



**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Géotechnique

Par :

BOUZIDI DJAMAL EDDINE

THEME

***ANALYSE DE LA VULNERABILITE DE LA VILLE DE M'SILA AUX
ALEAS NATURELS***

(Cas des berges de l'oued Ksob)

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

MEDDAH Abdelaziz, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

BERRABAH Fouad, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

SEDDIKI Ahmed, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

KHEMISSA Mohamed, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Co-Encadreur

Promotion : 2024/2025

Remerciements

Je dédie ce travail avant tout à la mémoire de ma chère mère, que j'ai perdue durant le mois de Ramadan. Son amour, ses sacrifices et ses prières m'ont toujours accompagné, même en son absence. Rien de tout cela n'aurait été possible sans elle. Qu'Allah lui accorde sa miséricorde et lui ouvre les portes du Paradis.

Je remercie aussi profondément mon père pour son soutien constant, sa patience et sa présence rassurante tout au long de mon parcours.

À toute ma famille, merci du fond du cœur pour votre encouragement, votre aide et votre confiance. Vous avez été ma force dans les moments les plus difficiles.

Résumé

Cette étude a évalué le **risque d'inondation** pour les berges de l'Oued Ksob à Msila en superposant une **carte d'aléa** (basée sur l'élévation, les pentes, la proximité des oueds, les précipitations et la géologie) et une **carte de vulnérabilité** (dérivée de l'occupation des sols), le tout via **ArcGIS**. Les résultats sont clairs : **74% de la zone présente un risque moyen à très élevé**, avec 34% de risque moyen, 27% de risque élevé et 13% de risque très élevé. La comparaison avec l'historique des inondations confirme que les zones inondées correspondent majoritairement aux zones à **risque élevé à très élevé**. Cela souligne l'importance de ces facteurs pour la gestion des risques et indique qu'un autre affluent, l'Oued Bouretem, pourrait aussi influencer les inondations à l'ouest.

Mots clés : risque, Inondation, aléa, Vulnérabilité, Oued Ksob, oued Bouretem.

Abstract

This study assessed **flood risk** along the banks of the Oued Ksob in Msila by **superimposing a hazard map** (based on elevation, slopes, proximity to wadis, precipitation, and geology) and a **vulnerability map** (derived from land use/land cover), all using **ArcGIS**. The results are clear: **74% of the area presents a moderate to very high risk**, with 34% at moderate risk, 27% at high risk, and 13% at very high risk. A comparison with historical flood records confirms that the flooded areas largely correspond to the **high to very high risk zones**. This underscores the importance of these factors for risk management and indicates that another tributary, **Bouretem river**, may also influence flooding in the western part of the region.

Keywords: Flood, risk, **hazard map**, vulnerability, Ksob River, **Bouretem river**.

خلاصة

لقد قُيِّمت هذه الدراسة **خطر الفيضانات** على ضفاف وادي القصب في المسيلة، وذلك بتطبيق طريقة التراكم استخدام برنامج "أركجيس". اعتمدت الدراسة على دمج **خارطة للمخاطر المحتملة** التي ارتكزت على الارتفاع، الانحدارات، القرب من الوديان، التساقطات المطرية، والجيولوجيا – مع **خارطة قابلية التأثر** أو ما يسمى **بالهشاشة** المستمدة من عامل استخدام الأراضي. النتائج واضحة: **74% من المنطقة تحمل خطراً متوسطاً إلى مرتفع جداً**؛ حيث بلغت نسبة الخطر المتوسط 34%، والخطر المرتفع 27%، والخطر المرتفع جداً 13%. كما أكدت مقارنة هذه النتائج مع السجل التاريخي للفيضانات أن المناطق التي غمرتها المياه في الماضي تتوافق بشكل كبير مع المناطق المصنفة على أنها ذات **خطر مرتفع إلى مرتفع جداً**. هذا يؤكد أهمية هذه العوامل في إدارة المخاطر، ويشير إلى أن رافداً آخر، وهو **وادي بورتيم**، قد يؤثر أيضاً على الفيضانات في الجزء الغربي من المنطقة.

الكلمات المفتاحية: فيضانات، خطر، مخاطر، هشاشة، وادي القصب، وادي بورتيم.

SOMMAIRE

RESUME	
SOMMAIRE	
LISTE DES FIGURES	
LISTE DES TABLEAUX	

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

CHAPITRE PREMIER

Les Systèmes d'Informations Géographiques fondements et applications en Génie Civil

<i>I.1 Introduction.....</i>	<i>5</i>
<i>I.2 Définition</i>	<i>5</i>
<i>I.3 Rôle de SIG</i>	<i>6</i>
<i>I.4 Composants de SIG.....</i>	<i>7</i>
<i>I.5. Utilisation des SIG en Génie Civil.....</i>	<i>9</i>
<i>I.6. Applications traditionnelles</i>	<i>10</i>
<i>I.7. Applications émergentes</i>	<i>10</i>
<i>I.8. Applications des SIG aux études sur les inondations</i>	<i>11</i>
<i>I.9. Intégration de l'IA pour l'analyse prédictive des inondations</i>	<i>12</i>
<i>I.10. Perspectives d'avenir : SIG 3D et modélisation en temps réel</i>	<i>13</i>

CHAPITRE DEUXIEME

Les Inondations – Concepts, Mécanismes et Enjeux

<i>II.1. Vulnérabilité</i>	<i>16</i>
<i>II.2. Aléa.....</i>	<i>16</i>
<i>II.3. Le risque</i>	<i>16</i>
<i>II.4. Risque d'inondation</i>	<i>17</i>
<i>II.5. Évaluation des risques d'inondation.....</i>	<i>17</i>
<i>II.6. Facteurs déclencheurs.....</i>	<i>18</i>

<i>II.7. Processus d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations</i>	20
<i>II.8. Modélisation hydraulique et hydrologique</i>	21

CHAPITRE TROISIEME

Méthodes et Outils Numériques pour l'Analyse des Inondations

<i>III.1. La méthode analytique hiérarchique (AHP)</i>	24
<i>III.2. Méthodes implémentées dans ArcMap</i>	25
<i>III.2.1. Présentation d'ArcMap du logiciel ArcGIS d'ESRI</i>	25
<i>III.2.2. Techniques de superposition et d'analyse spatiale dans ArcMap</i>	27
<i>III.3. Algorithmes d'apprentissage automatique pour la prévision des inondations</i>	29
<i>III.4. Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique</i>	31

SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE QUATRIEME

Analyse de la Vulnérabilité aux Inondations de la Ville de M'sila

<i>IV.1. Présentation générale de la zone d'étude</i>	35
<i>IV.2. Recueillement et préparation des données</i>	37
<i>IV.3 Elaboration du modèle d'étude</i>	38
<i>IV.4. Conception et traitement des cartes thématiques</i>	40
<i>IV.5. Production des cartes de risque</i>	42
<i>IV.6. Interprétation des résultats cartographiques</i>	46
<i>IV.7. Carte d'inventaire des inondations à M'Sila</i>	47
<i>IV.8. Vérification et validation des cartes produites</i>	49
<i>IV.9. La carte de risque : un outil d'aide à la décision</i>	50
<i>IV.10. Synthèse</i>	53

CONCLUSIONS GENERALES	55
------------------------------------	-----------

REFERENCES	58
-------------------------	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Composants de SIG	8
Figure II. 1. Définition de risque	17
Figure II. 2. Schéma conceptuel du risque	18
Figure II. 3. Processus d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations.....	20
Figure III. 1. Sigle d'ESRI Environmental Systems Research Institute	25
Figure III. 2. Sigle de la plateforme ArcGIS d'ESRI.....	26
Figure III. 3. Sigle du module ArcMap du logiciel ArcGIS d'ESRI et à droite ArcGIS Pro	26
Figure III. 4. Exemple d'application du principe de la superposition pondérée	27
Figure III. 5. Principe de la somme pondérée	28
Figure III. 6. Exemple d'utilisation de la superposition floue	28
Figure IV.1. Localisation géographique de la ville de M'Sila.....	35
Figure IV.2. Région potentiellement exposée aux risques d'inondation générés par oued Ksob .	36
Figure IV. 3. Modèle d'étude utilisé	38
Figure IV. 4. Facteurs déclencheurs.....	40
Figure IV. 5.les cartes thématiques	41
Figure IV. 6.Carte d'aléa	42
Figure IV. 7. Carte de vulnérabilité.....	44
Figure IV. 8. Carte de risque	45
Figure IV. 9. Carte d'inventaire des inondations à Msila	48

LISTE DES TABLEAUX

Tableau IV.1. Sources et nature des données collectées	37
--	----

Introduction Générale

Les inondations représentent l'un des aléas naturels les plus dévastateurs, causant des pertes humaines, matérielles et environnementales considérables. La ville de M'Sila, située en Algérie, est particulièrement vulnérable aux inondations en raison de sa proximité avec l'oued Ksob, dont les crues soudaines ont déjà provoqué des dégâts majeurs par le passé. Face à cette menace, une analyse approfondie de la vulnérabilité de cette région aux inondations s'avère essentielle pour élaborer des stratégies de prévention et de gestion des risques.

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une étude géotechnique visant à évaluer la vulnérabilité de la ville de M'Sila aux inondations, en se focalisant sur les berges de l'oued Ksob. Il combine des approches traditionnelles et modernes, notamment l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique (SIG), des modèles hydrauliques et hydrologiques, ainsi que des techniques d'intelligence artificielle pour une analyse prédictive. L'objectif est de produire des cartes thématiques (aléa, vulnérabilité, risque) afin d'identifier les zones critiques et de proposer des solutions adaptées.

Pour atteindre l'objectif, le travail est divisé en quatre chapitres :

Chapitre I : Les Systèmes d'Information Géographique – Fondements et Applications en Génie Civil

Ce chapitre présente les concepts de base des SIG, leurs composants et leur rôle dans la gestion des risques naturels. Il aborde également leurs applications traditionnelles et émergentes, notamment dans l'analyse des inondations et l'intégration de l'intelligence artificielle.

Chapitre II : Les Inondations – Concepts, Mécanismes et Enjeux

Ce chapitre explore les causes naturelles et anthropiques des inondations, les facteurs déclencheurs (pluviométrie, topographie, occupation des sols), ainsi que les méthodes d'évaluation des risques. Il inclut également une analyse de la stabilité des digues, cruciale pour la protection contre les crues.

Chapitre III : Méthodes et Outils Numériques pour l'Analyse des Inondations

Ce chapitre détaille les techniques avancées utilisées pour cartographier les risques, telles que la superposition pondérée, la méthode analytique hiérarchique (AHP) et les algorithmes d'apprentissage automatique. Il met en lumière l'apport des modèles hydrauliques et des jumeaux numériques.

Chapitre IV : Analyse de la Vulnérabilité aux Inondations de la Ville de M'Sila

Ce chapitre applique les concepts précédents à la zone d'étude. Il présente la méthodologie de collecte et de traitement des données, la production des cartes thématiques, ainsi que l'interprétation des résultats. Une attention particulière est portée à la validation des cartes et à leur utilité pour les décideurs locaux.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE PREMIER

Les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG)

Fondements et Applications en Génie Civil

Les Systèmes d'Informations Géographiques fondements et applications en Génie Civil

I.1 Introduction

Dans le monde actuel, où la localisation et les aspects spatiaux influencent profondément notre compréhension et notre gestion de l'information, des dynamiques sociales aux changements environnementaux, il est nécessaire de disposer d'outils capables de capturer, d'analyser et de présenter efficacement et significativement les données géospatiales. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) jouent un rôle essentiel pour répondre à ce besoin.

I.2 Définition

Un Système d'Information Géographique « SIG » est la traduction de l'abréviation anglais GIS qui désigne : Geographic Information Systems.

D'après FICCDC-1988 (Comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique) : SIG est un « Système informatique de matériels, de logiciels, et de processus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modification et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion ».

Une autre façon de définir un SIG. Un SIG renvoie à l'analyse systémique. Un SIG englobe en général quatre sous-systèmes :

- Un sous-système pour l'acquisition des données géographiques qui peuvent être d'origines diverses (environnement de la conduite avec les caractéristiques des sols, la géologie, la sismique) ;
- Un sous-système de gestion de données pour le stockage, l'organisation et la recherche de données ;

- Un sous-système d'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation des données géographiques ;
- Un système de présentation des résultats, soit sous forme de carte par l'affichage graphique à l'écran ou par sorties cartographiques sur papier, soit sous forme de listes ou de tableaux.

I.3 Rôle de SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) jouent un rôle essentiel dans divers aspects de la gestion environnementale et du développement durable. Voici quelques-unes de leurs principales fonctions et contributions :

I.3.1. Analyse des données spatiales : Les SIG permettent l'analyse de données spatiales, essentielle à la compréhension des schémas et tendances environnementaux. Cette capacité améliore les processus décisionnels dans des domaines tels que l'atténuation des catastrophes et l'urbanisme.

I.3.2. Suivi des ressources : Les outils SIG sont efficaces pour le suivi des ressources naturelles. Ils permettent de suivre leur évolution au fil du temps, un élément essentiel à une gestion durable des ressources.

I.3.3. Optimisation de l'utilisation des terres : Les SIG contribuent à optimiser l'utilisation des terres en fournissant des informations sur les meilleures pratiques de gestion foncière. Ceci est essentiel à la planification urbaine et à la garantie d'une utilisation durable des terres.

I.3.4. Gestion des risques de catastrophe : Les SIG jouent un rôle essentiel dans l'identification des zones à risque. L'analyse des données spatiales facilite la planification et la mise en œuvre de stratégies efficaces de gestion des risques de catastrophe.

I.3.5. Sensibilisation et participation du public : Les SIG renforcent la sensibilisation et la participation du public aux questions environnementales. En visualisant les données au moyen de cartes et de diagrammes, il permet à la communauté de débattre des pratiques durables.

En résumé, le SIG est un outil puissant qui soutient divers aspects de la gestion environnementale

et du développement durable en facilitant l'analyse, l'intégration et la visualisation des données, contribuant ainsi à une meilleure prise de décision et à la formulation des politiques. (Maurya & Kumar , 2024)

I.4 Composants de SIG

Les barrages jouent deux rôles principaux celui d'une part de stocker les apports d'eau afin de répondre aux besoins vitaux et économiques des populations (eau potable, irrigation, fourniture d'énergie, navigation), et celui d'autre part, de protection contre des effets destructeurs de l'eau (maîtrise des crues, rétention de sédiments,

Les systèmes d'information géographique (SIG) se composent de plusieurs composants clés qui interagissent pour collecter, gérer, analyser et visualiser des données spatiales.

I.4.1. Matériel : Il s'agit des périphériques physiques utilisés pour exécuter le logiciel SIG et stocker les données, tels que les ordinateurs, les serveurs, les GPS et les imprimantes. Le matériel est essentiel au traitement et à l'affichage des informations spatiales.

