L'évaluation des risques d'aléa d'inondation dans le bassin versant de l'oued M'zi a nécessité la cartographie et l'analyse de nombreux facteurs intervenant dans le processus d'inondation à savoir : les précipitations, la géologie du terrain, la pente des versants, l'occupation du sol, la densité de drainage, la perméabilité du sol et l'altitude du terrain, chacun présente un comportement différent d'une zone à l'autre du bassin versant. Ce qui a donné lieu à une multitude de données à cartographier, stocker, structurer et traiter de manière méthodique. Le produit du SIG et de la télédétection à haute résolution traité à l'aide des outils spatiaux permettent de croiser des cartes aux thèmes différents, de fusionner leurs bases de données et d'appliquer des équations mathématiques sur les valeurs numériques des facteurs de l'aléa d'inondation qui y sont rangées.

Afin d'élaborer la carte de probabilité des risques d'inondation, nous avons suivi la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process). Cette méthode, créée par [Saaty \(1991\)](#), est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération. Elle a déjà été utilisée avec succès par exemple dans l'application à l'étude de glissement de terrain ([Ramos et al., 2017](#)) ou dans l'évaluation de la probabilité du risque érosif ([Kacem et al., 2017](#), [Cherbel et al., 2017](#)).

L'utilisation de l'approche AHP/SIG présente beaucoup d'avantages, notamment ceux liés au grand nombre de résultats relatifs aux facteurs impliqués dans l'aléa d'inondation et la faculté de démêler la complexité de l'interdépendance de ces facteurs pour mieux cerner l'impact de chacun d'eux, en évaluant sa contribution au phénomène en question.

Notre objectif consiste à cartographier les régions à haut risque d'inondation par l'approche AHP/SIG et de déterminer le degré de l'impact participatif de chaque facteur influençant ce phénomène dans le bassin versant de l'oued M'zi.

3.1- Evaluation par la technique AHP des facteurs participants à la production d'inondations

L'AHP, c'est une méthode semi-qualitative décisionnelle multicritères qui implique une matrice basée sur la comparaison par paires de facteurs dans le même niveau hiérarchique (Jiang et al., 2014). Ces derniers sont comparés l'un à l'autre pour obtenir leur l'impact relatif vis-à-vis du phénomène étudié en l'exprimant en valeur numérique (Pradeep et al., 2015). Elle est utilisée pour résoudre nombreux problèmes environnementaux requérant une prise de décision (Suakal et al., 2013 ; Bagherzadeh et al., 2013 ; Sar et al., 2016 ; Zare et al., 2017).

L'évaluation de l'aléa d'inondation par les facteurs Précipitations, Perméabilité, Pente, densité de drainage, Altitude, Occupation/couverture pédologique du sol et la Géologie a été obtenue par la combinaison des cartes thématiques avec leurs bases de données relatives à ces facteurs au moyen d'un environnement SIG du logiciel ArcGIS.

3.1.1. Les précipitations

L'intensité des pluies représente l'énergie des gouttes de pluie qui déclenche le processus de détachement des agrégats du sol. Leur ruissellement et leur transport assurent le phénomène d'inondation (Roose et Lelong, 1976).

Tableau 8: Les valeurs de Précipitations de la région d'étude (mm) (1991 – 2020)

Stations	X	Y	P (mm)
1 Barrage Seklafa	2.34	34.01	293.7
2 M'sekka	2.57	34.07	257.6
3 Anfous	2.13	33.97	209.8
4 Ain Madi	2.30	33.80	211.4
5 Oued Morra	2.33	34.16	292.5
6 Ain Chouhada	2.52	34.24	275.6
7 Djebel Amour	2.17	34.09	292.1
8 Tadjemout	2.52	33.88	173.4
9 Djebel Lazrek	2.74	34.00	258.7
10 Hamda	2.85	33.87	211.5
11 Kef Mokrane	2.69	33.79	189.4

Les données de précipitations sont introduites et interpolées au moyen d'IDW (*Inverse Distance Weighting*) du kit « *spatial analyst* » intégré dans l'ArcGIS 10.3 Ce

dernier a été appliqué à dix onze stations se trouvant dans le bassin versant de l'oued M'zi pour une série d'observation sur une période 30 ans.

