



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



(Dans le cadre du décret ministériel 1275)

Diplôme-Startup / Diplôme-Brevet



FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Géotechnique

Par:

ACHOURI Abdelhakim & SAHLI Mohamed

THEME

***ELABORATION D'UN OUTIL D'AIDE A LA DECISION
POUR LES COMMUNES SOUMISES AUX RISQUES NATURELS***

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

RAHMOUNI Z. El Abidine, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

LADJEL Djelloul, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

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

MEDDAH Abdelaziz, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Co-Encadreur

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

ZAUCHE Rédha, Professeur, Université Med Boudiaf - M'sila, Incubateur

TITRAOUI Abderrazak, C. de service, Protection civil de M'sila, Partenaire économique

Chef de Cabinet, Wilaya de M'sila, Partenaire économique

Promotion : 2022/2023

SOMMAIRE

1. Introduction.....	1
1.1. Préambule	1
1.2. Problématique	1
1.3. Objectifs.....	2
2. Risques naturels majeurs et facteurs prédisposant.....	2
2.1. Introduction	2
2.2. Les différents types de risques naturels majeurs	3
2.2.1 Les inondations.....	3
2.2.2 Les séismes	3
2.2.3 Les éruptions volcaniques	3
2.2.4 Les glissements de terrain.....	3
2.3. Les causes et les conséquences des risques naturels majeurs	4
2.3.1 Les principales causes des risques naturels majeurs.....	4
2.3.2 Les conséquences des risques naturels majeurs.....	4
2.4. Les facteurs prédisposant	5
2.4.1. La topographie.....	5
2.4.2. La géologie	5
2.4.3. L'hydrogéologie	5
2.4.4. Les séismes	5
2.4.5. Les précipitations.....	5
2.4.6. La carte des sols.....	5
3. Méthodologie et conception de l'outil d'aide à la décision.....	6
3.1. Les données	6
3.1.1 Collecte des données.....	6
3.1.2. Données influençant les risques	6
3.1.3. Analyse et traitement des données.....	8
3.1.4. Sélection des facteurs prédisposant.....	8
3.1.5. Production de la carte de susceptibilité.....	9
3.2. Choix de la méthode de conception	9
3.2.1. La méthode Processus de Hiérarchie Analytique (AHP)	9
3.2.2. Attribution des pondérations par la méthode SAATY.....	10
3.2.3. Procédure de la méthode	10
3.4. Le système d'information géographique (SIG)	11

3.5. Outils numériques	12
4. Conception de l'outil	12
4.1. Validation des résultats	13
4.2. Carte de susceptibilité aux risques naturels pour les décideurs locaux	14
5. Etudes de cas dans la wilaya de msila	14
5.1. Susceptibilité aux inondations de bousaada	14
5.1.1 Présentation de la zone d'étude	14
5.1.2 Contexte géologique, climatique, topographique et hydrographique	14
5.1.3. Facteurs prédisposant (données).....	15
5.1.4. Hiérarchisation.....	16
5.1.5. Cartes thématiques.....	16
5.1.6. Carte de susceptibilité aux inondations.....	18
5.2. Susceptibilité aux glissements de terrain de beni Ilmene	18
5.2.1. Présentation de la zone d'étude	18
5.2.2. Contexte géologique, sismique et topographique de la commune étudiée	19
5.2.3. Méthode d'hiérarchisation AHP	20
5.2.4. Facteurs prédisposant (données).....	20
5.2.5. Cartes thématiques.....	21
5.2.6. Carte de susceptibilité des glissements de terrain de Beni Ilmane	23
6. Validation des cartes de susceptibilité	24
6.1. Inventaire des risques antérieurs	24
6.1.1. Glissements de terrain dans la commune de Beni Ilmane	24
6.1.2. Inondations dans la commune de Boussaâda.....	25
6.2. Validation de la carte de susceptibilité	25
6.2.1. Validation de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain	25
6.2.2. Validation de la carte de susceptibilité aux inondations de Bousaada	26
6.3. Avantages et limites des cartes de susceptibilité des risques naturels	27
6.4. Perspectives d'avenir pour les cartes de susceptibilité des risques naturels	27
7. Conclusion.....	28
Références	29