I.4.2. Logiciels : Les logiciels SIG fournissent les outils nécessaires à l'analyse, à la visualisation et à la gestion des données. Ils incluent des applications de cartographie, d'analyse spatiale et de gestion de bases de données. Parmi les logiciels SIG les plus populaires, on trouve ArcGIS, QGIS et MapInfo.

I.4.3. Données : Les données sont un élément essentiel des SIG, englobant à la fois les données spatiales (localisations géographiques) et les données attributaires (informations sur ces localisations). Les données spatiales peuvent se présenter sous la forme de cartes, d'images satellites ou de coordonnées GPS, tandis que les données attributaires fournissent du contexte, comme des statistiques démographiques ou des types d'utilisation des terres.

I.4.4. Personnels : Des professionnels qualifiés sont nécessaires pour exploiter efficacement les systèmes SIG. Cela inclut les analystes SIG, les cartographes et les data scientists qui maîtrisent la manipulation et l'interprétation des données spatiales pour éclairer la prise de décision.

I.4.5. Méthodes : Il s'agit des procédures et techniques utilisées pour collecter, analyser et interpréter les données SIG. Ces méthodes peuvent inclure l'analyse spatiale, la modélisation et la visualisation de données, qui aident à comprendre les relations spatiales complexes.

I.4.6. Réseau : Les SIG modernes incluent souvent un composant réseau, permettant le partage et la diffusion de données et d'applications SIG sur Internet. Cela permet la collaboration et l'accès aux ressources SIG depuis différents emplacements.

En résumé, les composants d'un SIG (matériel, logiciels, données, personnes, méthodes et réseau) fonctionnent ensemble pour faciliter une gestion environnementale efficace et le développement durable en permettant l'analyse et la visualisation des informations spatiales.

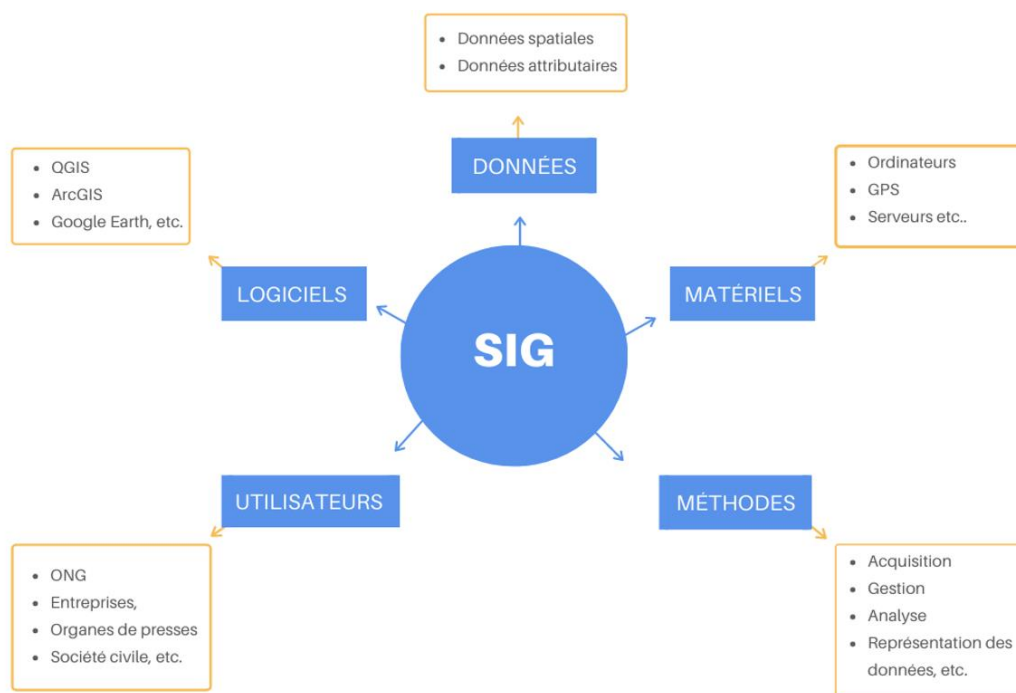


Figure I.1. Composants de SIG

I.5. Utilisation des SIG en Génie Civil

I.5.1. Aménagement urbain et gestion des infrastructures

L'aménagement urbain implique la gestion de l'occupation du sol, des réglementations de zonage et du développement des infrastructures. Les SIG jouent un rôle crucial dans la planification urbaine en fournissant des outils d'analyse et de visualisation spatiales. Par exemple, ils peuvent être utilisés pour identifier les zones à forte croissance démographique et planifier le développement des infrastructures en conséquence. Ils peuvent également contribuer à la gestion des équipements urbains tels que les réseaux d'approvisionnement en eau, les réseaux d'assainissement et la gestion des déchets (Ashani & Markna, 2020; Ade & Harahap, 2024). De plus, les SIG peuvent être utilisés pour analyser l'impact de l'urbanisation sur l'environnement et planifier des stratégies de développement durable

I.5.2. Ingénierie des ressources en eau

L'ingénierie des ressources en eau implique la gestion des systèmes d'approvisionnement en eau, la gestion des bassins versants et la lutte contre les inondations. Les SIG sont largement utilisés en ingénierie des ressources en eau pour analyser les données hydrologiques, telles que les régimes pluviométriques, les débits d'eau et les niveaux des eaux souterraines. Par exemple, les SIG peuvent être utilisés pour identifier les zones à fort potentiel en eaux souterraines et planifier les systèmes d'approvisionnement en eau en conséquence (Gangwar & Madav, 2017). De plus, les SIG peuvent être utilisés pour établir des cartes des risques d'inondation et planifier des stratégies d'atténuation des inondations (Bartoněk & Bureš, 2011)

I.5.3. Surveillance et gestion environnementales

La surveillance et la gestion environnementales sont des composantes essentielles du génie civil. Les SIG permettent de surveiller les changements environnementaux, tels que la déforestation, la dégradation des terres et la pollution atmosphérique. Par exemple, les SIG peuvent être utilisés

pour analyser l'imagerie satellite afin de surveiller la déforestation et de planifier les efforts de reboisement (Ade & Harahap, 2024; Baravkar & Mane, 2018). De plus, les SIG peuvent être utilisés pour préparer des études d'impact environnemental pour les projets de construction et planifier des stratégies d'atténuation.

I.5.4. Analyse structurelle et gestion des catastrophes

Les SIG sont également utilisés dans l'analyse structurelle et la gestion des catastrophes. Par exemple, les SIG peuvent être utilisés pour analyser l'intégrité structurelle des bâtiments et identifier les zones sujettes aux tremblements de terre et aux inondations (Jingjing, 2021) . De plus, les SIG peuvent être utilisés pour préparer des plans d'intervention en cas de catastrophe et gérer les services d'urgence en cas de catastrophe (Ade & Harahap, 2024).

I.6. Applications traditionnelles

I.6.1. Analyse de site : Les SIG sont couramment utilisés pour la sélection et l'analyse de sites. Les ingénieurs peuvent évaluer divers facteurs tels que la topographie, l'utilisation du sol et l'impact environnemental avant de décider de l'emplacement des routes, des ponts ou des bâtiments.

I.6.2. Planification des infrastructures : Les SIG facilitent la planification des infrastructures en fournissant des cartes détaillées et des données spatiales. Cela permet d'optimiser l'emplacement des services publics et des réseaux de transport, garantissant ainsi leur efficacité.

I.6.3. Évaluations d'impact environnemental : Les ingénieurs utilisent les SIG pour évaluer les impacts environnementaux potentiels des projets. Cela inclut l'analyse de l'impact potentiel de la construction sur les écosystèmes locaux et les systèmes de drainage des eaux.

I.7. Applications émergentes

I.7.1. Intégration aux drones : L'utilisation de drones équipés de la technologie SIG est de plus en plus répandue. Les drones permettent de surveiller rapidement de vastes zones et de collecter

des données haute résolution, améliorant ainsi la précision des cartes topographiques utilisées dans la planification des projets.

I.7.2. Réalité augmentée et virtuelle : Des technologies émergentes comme la réalité augmentée (RA) et la réalité virtuelle (RV) sont intégrées aux SIG. Ces technologies permettent aux ingénieurs de visualiser des modèles 3D de projets, aidant ainsi les parties prenantes à comprendre des conceptions complexes et à identifier les problèmes potentiels avant le début des travaux.

I.7.3. Analyse des données en temps réel : L'intégration des SIG à l'Internet des objets (IoT) permet la collecte continue de données à partir de capteurs. Ces données en temps réel peuvent être analysées pour suivre l'avancement des travaux et prendre rapidement des décisions éclairées.

I.7.4. Tendances futures : L'association des SIG à l'intelligence artificielle (IA) et à l'apprentissage automatique (AA) (Machine Learning ML) devrait améliorer encore leurs applications en génie civil. Ces technologies permettent d'analyser plus efficacement de grands ensembles de données, améliorant ainsi les prévisions et la gestion des ressources.

I.8. Applications des SIG aux études sur les inondations

I.8.1. Analyse spatiale : Les SIG permettent l'analyse spatiale des régions inondables et l'identification des zones inondables. Cela implique le calcul de la topographie, de l'occupation du sol et des données hydrologiques.

I.8.2. Intégration des données : Les SIG permettent de combiner des données provenant de sources diverses, telles que les régimes pluviométriques, le ruissellement des rivières et les historiques d'inondations, pour construire des modèles d'inondation complets. L'intégration est une condition préalable à une analyse efficace des risques d'inondation.

I.8.3. Cartographie des zones inondables : Les SIG permettent de générer des cartes haute résolution des risques d'inondation délimitant les zones inondables, essentielles à la planification urbaine et aux interventions d'urgence.

I.8.4. Avantages des SIG dans la modélisation des risques hydrologiques

Aide à la décision : Les SIG offrent des visualisations de données, facilitant ainsi la compréhension des risques hydrologiques et la planification en conséquence. La visualisation facilite la communication des risques aux parties prenantes.

Collecte de données en temps réel : La technologie SIG mobile permet la collecte et l'observation en temps réel des masses d'eau, un atout majeur en cas d'inondation. Elle améliore la capacité d'intervention des services d'urgence.

Analyse de scénarios : Le SIG permet la simulation de divers scénarios d'inondation, sous différents régimes pluviométriques et situations d'occupation du sol. Cela permet de comprendre les impacts potentiels et d'élaborer des stratégies d'atténuation

I.9. Intégration de l'IA pour l'analyse prédictive des inondations

I.9.1. Techniques d'IA pour la prévision des inondations : Les méthodes d'IA, notamment l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond, permettent d'analyser de vastes quantités de données géospatiales afin d'identifier des tendances et de prédire les inondations. Ces techniques peuvent améliorer la précision des prévisions d'inondations en s'appuyant sur des données historiques et des données en temps réel.

I.9.2. Apprentissage automatique géospatial : Cette approche permet le regroupement géographique et la classification spatiale, essentiels à l'identification des zones inondables. En analysant divers facteurs tels que les précipitations, la saturation des sols et la topographie, les modèles d'apprentissage automatique peuvent prédire les zones susceptibles de connaître des inondations.

I.9.3. Surveillance et alertes en temps réel : L'IA peut faciliter la surveillance en temps réel des conditions météorologiques et des niveaux d'eau, fournissant des alertes rapides en cas

d'inondation potentielle. Cette approche proactive peut aider les collectivités à se préparer et à réagir plus efficacement aux menaces d'inondation.

I.9.4. Systèmes d'aide à la décision : En intégrant l'IA aux SIG, les décideurs peuvent accéder à des visualisations intuitives et à des analyses spatiales qui améliorent leur compréhension des risques d'inondation. Cette intégration favorise une meilleure planification et une meilleure allocation des ressources lors des inondations.

I.10. Perspectives d'avenir : SIG 3D et modélisation en temps réel

I.10.1. Fonctionnalités SIG 3D : L'évolution des SIG vers les trois dimensions permet des représentations plus détaillées et plus réalistes des caractéristiques géographiques. Ceci est particulièrement utile pour l'urbanisme, la surveillance environnementale et la gestion des catastrophes. Les SIG 3D peuvent fournir des informations sur l'interaction des structures avec leur environnement, ce qui est crucial pour évaluer les risques tels que les inondations ou les glissements de terrain.

I.10.2. Intégration de données en temps réel : L'intégration de données en temps réel dans les systèmes SIG permet une modélisation dynamique des phénomènes géographiques. Par exemple, les données météorologiques en temps réel peuvent être utilisées pour actualiser en continu les évaluations des risques d'inondation. Cette capacité est essentielle pour une réponse rapide aux situations d'urgence et une allocation efficace des ressources en cas de catastrophe.

I.10.3. Collaboration et partage de données : Les futurs développements des SIG mettront probablement l'accent sur la collaboration entre les différentes parties prenantes. En partageant des données en temps réel et des modèles 3D, les collectivités peuvent collaborer plus efficacement pour relever des défis tels que le changement climatique et l'urbanisation.

I.10.4. Visualisation améliorée : Grâce aux SIG 3D, les utilisateurs peuvent visualiser des données complexes de manière plus intuitive. Cette fonctionnalité aide les décideurs à comprendre les relations spatiales et les impacts potentiels de divers scénarios, tels que le développement

urbain ou les catastrophes naturelles. La capacité d'analyser des données 3D peut conduire à des décisions et des stratégies.

CHAPITRE DEUXIEME

Les Inondations – Concepts, Mécanismes et Enjeux

Les Inondations – Concepts, Mécanismes et Enjeux

II.1. Vulnérabilité

Les définitions du MEDD (Ministère français de l'environnement et du développement durable) et de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont respectivement "la vulnérabilité est le niveau des conséquences anticipées d'un phénomène naturel sur les enjeux" ainsi que "la vulnérabilité des ressources à être affectées par les aléas"

La vulnérabilité est la sensibilité des individus, des communautés, des biens ou des systèmes aux impacts des aléas. Elle est influencée par divers facteurs, notamment les conditions physiques, sociales, économiques et environnementales. Une vulnérabilité élevée signifie qu'une communauté ou un système est plus susceptible de subir des dommages importants en cas d'aléa

II.2. Aléa

Les aléas désignent les phénomènes naturels susceptibles de causer des dommages. Il s'agit d'événements ou de conditions qui menacent les personnes, les biens et l'environnement. On peut citer comme exemples les tremblements de terre, les inondations et les ouragans. Comprendre les dangers est essentiel pour évaluer les risques potentiels qui y sont associés.

II.3. Le risque

Plusieurs auteurs distinguent le danger du risque, pour Pardo (M, 2002) le danger relève d'une menace sur les personnes ou sur leurs biens, alors que le risque est la mesure de la menace en termes de probabilité de pertes.