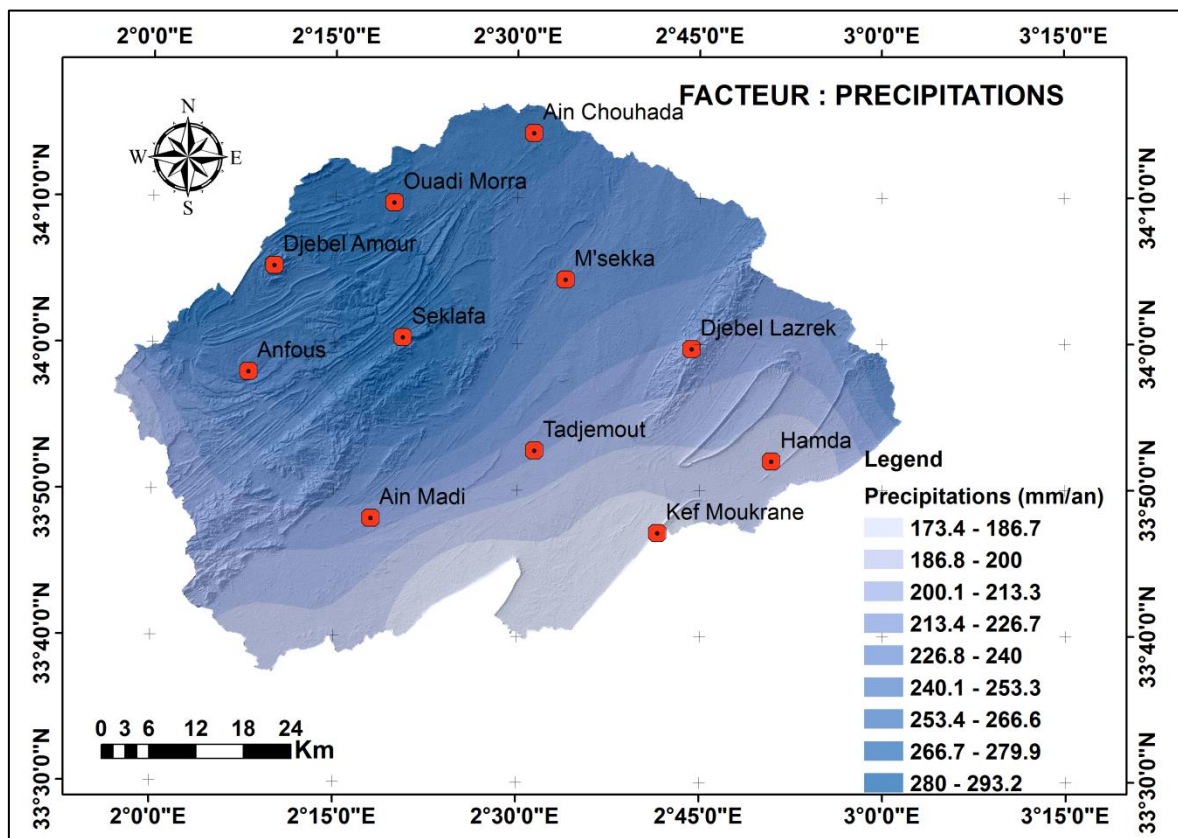


Figure 12 : La carte des précipitations P

D'après les valeurs figurant dans le tableau 8, on remarque que la valeur maximale de précipitations a été enregistrée au niveau de la station Djebel Amour (secteur ouest) atteignant une valeur de 292.1 mm/an, alors que celle minimale est observée au Sud de la zone d'étude dans la station de Kef Mokrane avec d'une valeur variée entre 173.4 et 186.7 mm/an.

La couche de données pluviométriques se compose de neuf classes de 293.2 à 173.4 mm/an réparties de l'exutoire au sud-est jusqu'aux sommets élevés au nord-ouest du bassin (Fig. 12).

3.1.2- La perméabilité

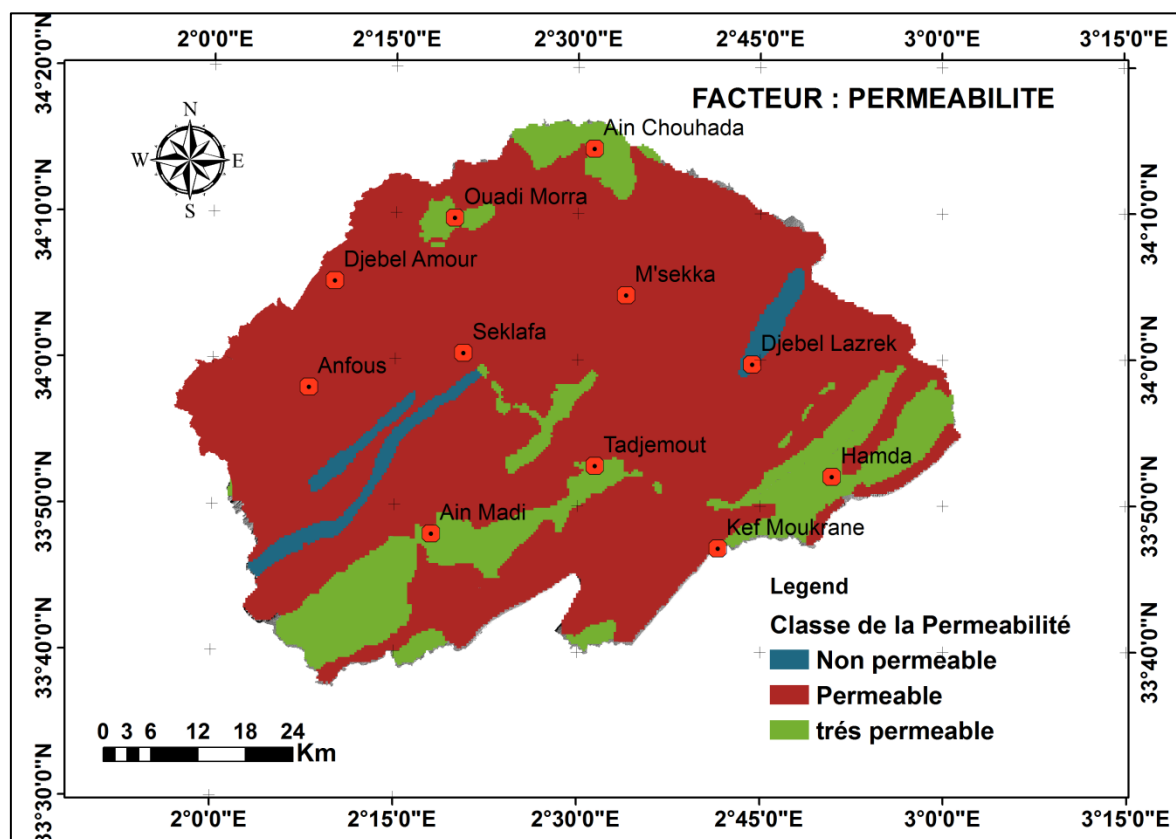


Figure 13. Carte de perméabilité de la zone d'étude

Tableau 9. Classes de perméabilité de la zone d'étude

Classe de perméabilité	Surface	
	Km ²	%
Très perméable	705.6	16.1
Non perméable	170.3	3.9
Perméable	3502.5	80.0
Total	4378.4	100

D'après le tableau 9, on déduit que la classe des sols perméables représente le pourcentage élevé de la surface totale du bassin versant avec une valeur estimée de 80% suivie de celle de très perméable (16%). Alors que celle non perméable ne représente que 3.9% de la surface du bassin versant.

D'après la carte (fig. 13), on remarque que les régions dont les sols très perméables se localisent dans la vallée de Hamda au sud-est de la zone d'étude et la vallée d'Ain Madi

au sud-ouest. Ces régions sont généralement caractérisées par des sols alluvionnaires dont des pentes faibles à très faibles ne dépassant pas le seuil de 5% (fig. 13).

Afin de nous permettre d'étudier l'effet de la perméabilité sur le phénomène d'inondation via la technique AHP, nous avons divisé ce facteur en trois catégories : sols non perméables, perméables et très perméables comme le montre le tableau 9

3.1.3. Altitude

Le modèle numérique de terrain (MNT) est un excellent outil spatial pour déterminer les attributs topographiques responsables de l'activité d'inondation de terrain. Il est utilisé pour cartographier les altitudes, les pentes et la densité de drainage avec l'utilisation de leurs attributs numériques : Les couches de données d'altitude se composent de neuf classes de 877 à 1716 m.