Liste des figures

Figure 1. Les principaux risques naturels	2
Figure 2. Les catastrophes naturelles ont été multipliées par cinq depuis 1970.....	3
Figure 3. Les causes des catastrophes naturelles	4
Figure 4. Niveau d'exposition des pays aux aléas naturels responsables de catastrophes naturelles	6
Figure 5. Landslide susceptibility map of Africa.....	9
Figure 6. Etapes de la méthode de conception	9
Figure 7. Etapes de Production d'une carte de susceptibilité	13
Figure 8. Carte topographique de la commune de Boussaâda	15
Figure 9. Cartes thématiques des facteurs prédisposant aux inondations de Boussaâda	17
Figure 10. Carte de susceptibilité aux inondations de Boussaâda	18
Figure 11. Carte topographique de la commune de Beni Ilmane	19
Figure 12. Cartes thématique des facteurs prédisposant du glissement de Beni Ilmane.....	22
Figure 13. Carte de susceptibilité aux glissements de terrain de Beni Ilmane	23
Figure 14. Inventaire des mouvements de terrain induits par le séisme de Beni Ilman.....	25
Figure 15. Courbe sensibilité/spécificité (ROC) pour la carte de susceptibilité de Beni Ilmane	26
Figure 16. Inventaire des inondations de Bousaada durant les dernières années.....	26
Figure 17. Courbe sensibilité/spécificité (ROC) pour la carte de susceptibilité de Boussaâda	27

Liste des tableaux

Tableau 1. Saaty scale for criteria comparison (Akay & Yilmaz, 2017)	10
Tableau 2. Average random consistency index (CA)	11
Tableau 3. Inventaire des risques antérieurs de la commune de Beni Ilmane	24
Tableau 4. Inventaire des risques antérieurs de la commune de Boussaâda.....	25
Tableau 5. Matrice AHP des poids de Boussaâda	16
Tableau 6. Types, sources et propriétés des données de Boussaâda	16
Tableau 7. Matrice AHP des poids de Beni Ilmane.....	20
Tableau 8. Types, sources et propriétés des données de Beni Ilmane	21

1. INTRODUCTION

1.1. PREAMBULE

Les risques naturels majeurs tels que les inondations, les glissements de terrain, les séismes et les tempêtes sont des phénomènes qui peuvent causer de graves dommages aux populations et aux infrastructures des communes. Dans ce contexte, la planification et l'implantation de projets dans ces zones présentent des défis considérables, car elles doivent tenir compte de plusieurs facteurs tels que la nature et l'intensité du risque encouru, la vulnérabilité des infrastructures et des populations, ainsi que les coûts et les bénéfices attendus (LEROI, 2001).

Dans ce cadre, l'élaboration d'une carte de susceptibilité peut être un outil précieux pour aider les autorités locales à identifier les zones les plus à risque et les plus susceptibles de subir des dommages en cas d'événement naturel majeur.

Ce rapport vise ainsi à présenter la démarche d'élaboration d'une carte de susceptibilité adaptée aux communes soumises aux risques naturels majeurs, en prenant en compte les enjeux et les contraintes propres à ces communes.

1.2. PROBLEMATIQUE

Le choix d'un lieu pour implanter un projet est actuellement basé uniquement sur la nature juridique du terrain et l'adéquation de la surface au relief ou à l'environnement. Cependant, cette méthode ne prend pas en compte les aléas naturels tels que les inondations, les glissements de terrain, les incendies de forêt ou encore l'érosion des sols ou autres aléa. Ces événements imprévisibles peuvent survenir à tout moment, entraînant des conséquences désastreuses pour la population, bloquant les routes, obstruant les infrastructures ou encore les effondrant complètement.

Dans ce contexte, la problématique principale de ce mémoire est de proposer une méthode pour élaborer une carte de susceptibilité des risques naturels majeurs dans les communes, afin de guider les choix de terrain pour les projets de manière à minimiser les risques et garantir la sécurité des populations et des biens.

Ainsi, les questions qui seront abordées sont les suivantes :

1. Quels sont les critères à prendre en compte pour déterminer la susceptibilité des terrains aux risques naturels ?
2. Comment collecter et traiter les données nécessaires pour élaborer la carte de susceptibilité ?
3. Comment représenter et visualiser les résultats de la carte de susceptibilité de manière claire et accessible pour les acteurs concernés (élus, urbanistes, ingénieurs, citoyens) ?
4. Comment intégrer cette carte de susceptibilité dans les processus de décision pour les projets d'aménagement du territoire et d'urbanisme ?
5. Quels sont les avantages et les limites de l'utilisation de cette carte de susceptibilité pour la gestion des risques naturels dans les communes concernées ?