De façon synthétique nous pouvons retenir que « le risque est la mesure du niveau danger et désigne un futur qu'il s'agit d'empêcher d'advenir ». (Hubert, 2005)

Le risque est une notion complexe, qui nécessite donc une approche interdisciplinaire intégrant les dimensions politiques, économiques, historiques, géologiques, et sociologiques.

Actuellement la définition communément admise du risque est donc l'équation (Figure II.1) :

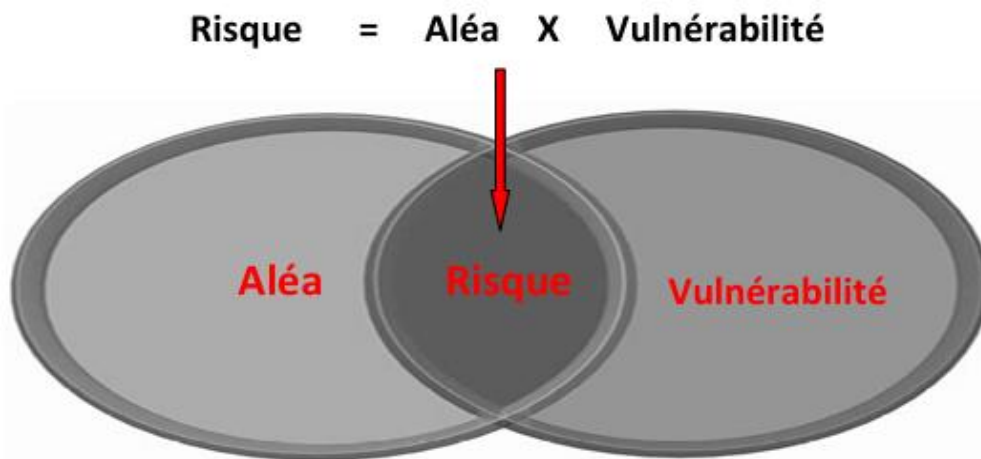


Figure II. 1. Définition de risque

II.4. Risque d'inondation

Les inondations constituent une menace majeure pour le monde moderne. Comparée à d'autres régions du monde, la région méditerranéenne a connu des inondations périodiques ces dernières années, et la menace devient de plus en plus grave.

Le risque d'inondation est défini par deux indicateurs : le risque d'inondation et la vulnérabilité à l'exposition au risque. L'évaluation des risques repose sur l'évaluation de ces deux indicateurs, à savoir : estimer, quantifier, évaluer, calculer et mesurer le danger, et identifier, définir, localiser, quantifier et analyser l'importance de la vulnérabilité (Rifai, et al., 2004).

II.5. Évaluation des risques d'inondation

Le risque d'inondation est évalué en croisant des cartes thématiques liées à la vulnérabilité et aux aléas des inondations (facteurs déclencheurs).

-Les cartes de vulnérabilité aux inondations sont dérivées d'une combinaison de différentes cartes : cartes de pente, cartes de densité de drainage, cartes des zones d'influence des cours d'eau et cartes du domaine de la structure rocheuse

- Créer des cartes de risques en combinant des cartes de distribution spatiale des isohyètes et des cartes d'occupation du sol.

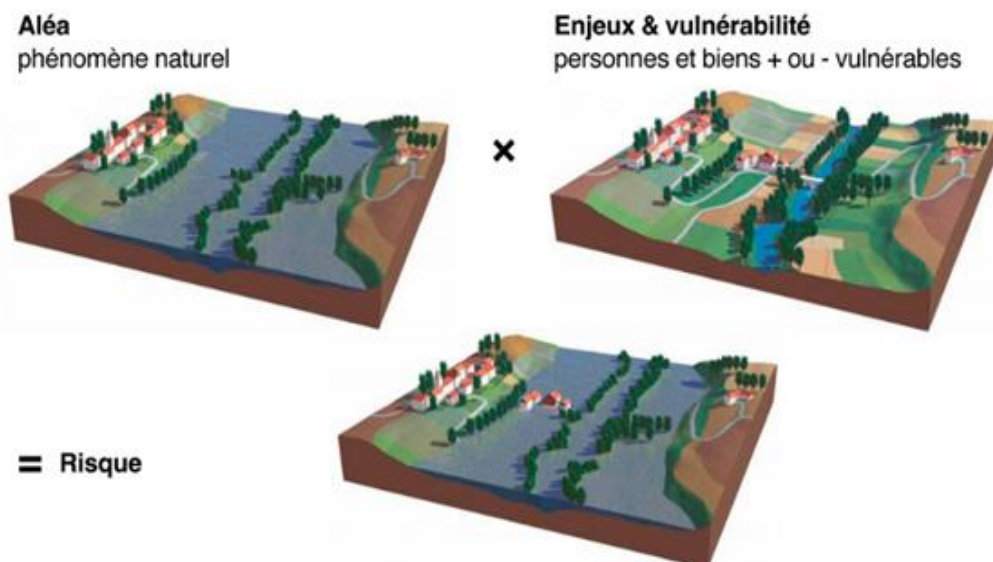


Figure II. 2. Schéma conceptuel du risque

II.6. Facteurs déclencheurs

II.6.1. Causes naturelles

➤ Fortes pluies ou précipitations : Selon les conditions de température de l'atmosphère, de fortes précipitations peuvent tomber sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Les fortes pluies font référence à de fortes précipitations dans une certaine zone, avec des précipitations supérieures ou égales à 50 mm en 24 heures.

➤ La rupture d'un barrage peut provoquer des inondations catastrophiques en aval, car l'eau stockée est soudainement libérée, submergeant les berges et les infrastructures (Moreland, 2001)

II.6.2. Causes anthropiques

➤ L'utilisation des terres urbaines : Empiètement urbain sur les plaines d'inondation et les zones proches des cours d'eau et augmentation des surfaces imperméables. Ce qui a conduit à la canalisation et à la modification des rivières, en plus de la déforestation des forêts pour l'expansion urbaine.

- L'utilisation des terres agricoles : Au départ, l'utilisation des terres agricoles peut avoir le même impact que le couvert végétal, dans la mesure où les cultures peuvent intercepter les précipitations et réduire le ruissellement. Cependant, l'agriculture intensive, qui peut être irriguée, peut entraîner un engorgement des sols et donc un ruissellement. L'utilisation intensive de machines agricoles peut compacter le sol et réduire sa capacité d'infiltration, ce qui augmente le risque de ruissellement.
- Le changement climatique : Les inondations sont de plus en plus fréquentes et graves en raison du changement climatique. L'augmentation des températures mondiales accroît l'évaporation de l'eau, ce qui entraîne une augmentation des précipitations. En outre, la fonte des glaciers et des calottes glaciaires entraîne une élévation du niveau de la mer, exposant les zones côtières à une vulnérabilité accrue aux ondes de tempête et aux inondations dues aux marées. Les changements dans le régime des précipitations peuvent également avoir un impact sur le débit des rivières, augmentant ainsi les risques d'inondation.

II.6.3. Causes géologiques

- La topographie : La topographie naturelle d'une zone joue un rôle essentiel dans les inondations. Les zones à forte pente peuvent entraîner un écoulement rapide de l'eau et, en cas de fortes précipitations, provoquer des inondations le long du canal. En revanche, les zones basses et plates, telles que les plaines, ont des difficultés à évacuer l'eau rapidement. Par conséquent, en cas de fortes précipitations, l'eau peut s'accumuler et provoquer des crues soudaines dans ces zones.
- Conditions des eaux souterraines et saturation du sol : Le niveau élevé des eaux souterraines ou la présence de couches de sol imperméables peuvent entraver l'infiltration de l'eau et contribuer à l'excès de ruissellement de surface. Dans les zones où la recharge des nappes phréatiques est limitée ou peu perméable, les précipitations excessives peuvent rapidement saturer le sol et entraîner des inondations. De même, dans les zones où le sol est fortement saturé ou gorgé d'eau, des précipitations même modérées peuvent entraîner un ruissellement et des inondations de surface, car le sol est déjà

incapable d'absorber de l'eau supplémentaire. Ces conditions peuvent encore aggraver les risques d'inondation et accroître la vulnérabilité d'une zone aux inondations.

Bien que les causes d'inondation énumérées soient les plus typiques, il est impératif de comprendre que les inondations peuvent être dues à une variété de causes, qu'il s'agisse de facteurs d'inondation spécifiques ou localisés. Chaque inondation est unique et peut résulter d'une interaction unique de divers facteurs. Par conséquent, les causes des inondations peuvent varier en fonction de caractéristiques telles que la situation géographique, le climat, les conditions météorologiques et l'activité humaine dans la région.

II.7. Processus d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations

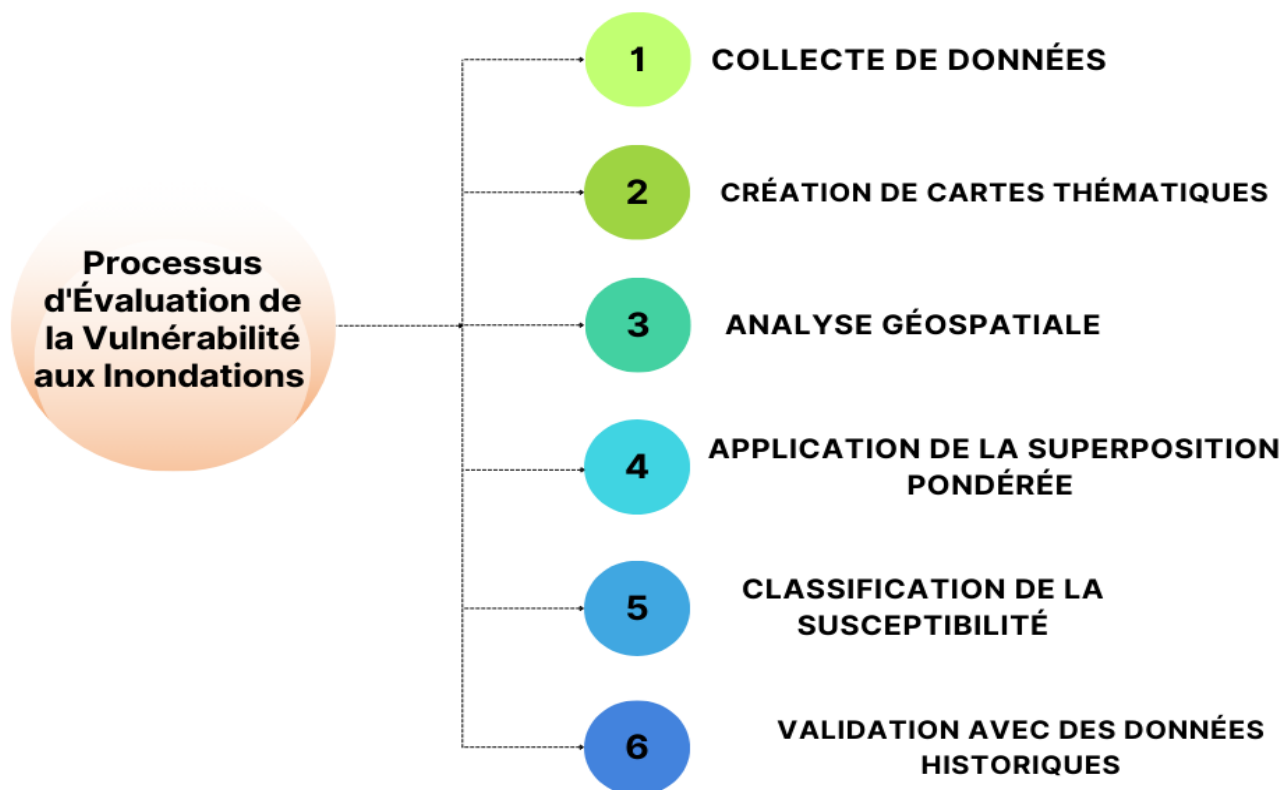


Figure II. 3. Processus d'évaluation de la vulnérabilité aux inondations

II.8. Modélisation hydraulique et hydrologique

Il existe des modèles hydrauliques et hydrologiques pour le risque d'inondation.

L'impact des phénomènes tels que la déforestation, les pratiques agricoles, les événements de pluie extrêmes et les scénarios climatiques s'intéresse à ce domaine.

Les modèles hydrologiques sont de nombreuses équations mathématiques qui représentent l'état de la gaine d'eau et le développement du cycle hydrologique par rapport aux conditions météorologiques spécifiques. Le processus hydrologique de la gaine d'eau et les différents composants du cycle hydrologique, tels que l'infiltration, le drainage, l'évaporation et l'évapotranspiration, sont modélisés. En ce qui concerne hydrauliques, nous nous soucions des problèmes liés à l'eau des canaux, qui se produit très fréquemment dans les zones urbaines.

Par conséquent, il gère le calcul des opérations hydrauliques (canaux, vannes, barrages) et des réseaux (sanitaire, adduction d'eau potable) et des calculs de sujets liés à la qualité de l'eau naturelle ou artificielle.

La modélisation hydraulique est la manière dont les propriétés hydrauliques (rivière, vitesse, hauteur de l'eau, débit) sont décrites et sont finalement un problème qui pourrait être affecté par le développement des inondations et le développement des inondations.

Il s'est établi comme un outil commun de gestion des inondations qui peut être combiné avec des techniques de modélisation hydrologique.

Le modèle utilisé et sa complexité dépend du domaine d'application dans la gestion des inondations, c'est-à-dire l'une des étapes de gestion des inondations (prévention, prévision ou gestion de crise) et les intérêts que vous pouvez avoir.

En fait, dans la phase préventive, l'objectif est d'expliquer au mieux les caractéristiques hydrauliques et les courants pour acquérir une connaissance précise des emplacements qui peuvent être affectés.

Dans ce cas, il est recommandé d'utiliser des modèles complexes avec des temps de calcul relativement longs.

Plutôt, dans le stade de la gestion ou de la prévision de la crise, l'intérêt pour des explications rapides des phénomènes pour une prise de décision efficace. Après cela, le modèle plus simple et plus rapide sera utilisé, mais il devrait fournir des résultats plus précis

CHAPITRE TROISIEME

Méthodes et Outils Numériques pour l'Analyse des Inondations

Méthodes et Outils Numériques pour l'Analyse des Inondations

III.1. La méthode analytique hiérarchique (AHP)

Le processus analytique hiérarchique (AHP) est une technique structurée utilisée pour organiser et analyser des décisions complexes, basée sur les mathématiques et la psychologie.

III.1.1. Définition de la AHP : La AHP aide les décideurs à hiérarchiser et à évaluer différents facteurs en hiérarchisant un problème. Cette méthode permet de comparer systématiquement différents facteurs de risque.