Tableau 10 : Classes d'altitude de la zone d'étude

Altitude (m)	Surface	
	Km ²	%
1431 - 1716	160	4
1350 - 1431	345	8
1271 - 1350	419	10
1194 - 1271	471	11
1113 - 1194	462	11
1032 - 1113	556	13
957 - 1032	748	17
877 - 957	780	18
770 - 877	438	10
Total	4378	100

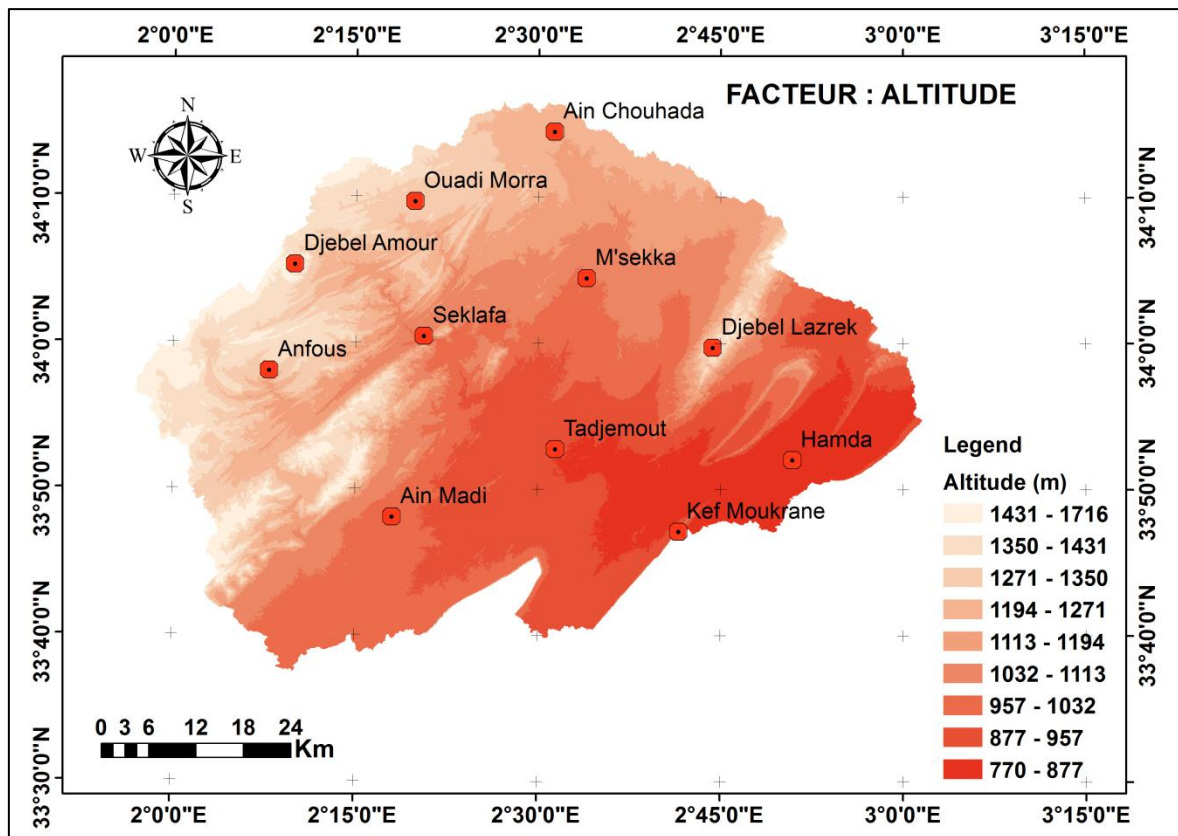


Figure 14. Carte des altitudes

3.1.4. Les pentes

L'eau s'écoule des altitudes les plus élevées aux plus basses et par conséquent, la pente influe sur la quantité de ruissellement de surface et d'infiltration. Les zones plates en basse altitude peuvent être plus courtes que les zones en altitude avec une pente plus raide.

La carte de pentes représentée par la figure 18 est établie à partir du modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 m, les valeurs des pentes sont regroupées en 4 classes ainsi :

Tableau 11 : Classes de pentes de la zone d'étude

Classes de pentes %	Surface	
	Km ²	%
0 ----- 5	2459	56.2
5 ----- 15	1562	35.7
15 ----- 30	323	7.4
+ 30	34	0.8
Total	4378	100

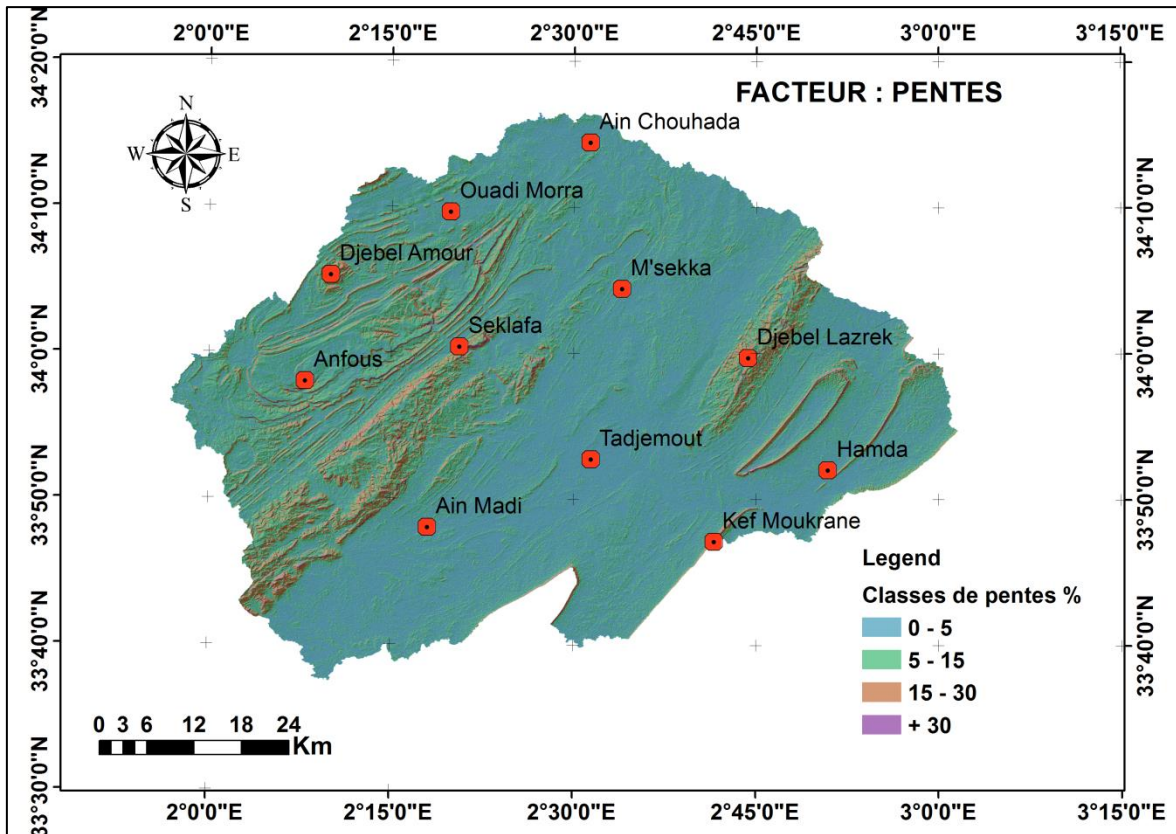


Figure 15 : Carte des pentes de la zone d'étude

Pente : 0 - 5% caractérise l'ensemble des terrains dont la topographie est généralement plane. Ce sont les fonds de vallées, les plaines et les plateaux. Elle couvre en moyenne 56.2% de la superficie totale du bassin versant.