Ce travail vise ainsi à proposer une méthode pour améliorer la prise en compte des risques naturels dans les choix d'implantation de projets, afin de réduire les conséquences négatives sur les populations et les infrastructures. La carte de susceptibilité des risques naturels majeurs est un outil essentiel pour évaluer les risques et permettre aux décideurs d'adopter une approche proactive en matière de gestion des risques.

1.3. OBJECTIFS

Un équilibre doit être trouvé entre l'inévitable croissance urbaine et la nécessaire protection des personnes, de leurs biens et de l'environnement naturel (ASSAKO, 1997).

L'objectif de ce travail est de proposer un outil pratique, efficace et pertinent pour aider les décideurs, notamment les autorités locales, à prendre des décisions éclairées en matière d'implantation de projets dans les zones à risque.

2. RISQUES NATURELS MAJEURS ET FACTEURS PREDISPOSANT

2.1. INTRODUCTION

Selon Haroun TAZIEFF

"La définition que je donne du risque majeur, c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, sur ses installations, la menace dont la gravité est telle que la société se trouve absolument dépassée par l'immensité du désastre" (Medjitna, 2021).

Les risques naturels majeurs, tels que les inondations, les séismes, les éruptions volcaniques et les glissements de terrain, ont toujours été présents sur Terre et peuvent causer des dommages importants aux populations, aux infrastructures et aux biens (BROECKX, 2018).

Ces phénomènes naturels sont difficiles à prévoir et **peuvent** survenir à tout moment, ce qui rend leur gestion et leur prévention encore plus critiques.

Les cartes de susceptibilité des risques naturels majeurs sont un outil de gestion des risques qui permettent d'identifier les zones les plus susceptibles d'être touchées par ces événements. Elles sont basées sur l'analyse de divers paramètres, tels que les conditions topographiques, la géologie, l'hydrologie et les précipitations, qui peuvent influencer la probabilité et l'ampleur des risques.

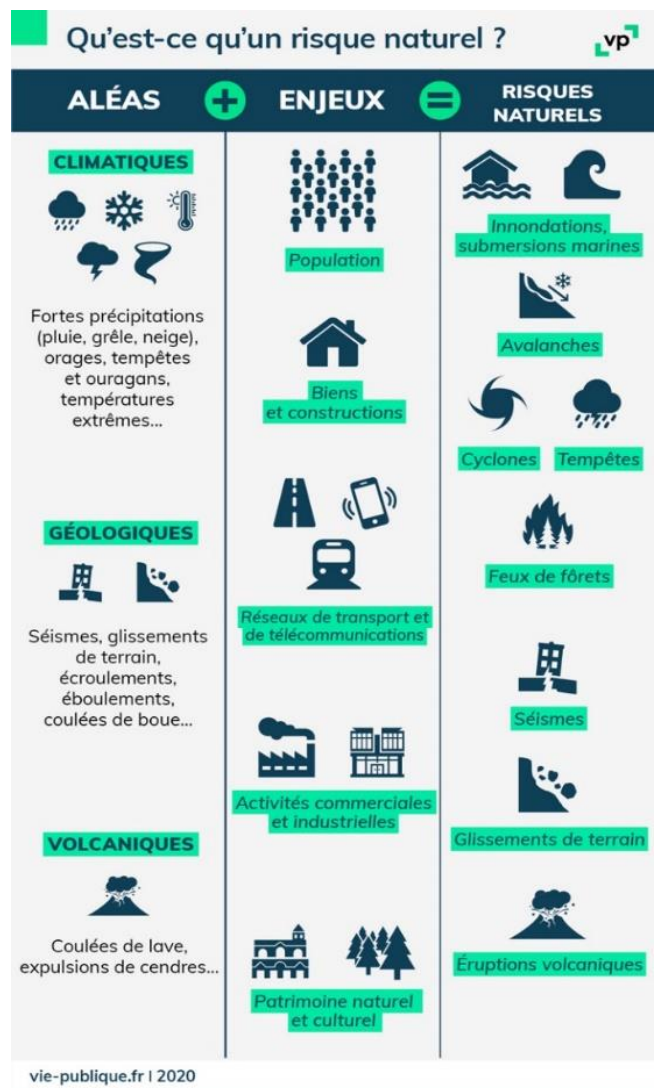


Figure 1. Les principaux risques naturels (Source : www.vie-publique.fr)