III.1.2. Structure hiérarchique : Dans la AHP, le problème de décision est structuré selon une hiérarchie, qui comprend généralement :

L'objectif (par exemple, une gestion efficace des risques d'inondation) ;

Les critères (par exemple, les changements environnementaux, l'urbanisation) ;

Les sous-critères (par exemple, les facteurs spécifiques de risque d'inondation comme l'intensité des précipitations, l'utilisation des terres) ;

III.1.3. Les comparaisons par paires : La AHP implique des comparaisons par paires des critères et des sous-critères. Les décideurs évaluent l'importance relative de chaque facteur par rapport aux autres, souvent à l'aide d'une échelle de 1 à 9, où 1 indique une importance égale et 9 une importance extrême d'un facteur par rapport à un autre.

III.1.4. Calcul de pondération : Après les comparaisons, la méthode AHP calcule la pondération de chaque facteur. Ce calcul est effectué en normalisant les scores des comparaisons par paires, ce qui permet un classement clair des facteurs de risque en fonction de leur importance.

III.1.5. Contrôle de cohérence : La méthode AHP inclut un contrôle de cohérence pour garantir la logique des jugements portés lors des comparaisons par paires. Ceci est essentiel pour garantir la fiabilité du processus décisionnel.

III.1.6. Application à la gestion des inondations : Dans le contexte de la gestion des risques d'inondation, la méthode AHP peut être utilisée pour pondérer divers facteurs de risque tels que :

- Données historiques sur les inondations ;
- Changements d'affectation des sols ;
- Impacts du changement climatique ;
- Résilience des infrastructures.

En appliquant la méthode AHP, les parties prenantes peuvent prioriser les facteurs de risque à traiter, ce qui conduit à des stratégies d'atténuation des inondations plus efficaces. Cette approche structurée complète la modélisation hydrodynamique et la cartographie des risques abordées dans l'étude, car elle fournit un cadre clair pour la prise de décision en matière de gestion des risques.

III.2. Méthodes implémentées dans ArcMap

III.2.1. Présentation d'ArcMap du logiciel ArcGIS d'ESRI

III.2.1.1. ESRI (Environmental Systems Research Institute)

ESRI est le **leader mondial des logiciels de Systèmes d'Information Géographique (SIG)**. C'est l'entreprise qui développe les outils puissants permettant de créer, gérer et analyser des cartes et des données spatiales à l'échelle mondiale.



Figure III. 1. Sigle d'ESRI Environmental Systems Research Institute

III.2.1.2. ArcGIS

ArcGIS est la **plateforme complète de SIG d'ESRI**. C'est une suite de logiciels de bureau, de services en ligne et d'applications mobiles utilisée pour la cartographie, l'analyse spatiale et le partage d'informations géographiques.



Figure III. 2. Sigle de la plateforme ArcGIS d'ESRI

III.2.1.3. ArcMap

ArcMap est une **application de bureau** au sein de la suite ArcGIS, largement utilisée pour créer des cartes 2D, réaliser des analyses spatiales détaillées et gérer des données géographiques. C'est un outil central pour de nombreux professionnels du SIG.

ArcMap ne permettait qu'une seule « map » et un seul « layout », ArcGIS Pro permet d'avoir plusieurs visualisations en parallèle. On peut facilement créer, dans le même projet, des cartes, des scènes 3D et des « layouts » (mise en page), et passer de l'un à l'autre en un seul clic.

Il est donc temps de passer à ArcGIS Pro, un logiciel SIG mature



ArcMap



ArcGIS Pro

Figure III. 3. Sigle du module ArcMap du logiciel ArcGIS d'ESRI et à droite ArcGIS Pro

III.2.2. Techniques de superposition et d'analyse spatiale dans ArcMap

Dans le contexte de la cartographie des inondations, les techniques de superposition et d'analyse spatiale sont essentielles pour comprendre et visualiser les zones inondables.

III.2.2.1. Analyse par superposition

Cette technique consiste à superposer plusieurs couches de données spatiales afin d'identifier les relations et les schémas. En cartographie des inondations, les couches peuvent inclure la topographie, l'occupation du sol, les données hydrologiques et les zones inondables.

En superposant ces couches, les chercheurs peuvent visualiser les zones à risque d'inondation et évaluer l'impact de différents facteurs sur la vulnérabilité aux inondations. Ceci est essentiel pour une planification urbaine efficace et des stratégies d'atténuation des risques.

III.2.2.2. Détail des méthodes de superposition

Superposition pondérée (Weighted Overlay)

Cette méthode permet de combiner plusieurs couches d'information en attribuant à chacune un poids relatif selon son importance dans le phénomène étudié. Les valeurs les plus favorables (par exemple, les zones à haut risque) obtiennent des scores plus élevés. C'est une méthode efficace pour hiérarchiser les zones selon leur degré de susceptibilité.

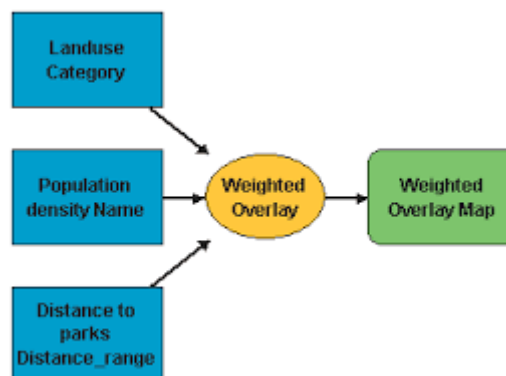


Figure III. 4. Exemple d'application du principe de la superposition pondérée

Somme pondérée (Weighted Sum)

Similaire à la superposition pondérée, cette méthode additionne les valeurs des couches selon leurs poids respectifs. Elle est utilisée pour produire une carte finale synthétique où chaque pixel représente une somme des contributions pondérées des critères, permettant une évaluation quantitative du risque.

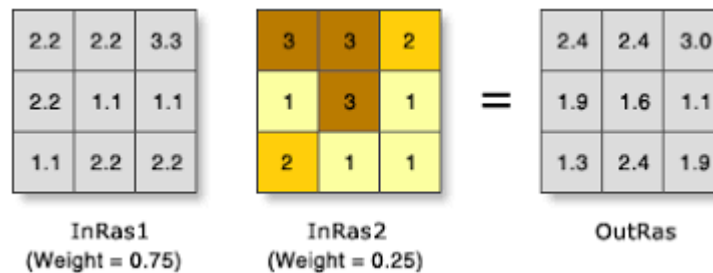


Figure III. 5. Principe de la somme pondérée

Superposition floue (Blurred Overlay) :

Inspirée de la logique floue, cette méthode considère l'incertitude et l'imprécision dans les données. Elle permet d'attribuer des degrés de pertinence ou de risque sous forme de valeurs floues (entre 0 et 1), ce qui rend l'analyse plus souple, particulièrement utile dans des contextes où les limites entre les classes de risque sont peu nettes.

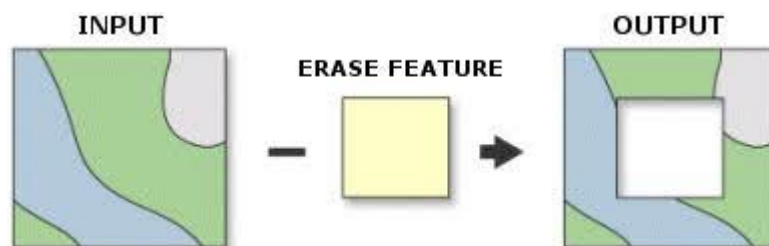


Figure III. 6. Exemple d'utilisation de la superposition floue

III.2.3. Analyse spatiale

L'analyse spatiale englobe diverses méthodes permettant d'examiner les relations spatiales entre différents ensembles de données. Elle permet de comprendre l'influence des facteurs géographiques sur les risques d'inondation.

Des techniques telles que l'analyse des zones tampons peuvent être utilisées pour déterminer l'impact de la proximité de rivières ou d'autres plans d'eau sur le risque d'inondation. Par exemple, les zones situées à une certaine distance d'une rivière peuvent être plus exposées aux inondations.

III.3. Algorithmes d'apprentissage automatique pour la prévision des inondations

Les algorithmes d'apprentissage automatique sont devenus la pierre angulaire des systèmes modernes de prévision des inondations. Ces algorithmes exploitent les données historiques pour identifier des tendances et faire des prédictions sur les événements futurs. Parmi les algorithmes couramment utilisés, on peut citer :

III.3.1. Réseaux à mémoire à long terme (LSTM) : Les réseaux LSTM sont particulièrement efficaces pour les tâches de prévision de séries chronologiques, telles que la prévision du débit des rivières. Par exemple, les modèles LSTM ont été utilisés pour prédire le débit des rivières aux limites fluviales, permettant des alertes de crue précises jusqu'à 36 heures à l'avance (Melo & Pinho, 2024) (Liu & Coleman, 2025).

III.3.2. Modèles d'apprentissage profond : Des modèles d'apprentissage profond, notamment des réseaux de neurones convolutifs (CNN) et des réseaux de neurones récurrents (RNN), ont été utilisés pour traiter les données spatiales et temporelles afin de prévoir les inondations. Les modèles hybrides, tels que CNN-RNN, ont montré des performances supérieures dans l'intégration des caractéristiques spatiales et temporelles pour la prévision des inondations urbaines (Situ, et al., 2023).

III.3.4. Forêts aléatoires et machines à vecteurs de support (SVM) : Ces algorithmes ont été utilisés pour la cartographie et la prévision de la susceptibilité aux inondations. La forêt aléatoire, en particulier, a démontré une grande précision dans la prévision des crues lorsqu'elle est intégrée à l'imagerie satellitaire et aux données hydrologiques (Wedajo, Lemma, Gedefa, & Gamba, 2024).

III.3.5. Apprentissage basé sur la logique floue (FLBL) : L'apprentissage basé sur la logique floue a été proposé comme alternative aux méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique, atteignant une précision de 97,87 % dans la prévision des crues en intégrant l'imputation des données manquantes et des stratégies d'optimisation par règles floues (Kridalukmana, Eridani, Septiana, & Windasari, 2024).

III.3.6. Intégration de l'IA aux modèles basés sur les processus

L'intégration de l'IA aux modèles basés sur les processus a considérablement amélioré la précision et la fiabilité des systèmes de prévision des crues, par exemple.

III.3.6.1. Modèles hydrodynamiques : Des modèles hydrodynamiques avancés, tels que les modèles 1D et 2D, ont été couplés à des techniques d'apprentissage automatique pour simuler la dynamique des crues en zones urbaines. Ces modèles ont démontré une précision supérieure dans la prévision de la profondeur et de l'étendue des inondations (Khoshkonesh, Nazari, Nikoo, & Karimi, 2024; Jin, et al., 2024).

III.3.6.2. Plateformes de jumeaux numériques : Les plateformes de jumeaux numériques basées sur l'IA, telles que SaferPlaces, exploitent des données topographiques haute résolution, des prévisions climatiques et des modèles hydrologiques pour créer des répliques virtuelles d'environnements urbains. Ces plateformes permettent des simulations d'inondations et des évaluations des risques en temps réel, facilitant ainsi la prise de décision pour la résilience urbaine (Renzi et al., 2024).

III.3.6.3. Modèles hybrides : Les modèles hybrides combinant des modèles basés sur des processus physiques et des algorithmes d'apprentissage automatique ont démontré leur capacité à améliorer la précision des prévisions d'inondations. Par exemple, le modèle hybride GRGM-K-

LSTM a démontré des performances supérieures dans la simulation du ruissellement et la prévision des débits de pointe (Liu et Hu, 2024). Prévision des débits de pointe.

III.4. Intelligence Artificielle et Apprentissage Automatique

Les Modèles Numériques de Terrain (MNT) et autres données spatiales telles que les précipitations, les réseaux hydrographiques et l'occupation des sols sont essentiels à la modélisation environnementale et à la gestion des risques d'inondation.

III.4.1. Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Les MNT fournissent une représentation précise et continue de l'environnement naturel, essentielle aux processus de contrôle environnemental et à la modélisation hydrologique (Gal & Doytsher, 2009; Doytsher, Dalyot, & Katzil, 2009).

Les nouvelles technologies d'acquisition de données, telles que l'InSAR et les images stéréophotogrammétriques, améliorent la précision et la résolution des MNT, facilitant ainsi leur utilisation dans des tâches complexes de modélisation environnementale.

III.4.2. Précipitations et réseaux hydrographiques

Les données sur les précipitations, souvent recueillies par pluviomètres, radars et satellites, sont essentielles à la compréhension de la variabilité spatiale des modèles hydrologiques (Vieux, 2016).

Les réseaux hydrographiques, qui incluent les rivières et les ruisseaux, sont cartographiés à l'aide de SIG et de technologies de télédétection, fournissant des données essentielles à la gestion des bassins versants (Guertin, Miller, & Goodrich, 2000).

III.4.3. Occupation et couverture du sol

Les données sur l'occupation et la couverture du sol sont essentielles à la modélisation des processus d'infiltration, d'évapotranspiration et de ruissellement. Ces données sont généralement représentées sous forme de SIG, ce qui permet une analyse spatiale détaillée (Vieux, 2016).

L'intégration des données sur l'occupation du sol aux MNT et à d'autres ensembles de données spatiales permet des évaluations environnementales et des stratégies de gestion complète

SIMULATION NUMERIQUE

CHAPITRE QUATRIEME

Analyse de la Vulnérabilité aux Inondations de la Ville de M'sila

Analyse de la Vulnérabilité aux Inondations de la Ville de M'sila

IV.1. Présentation générale de la zone d'étude

IV.1.1. Contexte géographique et administratif de la ville de Msila :

La ville de M'Sila est située sur les rives de l'oued Ksob, au cœur des terres irriguées des hauts plateaux du Hodna [1].

La commune regroupe plusieurs localités, notamment M'Sila ville, Boukhemissa, Ouled Bedira, Ouled Slama, Ced, Oued Ksob, Mezrir, Ghezal, Mouilha, Draa El Hadja et Draa Berrabeh [2].