Pente 5 - 15% caractérise généralement un relief escarpé, qui peut être des plateaux ou bas de collines. Elle occupe une surface moyenne de l'ordre de 35.7% de la zone d'étude.

Pente 15 - 30%, elle caractérise le plus souvent les zones de piémonts qui sont le prolongement des reliefs montueux. Ce sont généralement des terrains de parcours. Cette classe occupe 7.4% du bassin versant de l'oued M'Zi.

Pente > à 30%, elle représente les hauts piémonts et les zones montagneuses de forte déclivité généralement couverte par la végétation forestière moins dense. Elles couvrent d'une surface moyenne de 0.8% de la zone d'étude.

☞ Les couches de données de la pente se composent de quatre classes de 0 à plus de 30%.

3.1.5- La densité de drainage

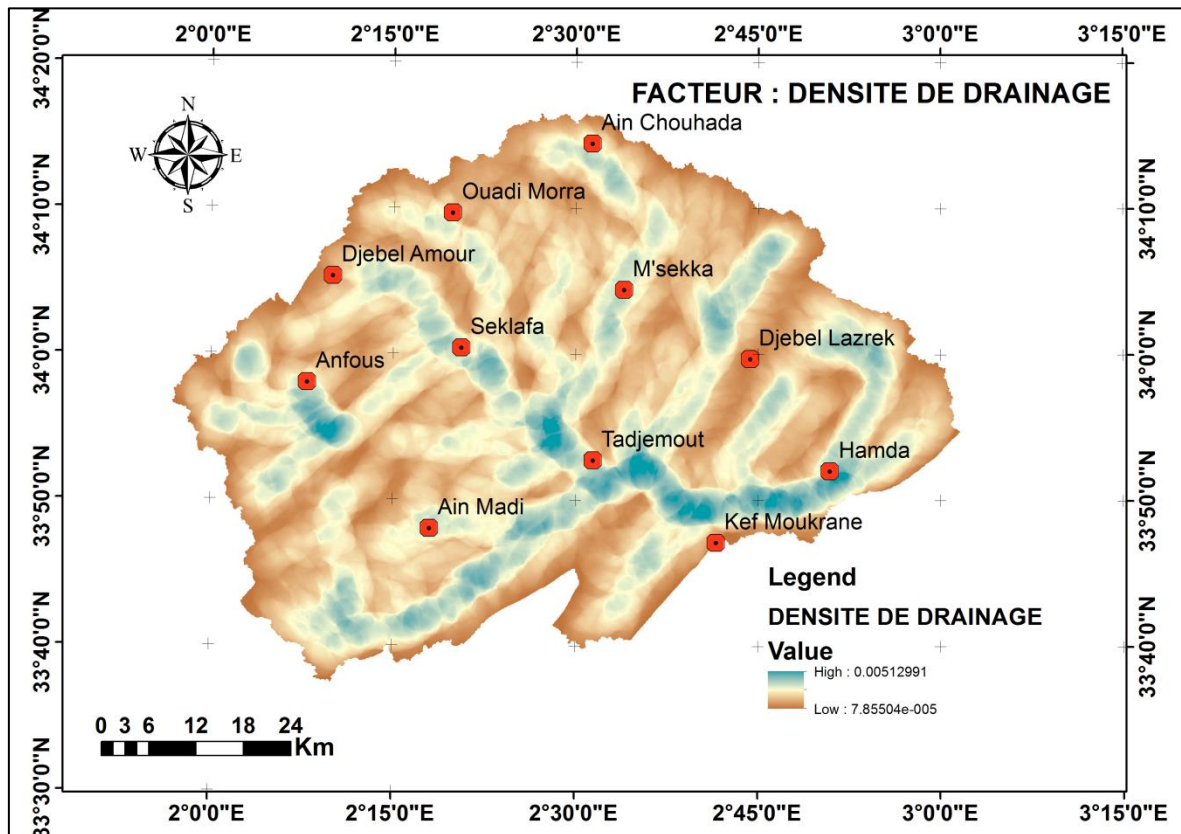


Figure 16: Carte de la densité de drainage.

Selon Finlayson et Montgomery (2003), Nekhay et al. (2009), Rahmati et al. (2017) et Pourghasemi et al. (2017), la densité de drainage (Dd) était considérée comme vulnérable au détachement de particules de sol par les eaux de crue. Les valeurs de ce paramètre (Dd) ont été extraites automatiquement par le modèle « *hydro-tools* » de l'ArcGIS. La valeur de la densité de drainage (Dd) retenue pour la construction de la matrice AHP est basé sur le concept de l'importance de ce facteurs vis-à-vis le phénomène en question.

☞ Les couches de données de la densité de drainage se composent de six classes de 1016×10^{-6} à 422×10^{-6} Km/Km.