2.2. LES DIFFERENTS TYPES DE RISQUES NATURELS MAJEURS

2.2.1 Les inondations

Les inondations sont l'un des risques naturels les plus courants et les plus destructeurs dans le monde entier. Elles peuvent être causées par des précipitations intenses, une fonte de neige rapide ou un débordement de cours d'eau, et peuvent entraîner des dommages considérables aux bâtiments, aux routes, aux ponts et aux infrastructures. Les cartes de susceptibilité des inondations permettent d'identifier les zones à risque élevé en fonction de la topographie, de la proximité des cours d'eau et de l'occupation du sol.

2.2.2 Les séismes

Les séismes sont des mouvements soudains et violents de la croûte terrestre qui peuvent causer des dommages majeurs aux structures et aux infrastructures, ainsi que des pertes en vies humaines. Les cartes de susceptibilité des séismes sont basées sur l'analyse de la géologie et de la tectonique des plaques pour identifier les zones à risque élevé.

2.2.3 Les éruptions volcaniques

Les éruptions volcaniques peuvent causer des dommages majeurs aux populations et aux infrastructures, ainsi que des perturbations environnementales à grande échelle. Les cartes de susceptibilité des éruptions volcaniques permettent d'identifier les zones à risque élevé en fonction de la géologie et de la proximité des volcans actifs.

2.2.4 Les glissements de terrain

Les glissements de terrain peuvent se produire dans les zones montagneuses ou les pentes abruptes et peuvent causer des dommages majeurs aux structures et aux infrastructures, ainsi que des pertes en vies humaines. Les cartes de susceptibilité des glissements de terrain permettent d'identifier les zones à risque élevé en fonction de la topographie, de la géologie et des précipitations.