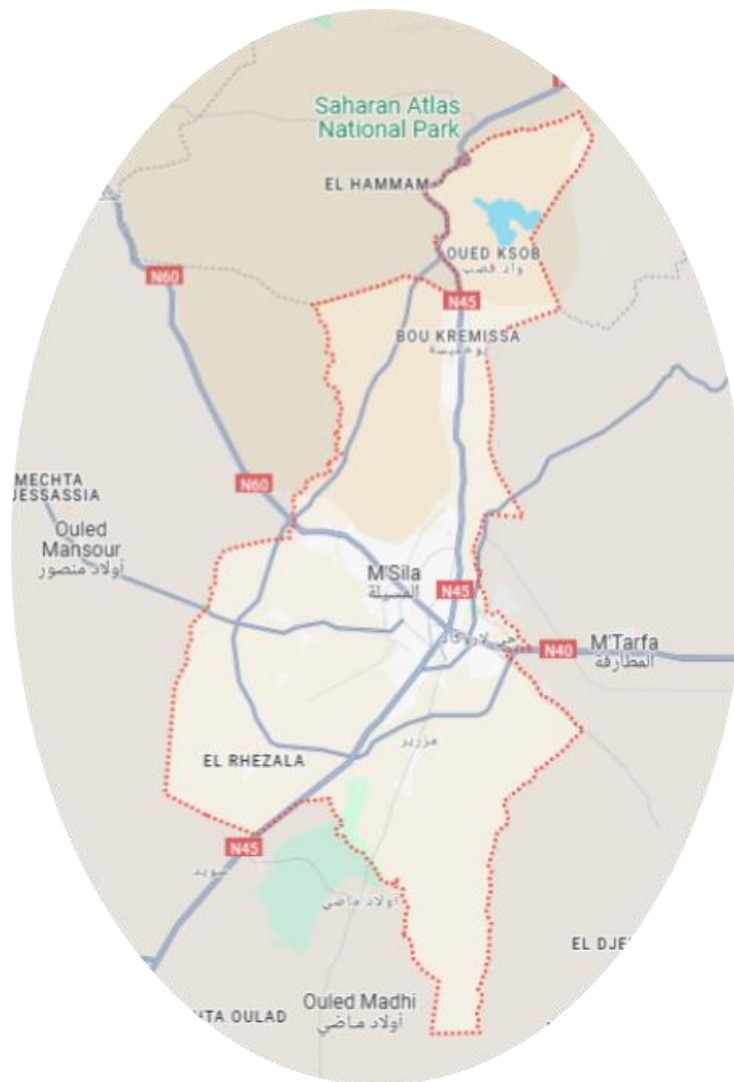


Figure IV.1. Localisation géographique de la ville de M'Sila

IV.1.2. Focus sur les berges de l’oued Ksob : un territoire à risque hydraulique

La zone d’étude correspond aux abords immédiats de l’oued Ksob, qui traverse la ville de M’Sila. Ce cours d’eau prend sa source au niveau du barrage Ksob, situé au nord de la commune, et s’écoule vers le sud jusqu’à rejoindre l’oued Benia. Ainsi, une grande partie du territoire communal de M’Sila est potentiellement exposée aux risques d’inondation générés par cet affluent.



Figure IV.2. Région potentiellement exposée aux risques d’inondation générés par oued Ksob

IV.2. Recueillement et préparation des données

IV.2.1. Sources et nature des données collectées

Afin d'évaluer la vulnérabilité de la zone d'étude aux risques naturels, six facteurs principaux ont été retenus pour l'analyse spatiale. Ces facteurs ont été choisis en fonction de leur pertinence dans les processus de dégradation et d'exposition aux aléas naturels :

Tableau 0.1. Sources et nature des données collectées

Facteur influençant	Type de données	Source de données	Lien de téléchargement
Élévation	Raster (MNT, 30m)	SRTM (NASA/USGS)	https://earthexplorer.usgs.gov/
Pentes	Raster dérivé du MNT	Calculé à partir du MNT	calculé localement via ArcGIS
Proximité des oueds	Raster (distance euclidienne)	HydroSHEDS / MNT / OpenStreetMap	https://www.hydrosheds.org/ / https://www.openstreetmap.org/
Précipitations	Données tabulaires / Raster interpolé	Office National de la Météorologie	à préciser selon la source locale
Géologie	Vecteur (shapefile)	Carte géologique nationale (ex. ANRH)	à préciser selon la source
Occupation des sols	Raster (classification d'image satellite)	Sentinel-2 (Copernicus)	https://scihub.copernicus.eu/

IV.2.2. Méthodologie d'organisation des données spatiales et thématiques

Toutes les données ont été intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin de permettre une analyse multicritère. Les étapes suivantes ont été suivies :

Harmonisation spatiale : toutes les couches ont été projetées dans le même système de coordonnées (UTM Zone 31N, WGS 84) pour assurer leur compatibilité.

Prétraitement des couches :

Les données raster ont été découpées à l'emprise de la zone d'étude, Les couches vectorielles ont été nettoyées des entités superflues ou erronées.

Génération des facteurs :

La pente et l'altitude ont été calculées à partir du MNT, la carte de proximité d'oued a été générée via l'outil « Euclidean Distance » d'ArcGIS, les précipitations ont été interpolées via la méthode IDW, et l'occupation des sols a été classée selon une nomenclature adaptée à l'étude des risques.

Structuration thématique : chaque facteur a été organisé dans une base de données géospatiales selon sa nature (continue ou catégorielle) et normalisé pour les analyses ultérieures.

Validation : un contrôle de qualité des couches a été effectué à travers des comparaisons visuelles, des vérifications croisées, et le cas échéant, des observations de terrain.

IV.3 Elaboration du modèle d'étude

IV.3.1. Choix du modèle et justification scientifique

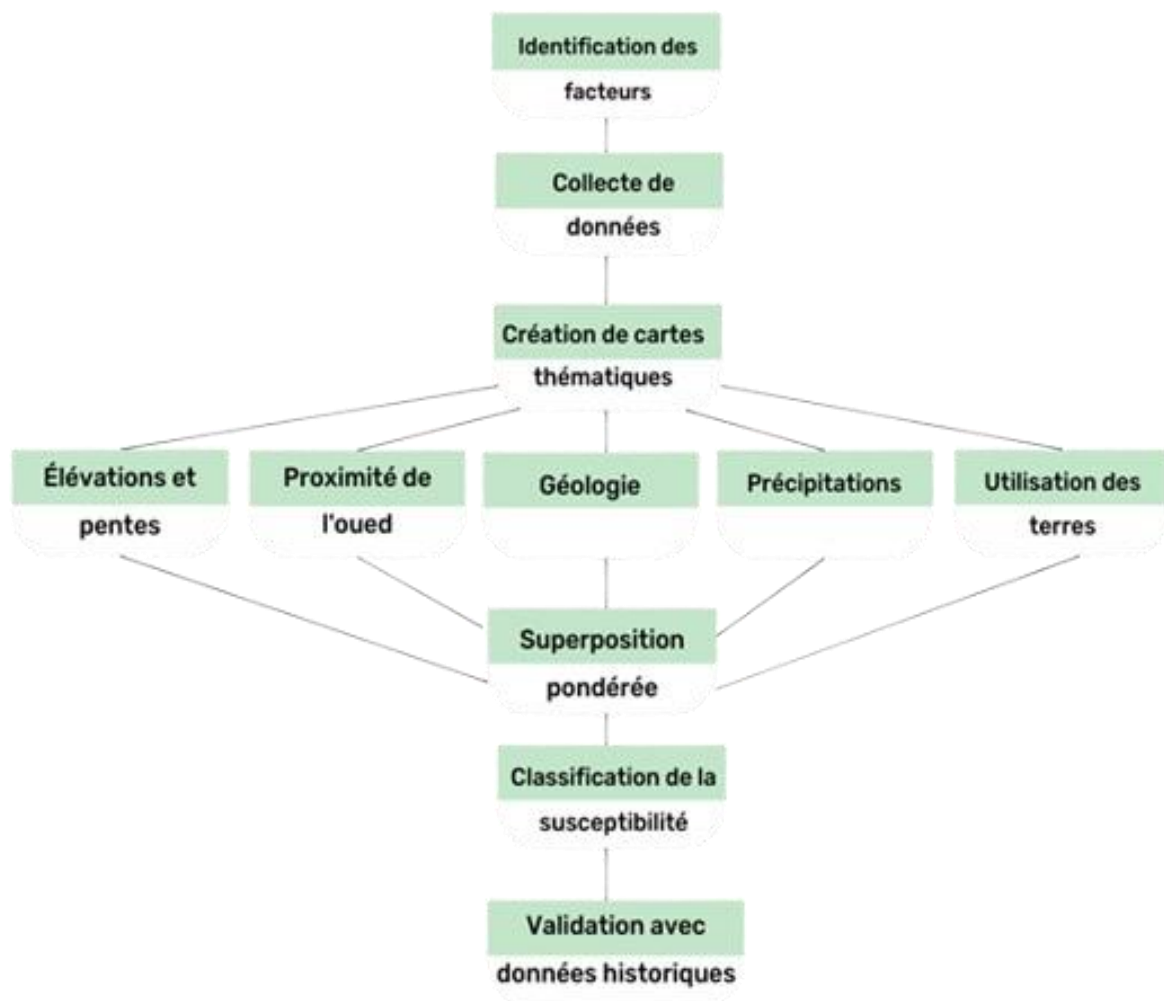


Figure IV. 3. Modèle d'étude utilisé

IV.3.2. Paramètres utilisés pour l'analyse du risque d'inondation

Pour réaliser une analyse approfondie de la vulnérabilité aux inondations dans la ville de M'sila, nous avons identifié six facteurs clés qui influencent la formation et la propagation des crues.

Le premier facteur à considérer est la pente du terrain, dérivée du Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cette pente a un impact direct sur la vitesse à laquelle l'eau s'écoule. Dans les zones à faible pente, l'eau a tendance à s'accumuler, tandis que sur des pentes plus raides, le flux s'accélère, augmentant ainsi le risque d'inondation en aval.

Le deuxième facteur est l'occupation des sols, que nous avons déterminée grâce aux images satellites Sentinel-2. Cela nous permet de repérer les zones urbanisées, agricoles et végétalisées, chacune ayant une capacité d'infiltration différente. Les surfaces imperméabilisées, surtout en milieu urbain, aggravent le ruissellement.

Le troisième facteur concerne la distance au réseau hydrographique, en particulier la proximité de l'Oued Ksob, qui est le principal collecteur des eaux de ruissellement. Les zones situées près de l'oued sont naturellement plus vulnérables aux débordements et aux crues.

Le quatrième facteur est la pluviométrie, qui mesure l'intensité des précipitations sur le territoire. Les données que nous avons utilisées proviennent de stations météorologiques locales et nous aident à identifier les secteurs les plus arrosés, donc ceux qui sont potentiellement les plus exposés aux inondations.

Le cinquième facteur est l'altitude, qui joue un rôle crucial dans l'accumulation des eaux. Les zones basses, souvent situées au fond des vallées ou à proximité de l'oued, sont particulièrement à risque, car elles reçoivent les eaux qui descendent des hauteurs.

Sixième facteur la géologie, qui détermine la perméabilité des sols et des sous-sols. Les formations géologiques imperméables favorisent le ruissellement, tandis que les terrains perméables, comme les alluvions, permettent une meilleure infiltration, ce qui réduit le risque d'inondation.

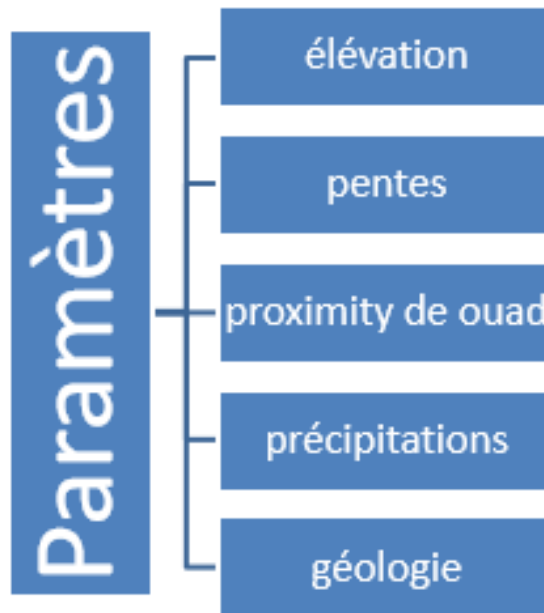


Figure IV. 4. Facteurs déclencheurs

IV.4. Conception et traitement des cartes thématiques

IV.4.1. Création des cartes de base (topographie, occupation du sol, etc.)

Les cartes thématiques créées dans le cadre de cette étude offrent une vue d'ensemble sur la répartition des six facteurs qui influencent le risque d'inondation à M'sila. La carte des pentes met en lumière les zones à forte déclivité, surtout dans les régions périphériques, ainsi que les zones planes qui favorisent l'accumulation des eaux. La carte de l'occupation des sols fait une distinction claire entre les zones urbanisées, agricoles et naturelles, mettant en avant l'impact de l'urbanisation sur l'imperméabilisation des surfaces. La carte montrant la distance à l'Oued Ksob identifie les quartiers qui se trouvent tout près du cours d'eau, ceux qui sont les plus vulnérables aux débordements. La carte de la pluviométrie souligne les zones qui reçoivent les plus fortes précipitations, ce qui augmente le risque de ruissellement intense. La carte de l'altitude révèle les secteurs les plus bas, principalement dans le bassin de M'sila, où les eaux de ruissellement se concentrent. Enfin, la carte géologique fait la distinction entre les formations perméables et imperméables, qui jouent un rôle crucial dans l'infiltration ou l'écoulement des eaux. Ces cartes sont essentielles pour comprendre les conditions locales et pour élaborer des cartes synthétiques d'aléa, de vulnérabilité et de risque.