3.1.6- Formations géologiques

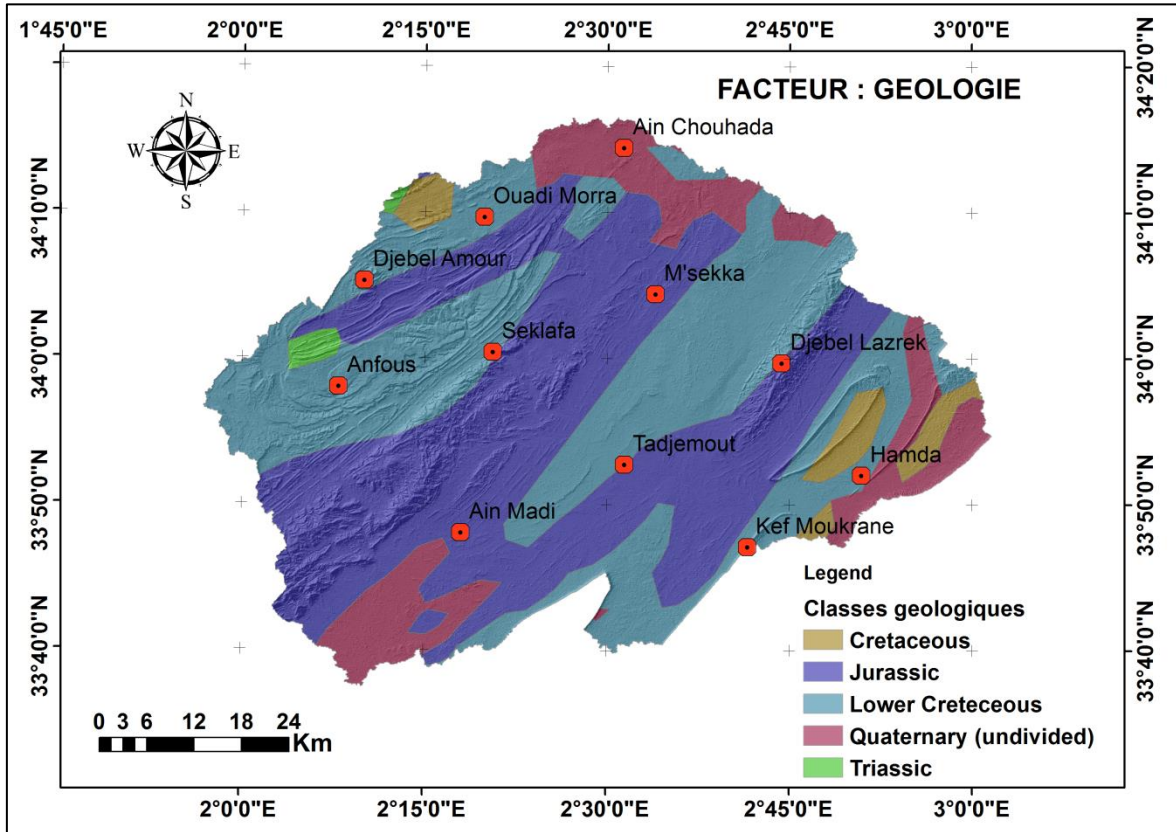


Figure 17: Carte de la formation géologique de la zone d'étude

D'ouest en Est, l'Atlas saharien peut être subdivisé en : Monts des Ksour, Massif du Djebel Amour, Monts des Ouled Naïl [61]. Nous nous intéressons plus spécialement ici au bassin versant de l'oued M'zi dans sa partie amont. Formation géographique est caractérisé par quatre ensembles géologiques importants, le jurassique (calcaire et marno-calcaire) qui s'étend sur une surface de 44,6 % de la surface du bassin versant, le crétacé (grès) représente 42.5% de la surface totale, le quaternaire (vallée de l'oued M'zi) occupe une surface de 12.3% tandis que le triasse ne représente que 0.7% de la surface totale (tableau 05).

Tableau 12 : Classes de la Géologie de la zone d'étude

Classe de géologie	Surface	
	Km ²	%
Quaternaire	538.08	12.3
Crétacé inférieur	1712.33	39.1
Jurassique	1950.86	44.6

Trias	29.83	0.7
Crétacé	146.80	3.4
Total	4378	100

Différentes formations géologiques ont des compositions différentes et des structures qui contribuent à la résistance du matériau.

Les roches plus solides donnent plus de résistance à la conduite forces par rapport aux roches plus faibles, et sont donc moins sujettes aux inondations de terrain.

La géologie de la zone d'étude est globalement divisée en cinq classes à savoir : le jurassique, crétacé inférieur, triasique, crétacé et quaternaire. En tant que formation géologique prédominante, il s'agit du Crétacé inférieur et du Jurassique avec un pourcentage de superficie de 39,1 % et 44,6 %, respectivement.

3.1.7- Occupation du sol/couverture pédologique des terres

Les différentes classes de végétation et/ou occupation du sol ont été cartographiées à partir de la classification supervisée d'une image satellitaire multi-spectrale Sentinel-2 Multi spectral Instrument (MSI). Le traitement de l'imagerie sur Logiciel ENVI 5.1 a subi d'abord des prétraitements à savoir les corrections géométriques. Ensuite, ces résultats nous a permet d'obtenir une carte du couvert végétal classée en six classes (activités agricoles, forêts, roches dolomitiques, sable, sols alluvionnaires, terrains calcaires) (fig. 18).

Occupation du sol/couverture pédologique des terres sont également des facteurs clés responsables des inondations de terrain. L'incidence des inondations de terrain est inversement proportionnelle à la densité de la végétation. Par contre, les terrains calcaires et des sols alluvionnaires, après une longue période estivale, sont plus sujets aux inondations de terrain.

L'effet des inondations sur l'activité agricole au niveau de la vallée de Hamda est remarquable ces dernières années. Les inondations de terrain peuvent se produire des dégâts matériels considérables en raison de l'extension rapide des activités agricoles au bord nord de l'oued. Au cours des visites sur le terrain, certains crues, en particulier celle de l'année 2016, certifiées l'effet de l'inondation sur ces régions.