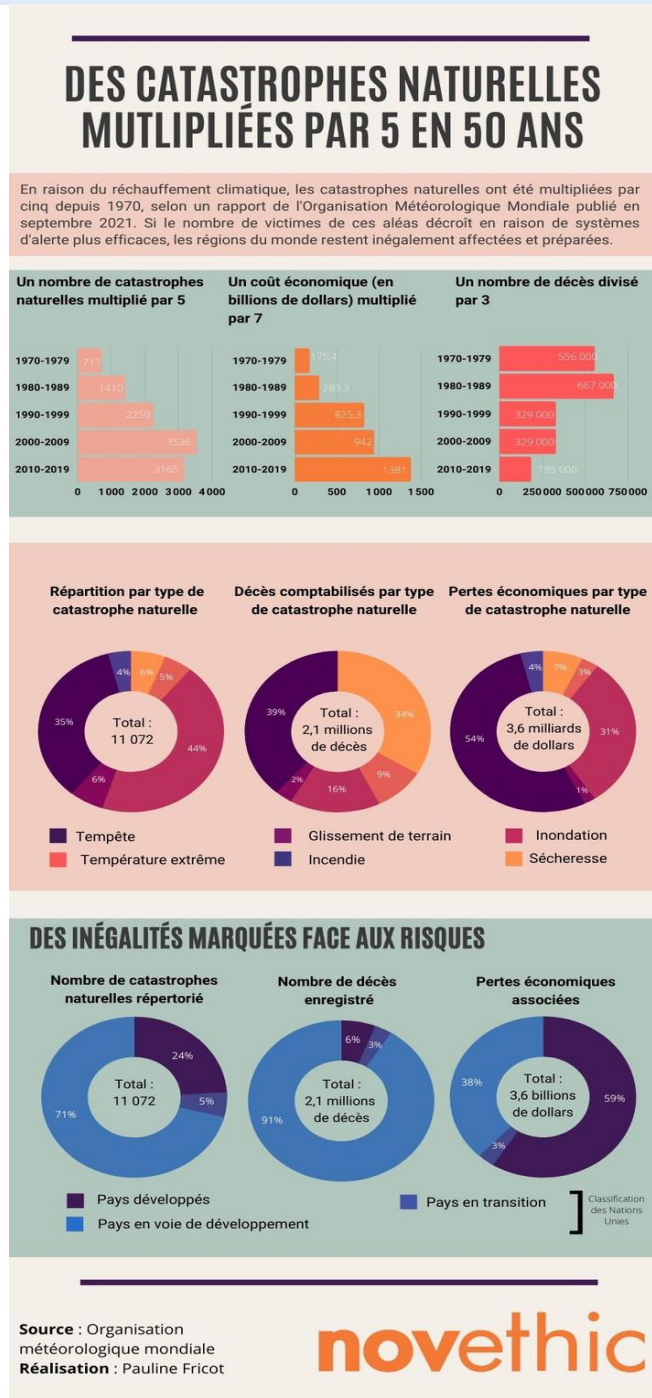


Figure 2. Les catastrophes naturelles ont été multipliées par cinq depuis 1970
(Source : www.novethic.fr)

2.3. LES CAUSES ET LES CONSEQUENCES DES RISQUES NATURELS MAJEURS

2.3.1 Les principales causes des risques naturels majeurs

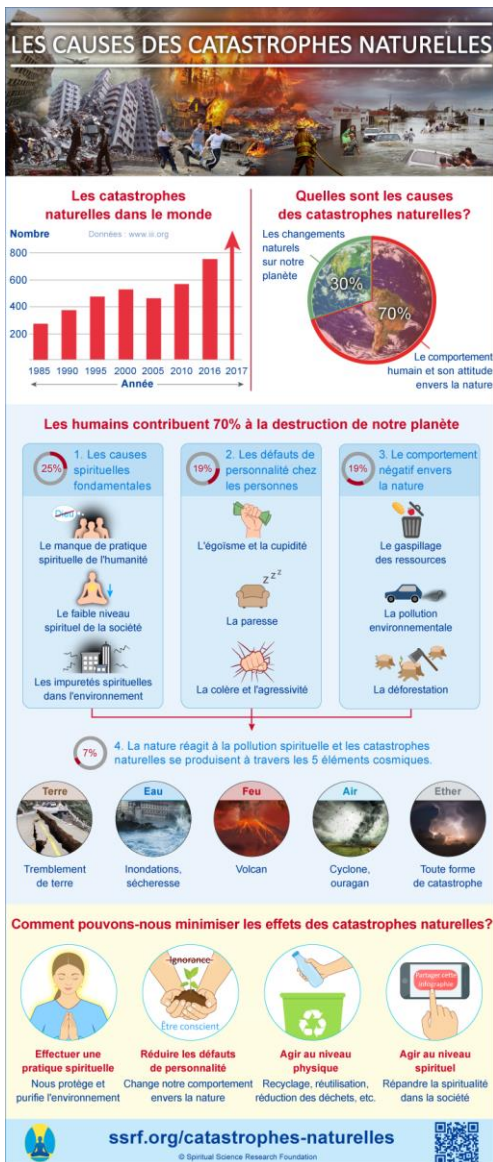


Figure 3. Les causes des catastrophes naturelles (Source : www.spiritualresearchfoundation.org)

Les principales causes des risques naturels majeurs sont les suivantes :

1. Les conditions météorologiques extrêmes, comme les tempêtes, les cyclones, les ouragans, les typhons, les tornades, les inondations, les sécheresses, les vagues de chaleur, les vagues de froid, etc.
2. Les mouvements du sol, comme les glissements de terrain, les éboulements, les effondrements, les coulées de boue, les avalanches, etc.
3. Les phénomènes géologiques, comme les tremblements de terre, les tsunamis, les éruptions volcaniques, les glissements de terrain causés par l'activité volcanique, etc.
4. Les phénomènes hydrologiques, comme les inondations fluviales, les crues éclair, les marées de tempête, les raz-de-marée, etc.

2.3.2 Les conséquences des risques naturels majeurs

Les conséquences des risques naturels majeurs sont également variées et peuvent avoir des impacts à court terme ou à long terme sur les populations, les infrastructures et les écosystèmes. Parmi les conséquences les plus courantes, on peut citer :

1. Les pertes en vies humaines, qui peuvent être très élevées selon la gravité du risque naturel.
2. Les dommages matériels, comme la destruction ou la détérioration des bâtiments, des routes, des ponts, des infrastructures électriques et hydrauliques, etc.
3. Les perturbations économiques, comme l'arrêt de l'activité commerciale, l'impact sur les productions

agricoles et forestières, etc.