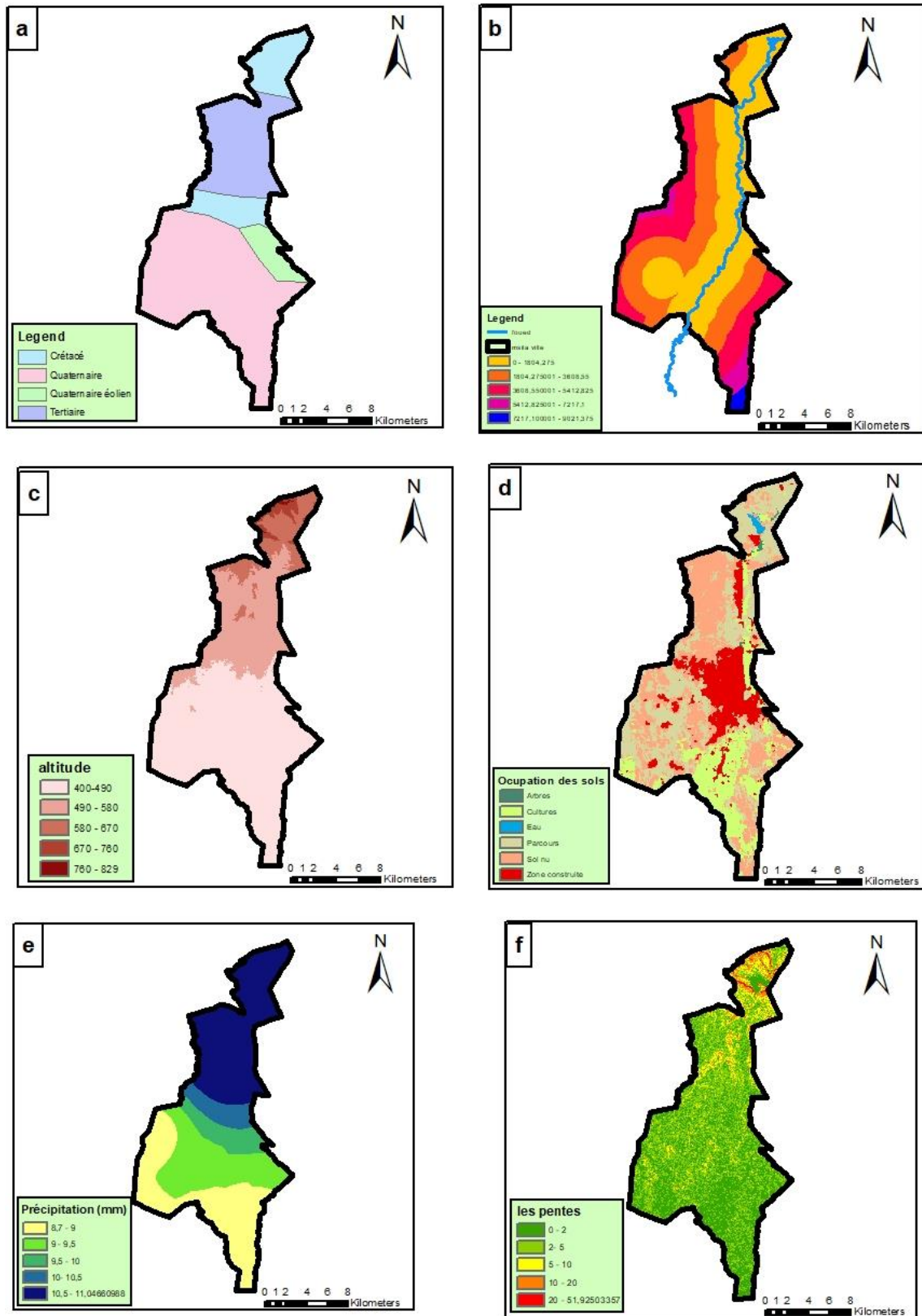


Figure IV. 5. les cartes thématiques

a-Géologie, b-proximité de l'oued, c-altitude, d- occupation des sols, e- Précipitations, f- pentes

IV.5. Production des cartes de risque

IV.5.1. Carte d'aléa d'inondation

La carte d'aléa d'inondation a été réalisée en combinant les six facteurs physiques et environnementaux à travers une méthode multicritère sous SIG. Elle permet de classer le territoire en différentes classes d'aléa : nul, faible, moyen, fort et très fort.

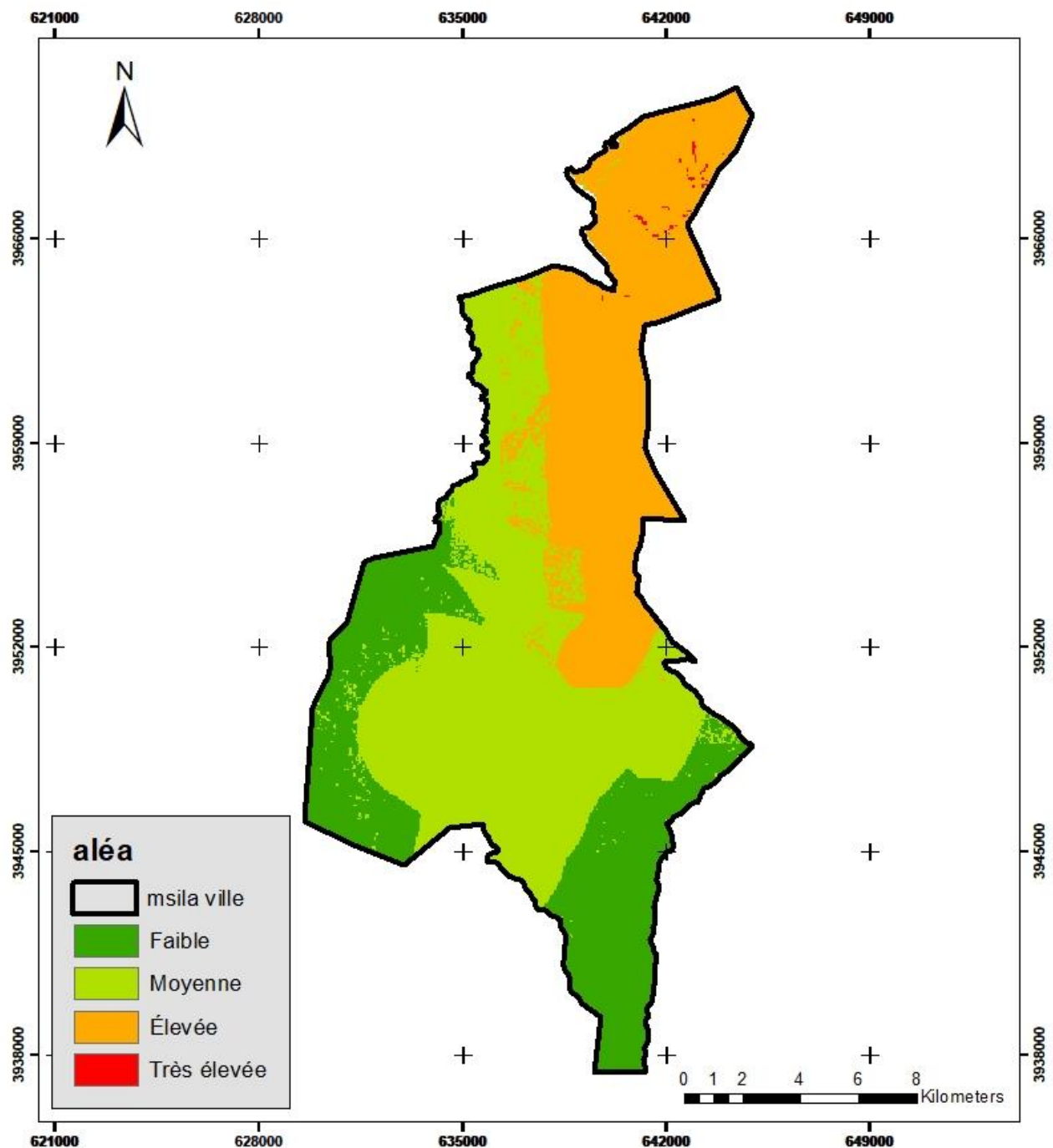


Figure IV. 6. Carte d'aléa

Les résultats font apparaître que les zones les plus exposées se situent en bordure immédiate de l'Oued Ksob, ainsi que dans les secteurs bas où la pente est faible et les sols sont imperméables. Ces zones concentrent les facteurs favorisant le débordement et la stagnation des eaux. En revanche, les zones situées en altitude ou caractérisées par de bonnes conditions de perméabilité géologique présentent un aléa moins important. Ainsi, cette carte permet de disposer d'une donnée essentielle à la fois pour anticiper la survenue de crues à l'avenir et pour planifier des aménagements permettant de renforcer la résilience du territoire face aux inondations.

IV.5.2. Carte de vulnérabilité

L'analyse de vulnérabilité montre quels quartiers craignent le plus en cas d'inondation, à la fois pour les habitants et le bâti. Elle se fonde sur des critères tels que la densité de population, la présence de quelques équipements (routes, écoles, hôpitaux) et le type d'habitat (grands ensembles, villas...).

A M'sila, on constate que les quartiers denses installés au plus près de l'Oued Ksob, et aussi quelques zones en périphérie recouvertes par des lotissements récents sont évidemment les plus concernés. En outre, la présence de certains équipements comme les axes de circulation importants, aggrave le risque. A contrario, les espaces naturels et en hauteur comme la partie Nord de M'sila sont beaucoup moins soumis au danger. C'est le moment de réfléchir à protéger ces zones et d'informer les riverains exposés.

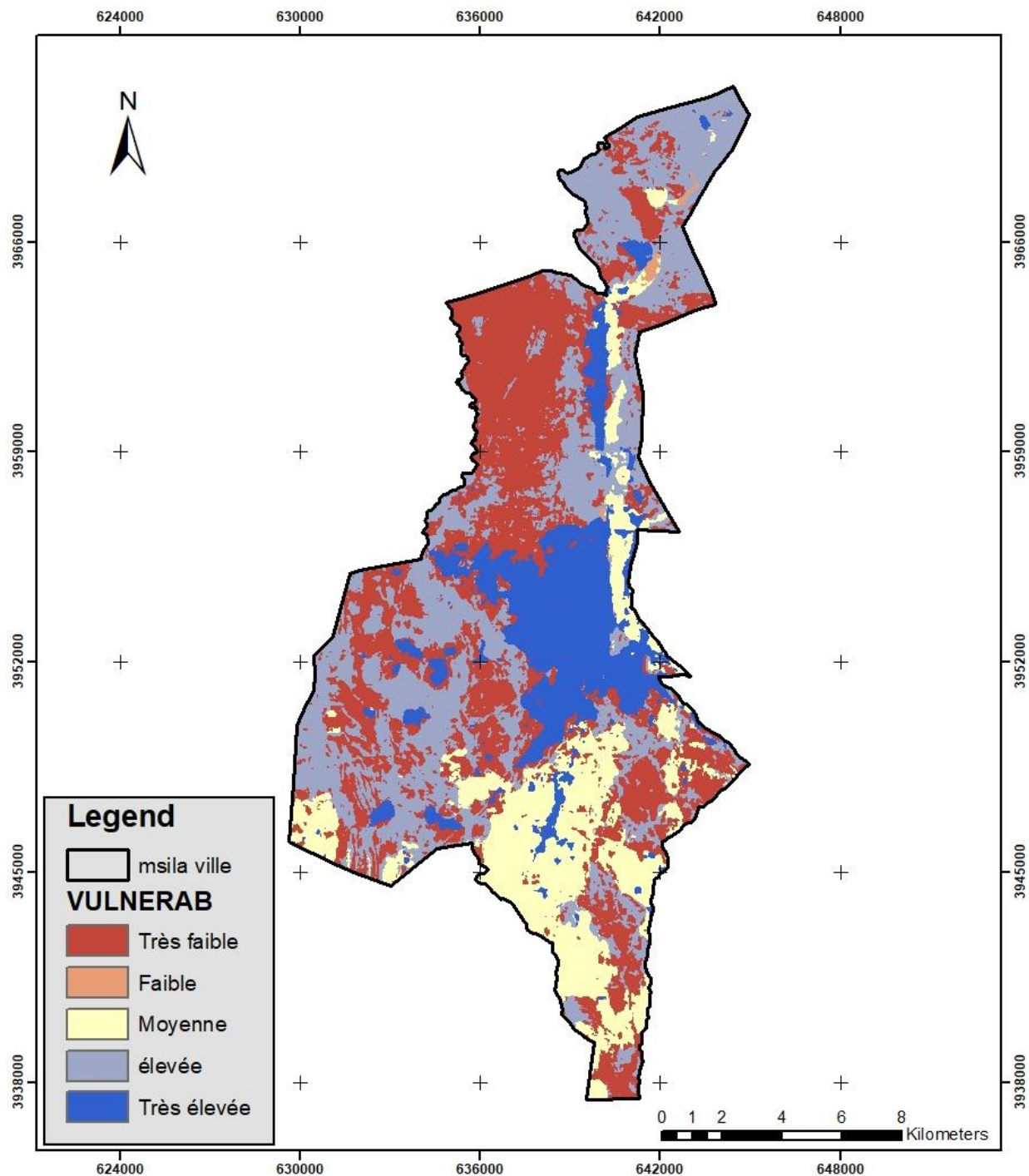


Figure IV. 7. Carte de vulnérabilité

IV.5.3. Carte de risque global

La carte de risque est la représentation des phénomènes inondation et conséquence (vulnérabilité) associée. Ce sont les lieux où à la fois le phénomène est très probable (aléa fort) et les conséquences fortes (important enjeu vulnérable) qui correspondent à la carte de risque. A travers cette carte sont identifiés les endroits où le risque est le plus élevé, en particulier le long de l'Oued Ksob et dans

les quartiers bâtis en zone inondable. En effet, s'y voit de fortes inondations et il y a une forte présence de population et/ou d'infrastructures.

Les résultats nous permettent de proposer diverses actions de sensibilisation, de travaux et d'aménagements. Elle est un outil majeur de prévention inondation à M'sila.

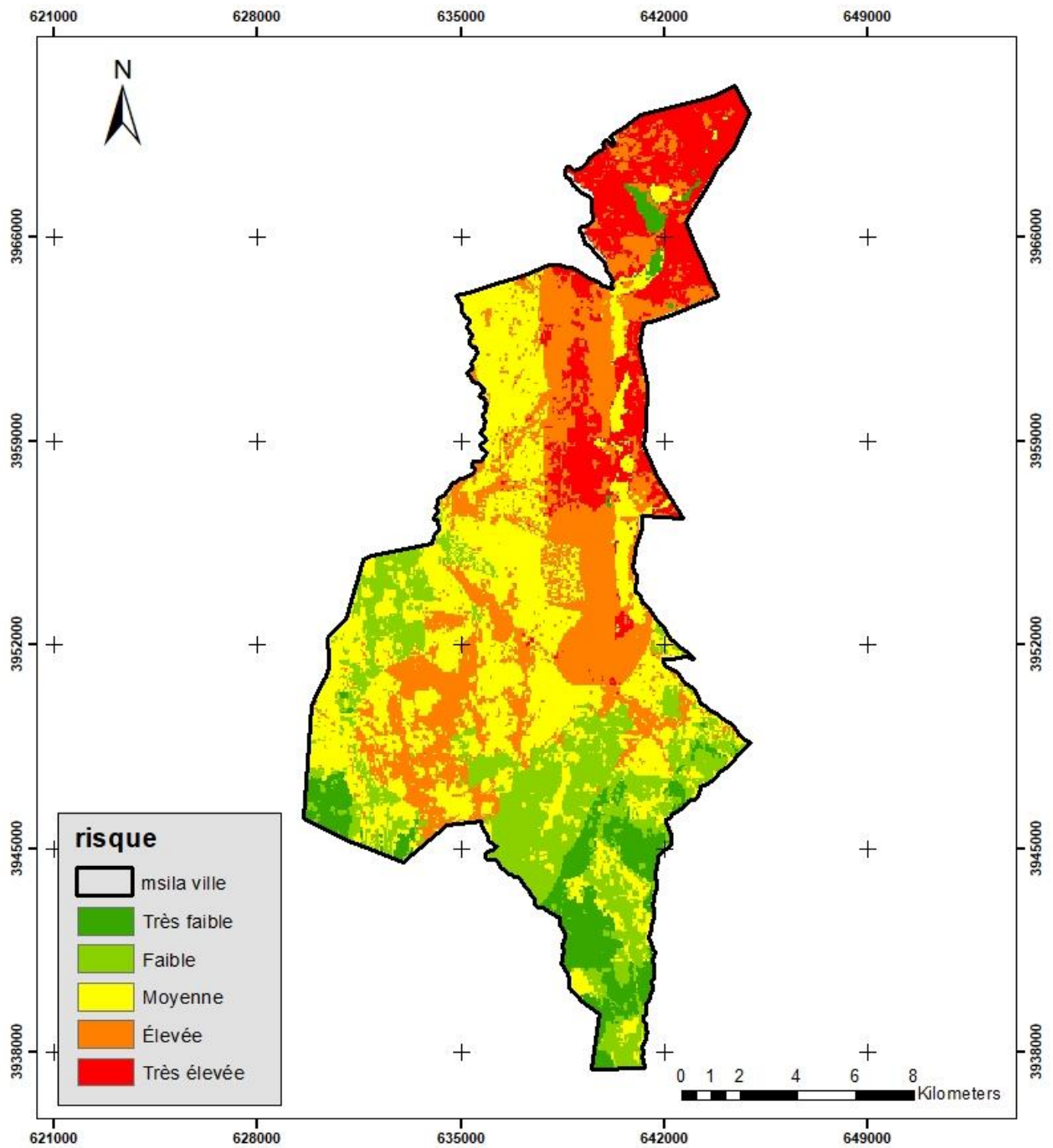


Figure IV. 8. Carte de risque

IV.6. Interprétation des résultats cartographiques

IV.6.1. Analyse spatiale des zones à risque

L'analyse spatiale de la carte de risque aux inondations révèle une distribution hétérogène des niveaux de risque à travers la zone étudiée. Les zones présentant un risque très élevé (en rouge) sont principalement concentrées dans la partie nord-est de la carte, formant une bande relativement étendue. On observe également des poches de risque très élevé plus petites et dispersées dans la partie centrale et sud-est. Les zones de risque élevé (en orange) entourent généralement les zones de risque très élevé, formant des transitions et s'étendant plus largement dans la partie centrale et vers le nord-ouest.