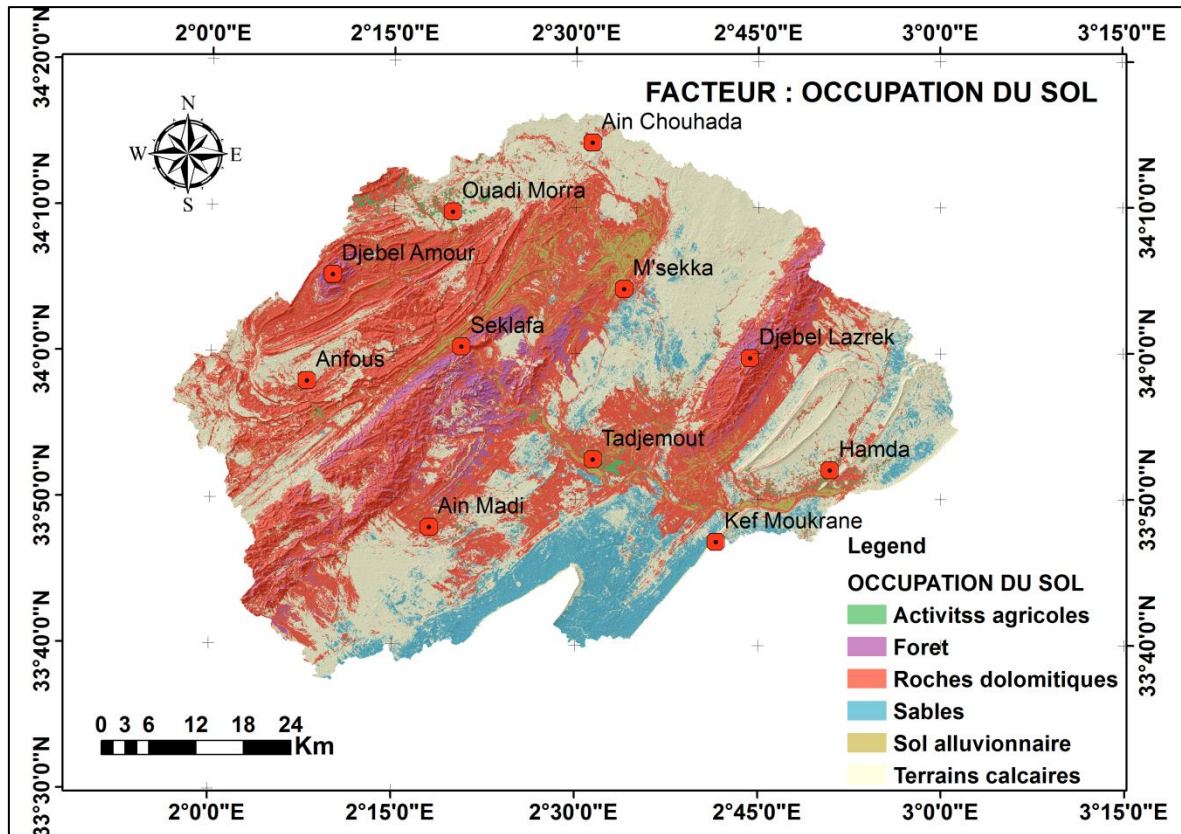


Figure 18 : Carte du facteur couvert végétal

Tableau 13. Facteurs influençant les inondations par la technique AHP

Facteurs	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	Poids normalisé
(1) Précipitations (mm)	1	3	9	9	3	5	5	0.39
(2) Perméabilité (mm/H)		1	5	7	3	3	3	0.22
(3) Pente %			1	3	1/3	1/3	1/3	0.03
(4) Densité de drainage (Km/Km)				1	1/5	1/3	1/5	0.04
(5) Altitude (m)					1	3	3	0.15
(6) Occupation du sol et couverture pédologique						1	1/3	0.07
(7) Géologie							1	0.11
Consistance ratio								0.08

A partir de la matrice réalisée deux à deux pour les facteurs : précipitations ; perméabilité ; pente ; densité de drainage ; altitude ; occupation et couverture pédologique des sols ; et la géologie du terrain (tableau 13), nous avons calculé le poids normalisé de chaque facteur. Le ratio de cohérence CR est également calculé selon l'équation de Saaty (1977). La valeur de ce dernier est de l'ordre de 0,08.

3.2- Evaluation des sous facteurs par la technique AHP participants à la production d'inondations

Tableau 14 : Evaluation des sous facteurs par la technique AHP

Facteurs	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	Poids Normalisés
Précipitations (mm)										0.39
(1) 280 - 293	1	3	3	9	5	7	5	7	9	0.344
(2) 267 - 280		1	3	5	3	5	3	5	7	0.205
(3) 253 - 267			1	3	3	3	3	3	5	0.133
(4) 240. - 253				1	1/2	1/2	1/2	3	3	0.049
(5) 227 - 240					1	1/2	1/2	3	3	0.063
(6) 213 - 227						1	1/2	3	3	0.067
(7) 200. - 213.3							1	1/2	3	0.071
(8) 1867- 200								1	1/2	0.039
(9) 173 - 187									1	0.029
Consistance ratio										0.09
Perméabilité (mm/H)										0.22
(1) Non perméable	1	5	9							0.74
(2) Perméable		1	3							0.18
(3) Très perméable			1							0.07
Consistance ratio										0.04
Pente (%)										0.03
(1) 0 - 5	1	3	5	7						0.57
(2) 05 - 15		1	3	3						0.23
(3) 15 - 30			1	1/2						0.08
(4) + 30				1						0.106
Consistance ratio										0.07
Densité de drainage (mm/H)										0.04
(1) 0.001016 - 0.001502	1	3	9	9	5					0.53
(2) 0.000612 - 0.001015		1	3	5	3					0.22
(3) 0.000626 - 0.000611			1	3	1/3					0.07
(4) 0.00423 - 0.000625				1	1/5					0.03
(5) 0.000021 - 0.000422					1					0.13
Consistance ratio										0.08
Altitude (m)										0.15
(1) 770 - 877	1	1/2	1/2	1/2	1/2	3	3	3	5	0.06
(2) 877 - 957		1	1/2	1/2	1/2	1/2	5	5	7	0.06
(3) 957- 1032			1	1/2	1/2	1/2	3	3	5	0.05
(4) 1032- 1113				1	1/2	1/2	5	5	9	0.04
(5) 1113 - 1194					1	1/2	5	5	7	0.03
(6) 1194 - 1271						1	3	5	7	0.04
(7) 1271 - 1350							1	3	3	0.15
(8) 1350- 1431								1	3	0.21
(9) 1431 - 1716									1	0.33
Consistance ratio										0.09
Occupation du sol et couverture pédologique										0.07

(1) Terrains calcaires	1	3	9	9	3	7				0.45
(2) Sol alluvionnaires		1	3	5	3	3				0.21
(3) Activités agricoles			1	3	1/3	1/3				0.05
(4) Roches dolomitiques				1	1/5	1/3				0.03
(5) Sables					1	3				0.15
(6) Forêt						1				0.08
Consistance ratio										0.08
Géologie										0.11
(1) Jurassique	1	3	9	9	3					0.48
(2) Crétacé inférieur		1	4	7	3					0.25
(3) Quaternaire			1	3	1/3					0.06
(4) Crétacé				1	1/5					0.03
(5) Trias					1					0.15
Consistance ratio										0.07

Selon les jugements apportés au niveau de la matrice de comparaison, on révèle les constations suivantes: les facteurs précipitations et perméabilité contribuent davantage au phénomène d'inondation du bassin versant avec un pourcentage pondérale du poids normalisé de 39 % et 22 % respectivement. Elles sont suivies, respectivement 9 %, par le facteur altitude (15%), géologie de terrain (11 %). L'occupation du sol et couverture pédologique, la densité de drainage et la pente sont impliquées à faibles valeurs dans le phénomène d'inondation avec 7%, 4% et 3%, respectivement.

D'après le **tableau 14**, on note que les valeurs de précipitations dont les valeurs varient entre 267 et 293 mm/an ont des poids significatifs s'échelonnant entre 34.4% et 13.3% .Ces valeurs se caractérisent les régions d'Infous, Djebel Amour et Oued Morra situées dans le secteur nord-ouest de la zone d'étude. Quant aux faibles valeurs de précipitations (entre 240mm/an et 173 mm/an), leurs poids sont également faibles variant entre 4.9% et 2.9 %. Ces valeurs sont enregistrées dans le secteur sud-est de la zone d'étude.