4. Les impacts sur les écosystèmes, comme la perte de biodiversité, l'érosion des sols, la contamination de l'eau, la destruction des habitats naturels, etc.
5. Les impacts sociaux, comme la détresse psychologique, la perte de la communauté et de la culture locale, les déplacements forcés, etc.

Il est donc crucial de comprendre les causes et les conséquences des risques naturels majeurs pour mettre en place des mesures nécessaires pour sélectionner les sites appropriés pour l'implantation des projets, surtout ceux qui accueillent un grand nombre de personnes, afin de les protéger contre les risques naturels. Cette précaution est indispensable pour garantir la sécurité des personnes et minimiser les dommages causés par les catastrophes naturelles.

2.4. LES FACTEURS PREDISPOSANTS

Les facteurs prédisposants sont des caractéristiques géologiques, topographiques, hydrogéologiques, sismiques et climatiques qui augmentent la probabilité d'un risque naturel majeur dans une zone donnée. Ils sont pris en compte dans la cartographie de la susceptibilité aux risques naturels majeurs. Voici quelques exemples de facteurs prédisposant :

2.4.1. La topographie

Les zones situées sur des pentes abruptes sont plus susceptibles de subir des glissements de terrain, tandis que les zones situées dans des plaines sont plus susceptibles d'être touchées par des inondations.

L'altitude :

Les zones de haute altitude peuvent être sujettes à des avalanches, des glissements de terrain et des chutes de neige, tandis que les zones de basse altitude peuvent être plus susceptibles d'être touchées par des inondations.

Les pentes :

Les zones présentant des pentes raides peuvent être plus susceptibles de subir des glissements de terrain et des chutes de rochers.

L'exposition des pentes :

L'exposition d'une pente à certains éléments tels que le soleil, le vent et les précipitations peut affecter sa susceptibilité aux risques naturels majeurs. Par exemple, les pentes exposées au soleil peuvent être plus susceptibles aux incendies de forêt, tandis que les pentes exposées aux vents forts peuvent être plus susceptibles aux avalanches de neige.

2.4.2. La géologie

Les zones situées sur des failles géologiques ou des zones volcaniques sont plus susceptibles d'être touchées par des séismes ou des éruptions volcaniques.

2.4.3. L'hydrogéologie

La nature du sol et la présence de nappes phréatiques peuvent influencer la susceptibilité aux inondations et aux glissements de terrain.

2.4.4. Les séismes

La présence de failles géologiques et la sismicité passée et actuelle sont des facteurs importants pour la susceptibilité aux séismes.

2.4.5. Les précipitations

Les régions avec des précipitations intenses sont plus susceptibles de subir des inondations et des glissements de terrain.

2.4.6. La carte des sols

La nature et la composition des sols dans une zone donnée peuvent également avoir un impact sur sa susceptibilité aux risques naturels majeurs. Par exemple, les sols argileux sont plus susceptibles aux glissements de terrain, tandis que les sols sableux sont plus susceptibles aux inondations.

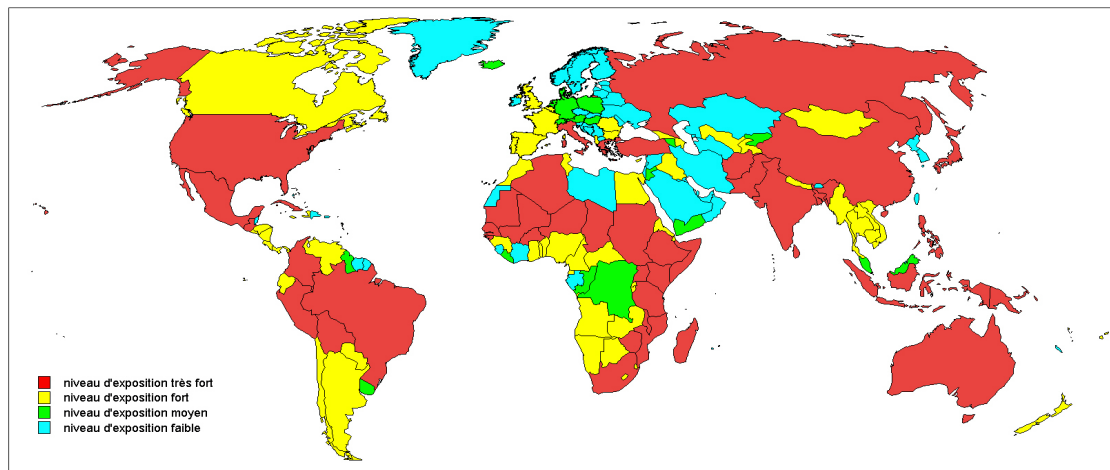


Figure 4. Niveau d'exposition des pays aux aléas naturels responsables de catastrophes naturelles
(Source : <https://journals.openedition.org>)