Le risque moyen (en jaune) occupe une part significative de la zone, encerclant les zones de risque élevé et s'étendant dans les parties ouest et sud-ouest. Les zones de risque faible (en vert clair) sont principalement situées dans la partie sud-ouest et forment des zones plus isolées au sein des autres niveaux de risque. Enfin, les zones de très faible risque (en vert foncé) se trouvent principalement dans les marges sud et ouest de la zone cartographiée, indiquant des secteurs moins susceptibles d'être affectés par les inondations selon cette analyse.

La configuration spatiale suggère une influence potentielle du réseau hydrographique (même s'il n'est pas explicitement montré sur cette carte) sur la distribution du risque, les zones de risque élevé et très élevé semblant suivre des axes préférentiels dans la partie nord-est. La topographie (qui n'est pas directement visible ici mais peut être inférée) pourrait également jouer un rôle, les zones de faible altitude étant généralement plus sujettes à l'inondation.

IV.6.2. Identification des zones prioritaires

L'identification des zones prioritaires pour la gestion des risques d'inondation doit se concentrer sur les secteurs présentant les niveaux de risque les plus élevés. Ainsi, la partie nord-est de la zone étudiée, caractérisée par une étendue significative de risque très élevé (en rouge), constitue une

zone prioritaire absolue. Des interventions urgentes en termes de prévention, de protection et de préparation aux inondations devraient être envisagées pour ce secteur.

De même, les poches de risque très élevé observées dans les parties centrale et sud-est nécessitent une attention particulière et des évaluations plus approfondies pour comprendre les facteurs locaux contribuant à ce niveau de risque et pour définir des mesures adaptées.

Les zones adjacentes présentant un risque élevé (en orange) sont également prioritaires, car elles sont susceptibles d'être affectées par des événements d'inondation importants et pourraient voir leur niveau de risque augmenter en cas d'événements plus extrêmes. Une surveillance attentive et des mesures de gestion des eaux peuvent être nécessaires pour prévenir une aggravation du risque dans ces secteurs.

Bien que les zones de risque moyen, faible et très faible nécessitent une vigilance continue, les ressources et les efforts initiaux devraient être prioritairement alloués aux zones identifiées comme présentant un risque élevé et très élevé afin de protéger au mieux les populations, les infrastructures et les activités socio-économiques les plus exposées.

IV.7. Carte d'inventaire des inondations à M'Sila

IV.7.1 Historique des inondations signalées

Depuis 1982, la ville de M'Sila a été exposée plusieurs fois aux inondations causées principalement par le débordement de K'sob Wadi. Ces événements ont entraîné la mort de deux personnes, les laissant sans abri dans la trentaine, provoquant l'effondrement de six appartements. En 2006, la nouvelle inondation a entraîné la destruction de plusieurs maisons affectant les 36 familles touchées, en plus des grandes pertes et un affaiblissement des pentes du pays agricole. Les zones urbaines de M'sila, y compris les extensions dans le cadre du PDAU (Urbas, Agency de M'sila, 1996 et 2015), sont particulièrement sensibles à ce risque naturel. Plus de 20 épisodes d'inondation ont été enregistrés entre 1982 et 2021. Cela a causé des dommages considérables, les humains et les matériaux, affectant principalement l'infrastructure des maisons et des villes. **(Annexe)**

IV.7.2. Localisation et fréquence des événements passés

Localisation et fréquence des événements naturels enregistrés dans la zone d'étude, représentant une synthèse des occurrences passées afin d'identifier les secteurs les plus exposés.

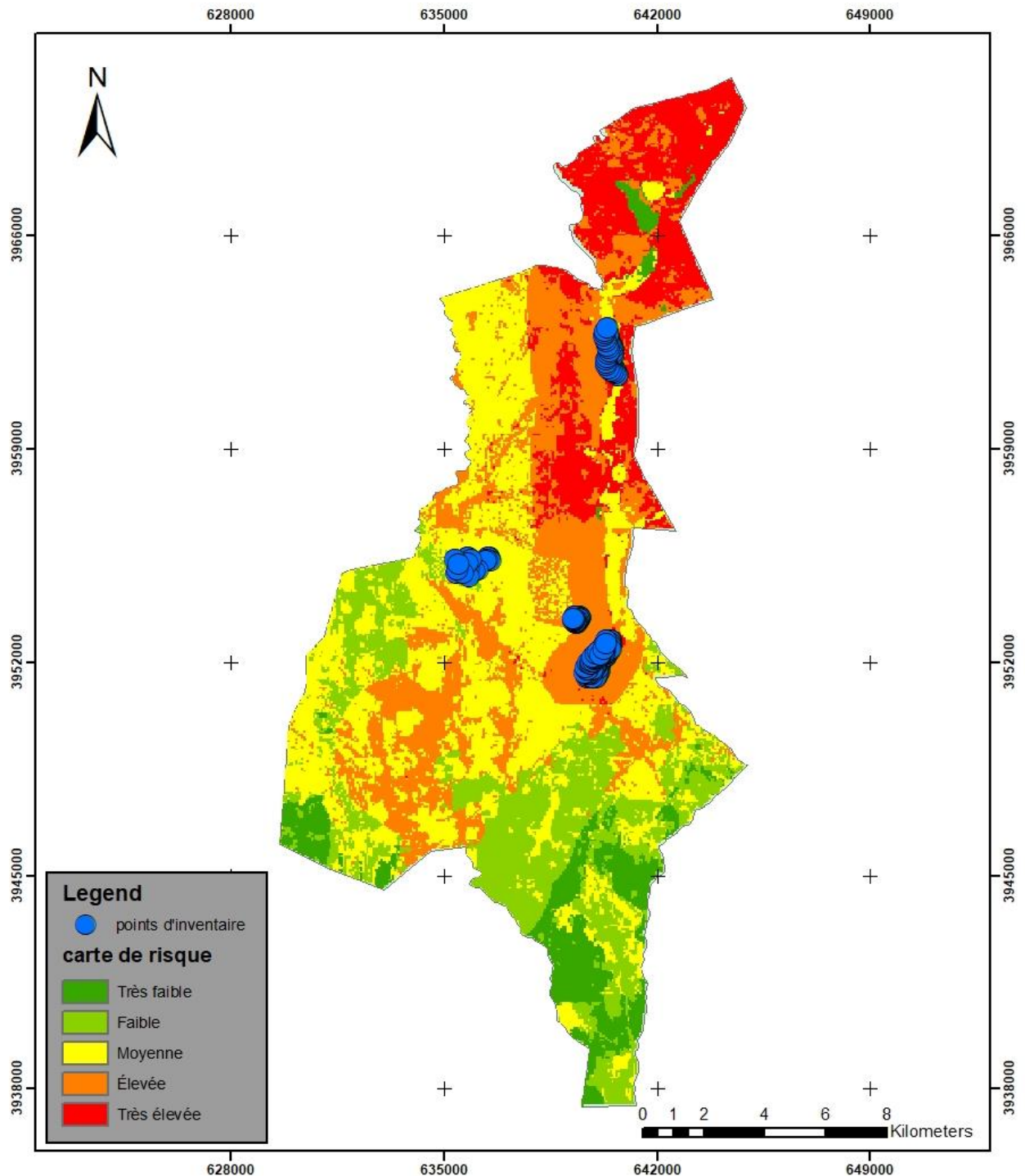


Figure IV. 9. Carte d'inventaire des inondations à Msila

IV.8. Vérification et validation des cartes produites

IV.8.1. Lecture de la carte risque d'inondation

La carte de risque à l'inondation montre cinq niveau :

Risque très faible sur une surface de 18080000m² avec un pourcentage de 8%, Risque faible sur une surface de 41090000m² avec un pourcentage de 18%, Risque moyen sur une surface de 79130000m² avec un pourcentage de 34%, Risque élevé sur une surface de 61800000m² avec un pourcentage de 27%, et Risque très élevé sur une surface de 30290000m² avec un pourcentage de 13%.

IV.8.2. Confrontation aux données de terrain ou aux observations

Selon la carte d'inventaire des inondations qui ont eu lieu à Msila recueillies auprès des services de la protection civile, on remarque : Trois grand lieux historiquement touchés par plus d'une inondation.

Au Nord de la ville de Msila dans la région de Ouled Bedira et du Ced (petit barrage) Ksob le risque est modéré à élevé ;

Au centre de la ville de Msila le risque est élevé à très élevé ;

Et à l'ouest (extension de la ville de Msila) ou encore appelé POS 5 selon les services de l'urbanisme, le risque est modéré dans sa majorité.

IV.8.2. Confrontation aux données de terrain ou aux observations

Après superposition des deux cartes, on conclue ce qui suit :

Les inondations qui ont eu lieu dans la zone principale de notre étude qui sont les berges de l'Oued Ksob sont en majorité dans les zones à risque élevé à très élevés et en deuxième position à risque modérée qui est justifié par la présence d'un autre affluent qui est oued Bouretem.

Et à l'ouest (extension de la ville de Msila) sont modérées dans leur majorité, là ou normalement ils ne sont pas touchés par Oued Ksob car ils sont loin de la zone limitrophe de l'oued Ksob, donc

probablement sont causés par un autre affluent oued BOURETEM qui n'a pas été pris compte dans notre étude.

IV.8.4. Limites et incertitudes

Malgré les efforts déployés pour garantir la précision des cartes, certaines limites subsistent. Elles sont liées principalement :

- À la résolution spatiale des données utilisées (imagerie, MNT, données pluviométriques, etc.).
- Aux approximations introduites lors de la pondération des critères dans le modèle d'analyse multicritère (AMC).
- À l'absence ou la rareté de données actualisées sur certains événements passés.
- Aux changements récents dans l'environnement (urbanisation, reforestation, etc.) qui ne sont pas encore intégrés aux bases de données.

Ces sources d'incertitude doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats, et soulignent l'importance d'une actualisation continue des données ainsi qu'une approche complémentaire combinant modélisation et observations de terrain.

IV.9. La carte de risque : un outil d'aide à la décision

La carte de risque est un instrument essentiel pour la gestion territoriale, permettant d'identifier, de visualiser et d'anticiper les zones exposées à des aléas naturels ou anthropiques. Son objectif principal est d'aider les décideurs à mettre en place des stratégies de prévention, d'aménagement et de gestion de crise.

IV.9.1. Utilisation par les acteurs territoriaux

Les cartes de risque sont mobilisées par différents acteurs, notamment :

- **Les collectivités territoriales** : Pour l'aménagement du territoire, la réglementation urbaine et la planification des secours.

- **Les services de protection civile** : Pour la préparation aux catastrophes (évacuations, zones refuges).
- **Les bureaux d'études et urbanistes** : Pour évaluer la vulnérabilité des projets d'infrastructure.
- **Les citoyens et associations** : Pour la sensibilisation et la participation aux politiques de réduction des risques.

L'efficacité de ces cartes dépend de leur accessibilité, de leur lisibilité et de leur intégration dans les processus décisionnels.

IV.9.2. Perspectives d'amélioration et de mise à jour

Pour renforcer leur pertinence, les cartes de risque doivent évoluer grâce à :

- **L'intégration de nouvelles données** : Télédétection haute résolution, capteurs IoT, intelligence artificielle.
- **La modélisation dynamique** : Prise en compte des changements climatiques et de l'évolution des vulnérabilités.
- **La participation citoyenne** : Implication des populations locales pour une meilleure perception des risques.
- **Des mises à jour régulières** : Adaptation aux nouvelles connaissances et aux transformations du territoire.

Une approche collaborative et une actualisation continue sont nécessaires pour maintenir l'utilité des cartes de risque dans un contexte environnemental et socio-économique en mutation.