Concernant la perméabilité sa valeur maximale en poids normalisé est de l'ordre de 74% enregistré dans la classe non perméable. Cette valeur a été observée dans le secteur . Alors que les valeurs du poids normalisé faible sont observées .dans les classes : perméable et très perméable avec des valeurs respective de 18 % et 7%.

En ce qui concerne la pente, on remarque que le poids normalisé maximal (57 % 23 %) est varié entre 0 à 5% et 5 % à 15 %. Ces valeurs sont observées dans les régions de l'Oued Morra, Tadjemout et Ain Madi. Alors que les valeurs du poids normalisé faible sont observées .dans les classes 15 % à 30 % et + 30% avec des valeurs de 8% et 10.6% respectivement.

En ce qui concerne la densité de drainage on remarque que le poids normalisé maximal (53 % et 22%) varié entre (0.001016 à 0.001502) et (0.000612 - 0.001015). Ces valeurs sont observées dans les régions de situées le long des principaux cours d'eau.

Alors que les valeurs du poids normalisé faible sont observées sur points sommitales de la zone d'étude. Les classes à faibles densité de drainage : (0.000626 à 0.000611) et (0.00423 à 0.000625) et (0.000021 à 0.000422) participent avec des valeurs de pondération de 7% ; 3% ; 13 respectivement.

Concernant le paramètre d'altitude, on remarque que les poids normalisés maximaux sont de l'ordre de 33% 21% ; 15%. Ces taux sont observés au niveau des classes d'altitude de 1431 à 1716, 1350 à 1431 et 1271 à 1350, respectivement. Ces altitudes se caractérisent la majeure partie du secteur nord-ouest du bassin versant de l'oued M'zi à savoir : les sommets du Djebel Amour, Infous ... etc.

Concernant l'occupation du sol et couverture pédologique, les terrains calcaires, les sols d'apport alluvionnaire et les sables se présentent des poids normalisés de l'ordre de 45%, 21% et 15% respectivement. Ces classes d'occupation des sols se trouvent majoritairement dans vallées de Hamda et celle d'Ain Madi et Tadjemout. Quant aux autres occupations des sols (forêts, activités agricoles et roches dolomitiques), les pondérations du poids normalisé ne dépassent pas la valeur de 8%.

Quant aux formations géologiques, le Jurassique, le Crétacé inférieur et le Trias représentent des valeurs du poids normalisé élevées par rapports aux autres formations géologiques. Ces valeurs sont de l'ordre de 48%, 25% et 15% respectivement. Ces formations géologiques se caractérisent sur les sommets du bassin versant dans le secteur nord-ouest. Alors que les faibles valeurs du poids normalisé sont enregistrées au niveau du Quaternaire et de Crétacé avec respectivement, 6% et 3%.

3.3- CARTOGRAPHIE DES ZONES A RISQUE D'INONDATION DANS LA REGION DE HAMDA

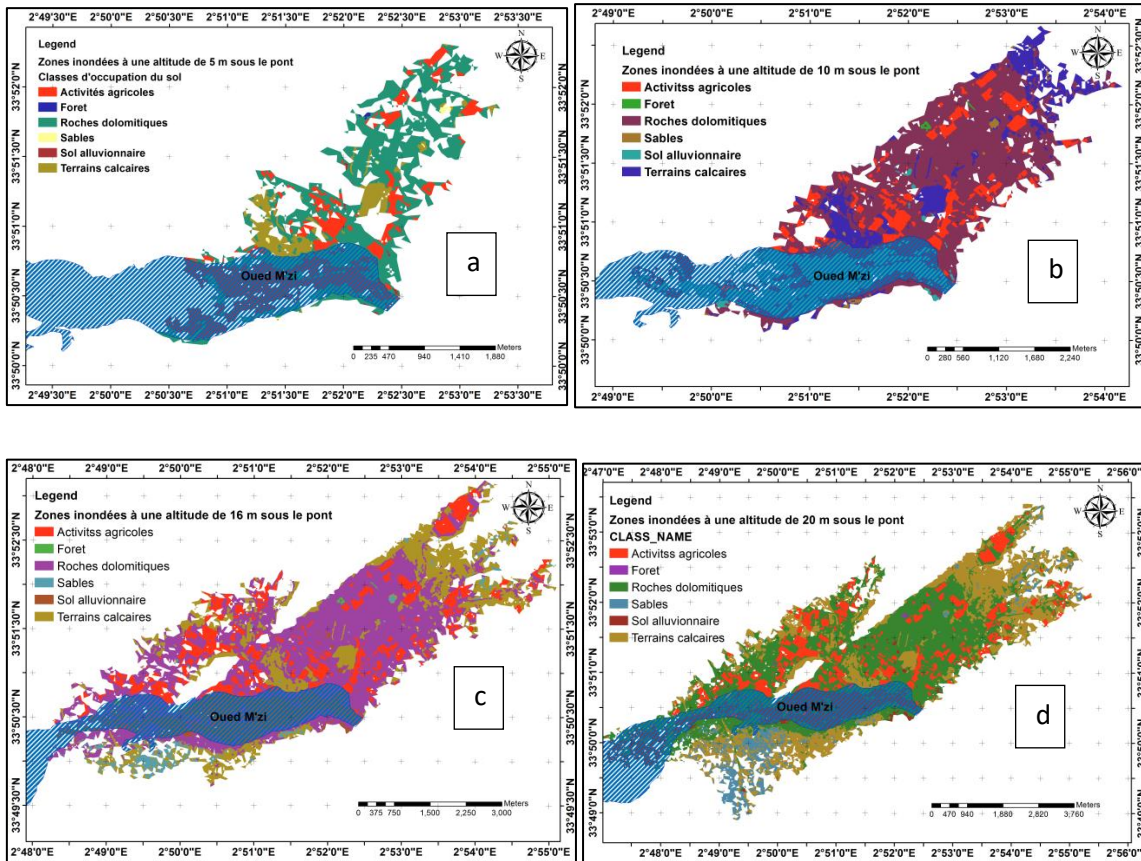


Figure 19 a) : zone inondée à une altitude de 5m sous le pont, b) : zone inondée à une altitude de 10 m sous le pont, c) zone inondée à une altitude de 16m sous le pont et d) : zone inondée à une altitude de 20m sous le pont.