IV.9.3. Publication de la carte on Line sur le WEB Mapping

Notre carte interactive des inondations de la zone riveraine de l'oued Ksob a été publiée en ligne sur GitHub Pages à l'aide du logiciel gratuit QGIS (similaire à ArcGIS). Elle est accessible via le lien :<https://djamalbouzidi.github.io/djamalbouzidi-map-risque-inondation-msila/>

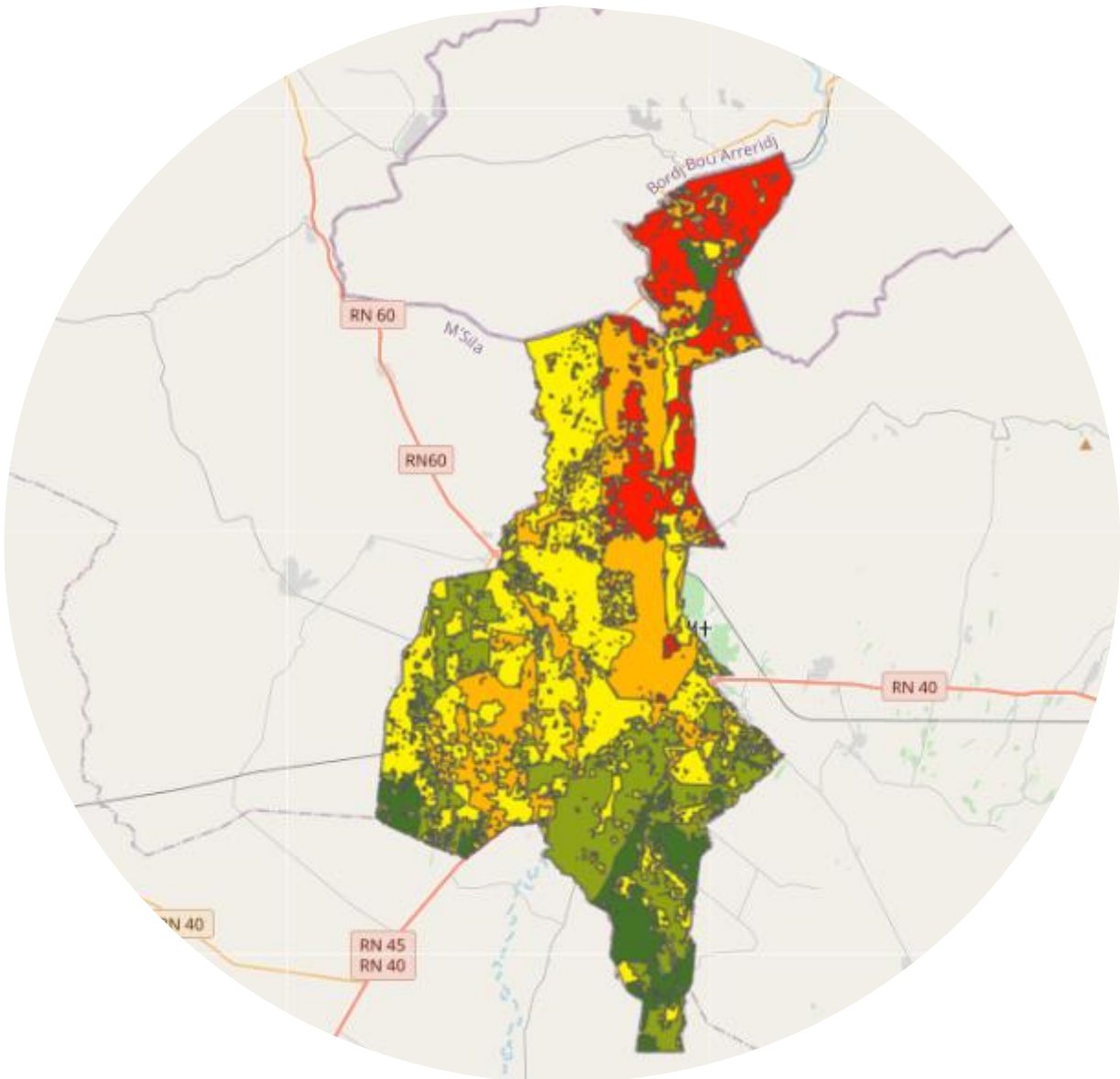


Figure IV. 10. Carte interactive des inondations de Msila publié on line sur le WEB Mapping

IV.10. Synthèse

Notre étude a permis de créer une **carte de risque d'inondation** pour la zone des berges de l'Oued Ksob à Msila. Cette carte a été élaborée en combinant deux éléments clés via une **superposition** dans **ArcGIS (ArcMap)** : une **carte d'aléa** (qui montre la probabilité qu'un événement se produise) et une **carte de vulnérabilité** (qui montre à quel point une zone est susceptible d'être affectée).

La **carte d'aléa** a été établie en analysant cinq facteurs principaux : l'élévation, les pentes, la proximité des oueds, les précipitations et la géologie. Quant à la **carte de vulnérabilité**, elle s'est concentrée sur un facteur unique mais déterminant : **l'occupation des sols (LULC)**.

Les résultats de la **carte de risque** révèlent la répartition suivante des niveaux de danger :

- **Risque très faible** : 8% de la zone (18 080 000 m²)
- **Risque faible** : 18% de la zone (41 090 000 m²)
- **Risque moyen** : 34% de la zone (79 130 000 m²)
- **Risque élevé** : 27% de la zone (61 800 000 m²)
- **Risque très élevé** : 13% de la zone (30 290 000 m²)

Il est important de noter que près des trois quarts de la zone, soit **74%**, présentent un **risque moyen à très élevé**.

En comparant cette carte de risque avec l'historique des inondations à Msila, nous avons constaté que les inondations passées le long de l'Oued Ksob se sont produites majoritairement dans les zones que notre carte a classées comme à **risque élevé à très élevé**. Les zones à l'ouest de Msila, touchées par des inondations modérées, semblent être influencées par un autre cours d'eau, l'Oued Bouretem, qui n'a pas été directement intégré dans cette étude mais qui mériterait une attention future. Ces résultats sont essentiels pour mieux cibler les actions de prévention et de gestion des inondations.

Conclusions Générales

Conclusions Générales

La gestion des **risques naturels**, en particulier des **inondations**, est un défi environnemental et socio-économique majeur, doublé par l'urbanisation et les changements climatiques. La zone des berges de l'Oued Ksob dans la commune de Msila, sujet de cette étude, est particulièrement exposée à ces phénomènes. Notre objectif principal était d'évaluer la **vulnérabilité** de cette zone et de modéliser le **risque d'inondation** en s'appuyant sur l'expertise en **géotechnique** et l'analyse spatiale des **Systèmes d'Information Géographique (SIG)**.

Pour cela, nous avons adopté une approche standard en matière de gestion des risques, qui consiste à élaborer une **carte de risque d'inondation** en combinant deux composantes essentielles : une **carte d'aléa** et une **carte de vulnérabilité**. La puissance du logiciel **ArcGIS d'ESRI**, via son module **ArcMap**, a été fondamentale pour la manipulation des données géospatiales et la superposition de ces couches d'information.

Pour la **carte d'aléa**, cinq facteurs principaux ont été analysés pour leur influence sur les crues et les débordements : l'**élévation** (issue du MNT SRTM 30m), les **pentés** (dérivées du MNT), la **proximité des oueds** (OpenStreetMap), les **précipitations** (données de l'Office National de la Météorologie) et la **géologie** (cartes géologiques nationales). Ces éléments ont été combinés pour quantifier la probabilité et l'intensité d'une inondation.

Quant à la **carte de vulnérabilité**, elle a été spécifiquement construite à partir du facteur **Occupation des sols (LULC)**, obtenu par classification d'images satellite Sentinel-2 (Copernicus). Ce facteur est crucial car il identifie les éléments exposés (bâtiments, infrastructures, populations) et leur degré de sensibilité aux dommages causés par une inondation.

L'étape finale a consisté à réaliser la **superposition** de la carte d'aléa et de la carte de vulnérabilité dans ArcMap, aboutissant ainsi à la **carte finale de risque aux inondations**.

Les résultats de cette modélisation du risque sont démonstratifs et quantifient précisément l'exposition de la zone :

- **Risque très faible** : 8% de la zone, soit 18 080 000 m².
- **Risque faible** : 18% de la zone, soit 41 090 000 m².
- **Risque moyen** : 34% de la zone, soit 79 130 000 m².
- **Risque élevé** : 27% de la zone, soit 61 800 000 m².
- **Risque très élevé** : 13% de la zone, soit 30 290 000 m².

Ces chiffres révèlent une situation préoccupante : **74% de la zone d'étude présente un risque moyen à très élevé**. Cela signifie qu'une très grande partie du territoire est intrinsèquement susceptible d'être impactée par des inondations, ce qui est une information capitale pour la planification et la gestion.

Pour valider la pertinence de notre modèle, nous avons comparé cette carte de risque avec **l'inventaire des inondations historiques** qui ont eu lieu à Msila, en particulier sur les berges de l'Oued Ksob. Cette confrontation a démontré une **forte corrélation** : les zones qui ont été historiquement inondées correspondent **majoritairement aux zones que notre carte a classées comme à risque élevé à très élevé**. Cette concordance valide la robustesse de notre approche et la pertinence des facteurs considérés.

Cependant, l'analyse a aussi mis en lumière un point d'attention. Les inondations observées à l'ouest de la ville de Msila, bien que de risque majoritairement modéré sur notre carte, suggèrent l'influence d'un **autre affluent, l'Oued Bouretem**, qui n'avait pas été directement intégré dans notre modélisation initiale. Cette observation souligne l'importance d'une reconnaissance exhaustive de l'ensemble du réseau hydrographique pour une précision accrue.

La carte de risque d'inondation ainsi produite est un **outil d'aide à la décision** essentiel et concret pour la gestion des risques à Msila. Elle fournit une base visuelle et quantitative permettant aux autorités locales, aux urbanistes et aux services de secours de cibler leurs actions. Elle peut notamment servir à :

- **Orienter l'urbanisation** : Éviter la construction dans les zones à très haut risque et encadrer le développement dans les zones à risque élevé et moyen par des normes de construction adaptées.
- **Optimiser la planification d'urgence** : Faciliter l'élaboration de plans d'évacuation précis et la mobilisation des ressources lors d'une crise.
- **Prioriser les investissements** : Identifier les zones où les infrastructures de protection (digues, bassins de rétention) ou les mesures non structurelles (sensibilisation) sont les plus urgentes.

En somme, cette étude démontre l'efficacité d'une approche SIG combinant l'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité pour une évaluation pertinente du risque d'inondation. Les **valeurs** trouvées (74% de la zone à risque moyen à très élevé, forte corrélation avec les inondations historiques) constituent des informations clés. Bien que la non-intégration de l'Oued Bouretem au départ soit une limite, elle ouvre une perspective pour des études futures afin d'affiner la précision du modèle. Le travail réalisé offre une base solide pour une gestion des risques d'inondation à Msila, contribuant à renforcer la résilience du territoire face à cet aléa majeur.

Grâce au logiciel open source QGIS (alternative gratuite à ArcGIS), nous avons créé et publié une carte interactive en ligne des inondations dans la zone des berges de l'oued Ksob sur GitHub Pages.

Vous pouvez la consulter ici :

<https://djamalbouzidi.github.io/djamalbouzidi-map-risque-inondation-msila/>

Références

- Ade, M., & Harahap, K. (2024). Geopatial Technologies in Civil Engineering. *A Critical Literature*. Récupéré sur <https://doi.org/10.61991/ijeet.v2i2.50>
- Ashani, H. R., & Markna, J. H. (2020). A critical review on the significance of Geographical Information system in civil engineering. *6(11)*, 240-245.
- Baravkar, A., & Mane, N. (2018). Making Different Types of Map for Watershed Management using Q GIS Software for Rural Areas. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 353–357. Récupéré sur <https://www.ijariit.com/manuscript/making-different-types-of-map-for-watershed-management-using-q-gis-software-for-rural-areas/>
- Bartoněk, D., & Bureš, J. (2011). Usage of GIS Technology in Civil Engineering. *ournal of Environmental Science & Engineering*, 177–183. Récupéré sur http://www.cartography-gis.com/pdf/13_Bartonek_paper.pdf
- Doytsher, Y., Dalyot, S., & Katzil, Y. (2009).). Digital Terrain Models: A Tool for Establishing Reliable and Qualitative Environmental Control Processes. *Springer, Dordrecht*, . 215–234. Récupéré sur https://doi.org/10.1007/978-90-481-2899-0_18
- Gal, O., & Doytsher, Y. (2009). ITG Inc. Producing Seamless Multi-Source Quality-Dependent Digital Terrain Models. Récupéré sur https://www.fig.net/pub/fig2012/ppt/ts08h/TS08H_Gal_Doytsher_5487_ppt.pdf
- Gangwar, P. K., & Madav, G. A. (2017). Use of GIS in Civil Engineering & Evaluation of Ground Water probability. *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, 130-132. Récupéré sur https://ijariie.com/AdminUploadPdf/Use_of_GIS_in_Civil_Engineering___Evaluation_of_Ground_Water_probability_ijariie3629.pdf
- Guertin, D. P., Miller, S. N., & Goodrich, D. C. (2000). Emerging Tools and Technologies in Watershed Management. 194–204. Récupéré sur <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/42024>
- Hubert, E. (2005). Gouvernance et vulnérabilités du territoire péri- industriel. *thèse de doctorat, ENSM Institut des risques majeurs (IRMA)*.
- Jin, H., Liang, Y., Lu, H., Zhang, S., Gao, Y., Zhao, Y., & Zhu, Z. (2024). An intelligent framework for spatiotemporal simulation of flooding considering urban underlying surface characteristics. *Itc Journal*. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.103908>
- Jingjing, Y. (2021). Research on seismic technology of civil engineering structure based on GIS system. 283. Récupéré sur <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202128301005>
- Khoshkonesh, A., Nazari, R., Nikoo, M. R., & Karimi, M. (2024). Enhancing flood risk assessment in urban areas by integrating hydrodynamic models and machine learning techniques. *Science of The Total Environment*. Récupéré sur <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175859>
- Kridalukmana, R., Eridani, D., Septiana, R., & Windasari, I. P. (2024). Enhancing River Flood Prediction in Early Warning Systems Using Fuzzy Logic-Based Learning. *International*

- Journal of Engineering and Technology Innovation*, 434–450. Récupéré sur <https://doi.org/10.46604/ijeti.2024.13426>
- Liu, Z., & Coleman, N. (2025). Artificial Intelligence for Flood Risk Management. *A Comprehensive State-of-the-Art Review and Future Directions*. Récupéré sur <https://doi.org/10.2139/ssrn.5008577>
- M, P. (2002). *Sociologie et risque*, . Université publique de Navarre. (MANA, Revue de Sociologie et d'Anthropologie).
- Maurya, A. K., & Kumar , A. (2024). The Role of GIS in the study of sustainable Development and Environmental Management. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6. doi:<https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i06.32879>
- Melo, W., & Pinho, J. (2024). Early warning system for floods at estuarine areas: combining artificial intelligence with process-based models. *Natural Hazards*. Récupéré sur . <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06957-8>
- Moreland, J. A. (2001).). Floods and flood plains. Récupéré sur https://openlibrary.org/books/OL17603492M/Floods_and_flood_plains
- Situ, Z., Wang, Q., ., Teng, S., Chen, G., Zhou, Q., & Fu, G. (2023). Improving Urban Flood Prediction using LSTM-DeepLabv3+ and Bayesian Optimization with Spatiotemporal feature fusion. Récupéré sur <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.09994>
- Vieux, B. E. (2016). Geospatial Data for Hydrology. *Springer, Dordrecht*, 21–42. Récupéré sur https://doi.org/10.1007/978-94-024-0930-7_2
- Wedajo, G. K., Lemma, T., Gedefa, T. F., & Gamba, P. (2024). Integrating Satellite Images and Machine Learning for Flood Prediction and Susceptibility Mapping for the Case of Amibara, Awash Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*. Récupéré sur <https://doi.org/10.3390/rs16122163>