Tableau 15 : Les occupations/couverture pédologique du sol inondées en fonction des tranches d'altitudes mesurées sous le pont

Classe d'occupation du sol couverture pédologique	Surface inondée 1 (Ha)	Surface inondée 2 (Ha)	Surface inondée 3 (Ha)	Surface inondée 4 (Ha)
Terrains calcaires	45	132	466	892
Roches dolomitiques	274	606	1087	1375
Activités agricoles	56	109	325	406
Sol alluvionnaire	114	198	267	361
Forêt	1	2	2	2
Sables	2	6	59	188

D'après les figures et le tableau 14, nous remarquons que la zone d'activité agricole inondée, lorsque le niveau d'eau atteint 5 mètres sous le pont, est de 56 hectares. Alors que l'immersion, lorsque le niveau d'eau atteint 10 mètres sous le pont, est de 109 hectares. Lorsque le niveau d'eau sous le pont atteint 16 mètres, la zone d'activité agricole est

d'environ 325 hectares, tandis que le niveau d'eau atteint 20 mètres sous le pont, et la zone agricole immergée est de 406 hectares.

Conclusion

Dans cette étude, nous avons utilisé la méthode (AHP) et l'analyse SIG pour produire des cartes de sensibilité au phénomène d'inondation dans le bassin versant de l'oued M'zi. Les couches de données utilisées dans la production des cartes du risque d'inondation ont été sélectionnées très soigneusement en analysant les paramètres influençant le phénomène. Une base de données est produite en numérisant les données de terrain, d'images satellite et de cartes topographiques dans l'environnement SIG. Nos résultats ont révélé que les précipitations et la perméabilité sont les paramètres les plus influençant le phénomène d'inondation suivies par l'altitude et la géologie de terrain respectivement. L'occupation du sol/couverture pédologique, la densité de drainage et la pente sont des paramètres moins importants dans le risque d'inondation.

Dans sa partie aval, des dégâts matériel considérables touchant en premier lieu les activités agricoles. L'analyse des images satellites issues du sentinel-2 montre qu'une surface de 56 ha lorsque le niveau d'inondation, sous le pont, atteint un niveau de 5 mètres. Lorsque le niveau d'eau atteint 10 mètres sous le pont, la surface immergée est de 109 hectares. Lorsque le niveau d'eau atteint 16 mètres, la surface agricole immergée est d'environ 325 hectares, tandis que le niveau d'eau atteint 20 mètres sous le pont, la zone agricole immergée est de 406 hectares.

Références bibliographiques

- Boubchir, M.A. (2007), Risques d'inondation et occupation des sols dans le thore (région de labruguiere et de mazamet). Toulouse.
- Conférence Nationale sur les risques majeurs CNRM (2018). Prise en charge de la problématique des inondations ; 49p.
- DESBORDES M. (1997). La gestion urbaine du risque d'inondation : problématique et enjeux. La Houille Blanche, vol. 7, pp. 20-24
- Hountondji, B., CODO, F., DAHOUNTO, S., & GBAGUIDI, T. (2019). Flood Management in Urban Environment: Case of the Cotonou City in Benin. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (39), 333-347.
- Lahmaza, I., Abaidia, O., & Ghezal, I. (2020). Repenser la gestion du risque d'inondation.
- Ledoux, B.(2006) : « La gestion du risque inondation », Edition Tec et Doc.
- Merabet, A.(2006): «Etude de la protection de la ville de Sidi Bel Abbés contre les inondations» , Mémoire de Magister, Université de Djilali Liabes-Sidi Bel Abbés
- OUERDACHIL, 2012, mémoire de master étude des lâchers du barrage et leurs
- Perrier, E. R., & Salkini, A. B. (Eds.). (2012). Supplemental Irrigation in the Near East and North Africa: Proceedings of a Workshop on Regional Consultation on Supplemental Irrigation. ICARDA and FAO, Rabat, Morocco, 7–9 December, 1987. Springer Science & Business Media.
- POTTIER N. (1998). L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne). Thèse de doctorat de Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Cereve. 436 p.
- Rahmani, C.(2004) : «Les risques majeurs et l'aménagement du territoire» , Colloque International, 15 et 16 2004-Alger
- Rentschler, J.; Salhab, M. 2020. People in Harm's Way : Flood Exposure and Poverty in 189 Countries. Policy Research Working Paper;No. 9447. World Bank.
- Saaty, T.L. (1977).A scaling method for priorities in hierarchical structures. J Math Psychol15(3):234–281. Doi:10.1016/0022- 2496 (77) 90033-5
- Saaty, T.L. (1980).The analytic hierarchy process. McGraw-Hill, New York
- SPPPI, (2004) : « Prise en compte du risque inondation dans les études de dangers des installations classées» , Cahier technique N°8, DRIRE Haute-Normandie - 21, avenue

Références bibliographiques

de la Porte des champs - 76037 ROUEN CEDEX Tél. 02 35 52 32 00 - Fax 02 35 52 32 32.

- WALLEZ. L. (2010). Inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest: diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le grand Cotonou. Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement de l'Université de Sherbrooke en vue de l'obtention du double diplôme de maîtrise en environnement et master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable, 78p.
- Ramos anabela, lúcio cunha, pedro p. cunha (20014) : Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré .
- Jiang, C., Yilong, Z., Zongyu, C., Zhenlong, N. (2014). Improving assessment of groundwater sustainability with analytic hierarchy process and information entropy method: a case study of the Hohhot Plain, China. *Environ Earth Sci.* Doi 10.1007/s12665-014-3583-0
- Pradeep, G. S., Ninu Krishnan, M. V., Vijith, H. (2015). Identification of critical soil erosion prone areas and annual average soil loss in an upland agricultural watershed of Western Ghats, using analytical hierarchy process (AHP) and RUSLE techniques. *Arab J Geosci.* Doi 10.1007/s12517-014-1460-5
- Bagherzadeh, A., Daneshvar, M.R.M. (2013). Mapping of landslide hazard zonation using GIS at Golestan watershed, northeast of Iran. *Arab J Geosci.*, 6:3377–3388. Doi. 10.1007/s12517-012-0583-9
- Zare, M., Panagopoulos, T., Loures, L. (2017). Simulating the impacts of future land use change on soil erosion in the Kasilian watershed, Iran. *Land Use Policy* 67, 558–572. doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.06.028
- Roose, E.J. et Lelong, F. (1976). Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale. Etudes sur petites parcelles expérimentales de sol. *Revue de Géographie physique et de Géologie dynamique* (2), Vol. xviii, fasc. 4, 365-374, Paris.
- Sar, N., Khan, A., Chatterjee, S., Das, A., Mipun, B.S. (2016). Coupling of analytical hierarchy process and frequency ratio based spatial prediction of soil erosion susceptibility in Keleghai river basin, India. *International Soil and Water Conservation Research.* Doi/10.1016/j.iswcr.2016.09.004

Références bibliographiques