3. METHODOLOGIE ET CONCEPTION DE L'OUTIL D'AIDE A LA DECISION

La méthodologie adoptée pour l'élaboration de la carte de susceptibilité dans le cadre de ce travail comprend plusieurs étapes clés.

3.1. LES DONNEES

3.1.1 Collecte des données

Pour produire une carte de susceptibilité précise, il est essentiel de collecter des données sur les facteurs influençant. Ces données peuvent provenir de sources différentes, telles que des images satellites, des relevés topographiques, des données climatiques, géologiques, hydrogéologiques, sismiques, ainsi que des données historiques sur les événements passés.

3.1.2. Données influençant les risques

Entre autres, nous citons ainsi les données qui ont une influence sur les risques qu'on va étudier.

1. Précipitations

Lorsqu'il pleut, l'eau s'infiltré dans le sol et peut modifier les propriétés physiques et mécaniques des terrains, augmentant ainsi leur susceptibilité à glisser. Plus les précipitations sont abondantes, plus le sol est saturé en eau, ce qui peut causer une instabilité des pentes.

Les précipitations sont souvent considérées comme l'un des principaux déclencheurs des glissements de terrain, les précipitations peuvent également avoir un effet cumulatif sur les terrains en augmentant progressivement la saturation des sols en eau.

2. Les altitudes

Les zones de haute altitude sont souvent plus exposées aux glissements de terrain en raison de leur topographie escarpée et de leur sol souvent instable.

Les zones de basse altitude peuvent également être exposées aux glissements de terrain si le sol est constitué de matériaux meubles et mal consolidés, comme l'argile ou le limon. L'eau peut s'infiltrer dans ces matériaux et causer une instabilité, menant à des glissements de terrain.

3. Les pentes

Les pentes raides augmentent considérablement le risque de glissement de terrain, surtout si le sol est instable ou saturé en eau. L'eau de pluie ou de fonte des neiges peut s'infiltrer dans le sol, ce qui réduit la cohésion entre les particules du sol et diminue ainsi sa stabilité.

Plus la pente est forte, plus la force gravitationnelle est importante, ce qui peut provoquer des mouvements de sol en aval. Les glissements de terrain peuvent se produire de différentes manières, notamment par le glissement du sol sur une surface de rupture préexistante ou par la rupture du sol lui-même en raison de la pression exercée sur la surface.

Les pentes inférieures à 5 degrés sont généralement considérées comme peu susceptibles de glissement de terrain, tandis que les pentes supérieures à 10 degrés sont considérées comme plus à risque.

4. La géologie

Dans le cas de la zone étudiée, les formations géologiques comprennent le crétacé et le tertiaire. La géologie de la formation crétacée peut influencer le risque de glissement de terrain de plusieurs manières. Les roches crétacées sont souvent composées de calcaire, de schiste et de grès, qui peuvent être altérés ou fracturés, créant ainsi des zones de faiblesse. Ces zones de faiblesse peuvent faciliter la circulation de l'eau souterraine, ce qui peut entraîner une saturation des sols et une augmentation du risque de glissement de terrain.

De plus, les roches crétacées sont souvent plissées ou inclinées, créant des pentes plus raides dans certaines zones. Ces pentes raides peuvent être instables, surtout si elles sont saturées d'eau en raison de précipitations abondantes.

La formation tertiaire peut également avoir une influence sur le risque de glissement de terrain. En effet, cette formation est souvent constituée de roches sédimentaires tendres, telles que l'argile et le grès, qui ont une faible capacité de soutien et de cohésion.

Ces roches peuvent être exposées à l'altération et à la décomposition, ce qui peut réduire leur résistance mécanique. De plus, l'argile peut être très sensible à l'eau et se gonfler lorsqu'elle est saturée, ce qui peut augmenter la pression interstitielle et provoquer des glissements de terrain.

5. Les séismes

Les séismes peuvent avoir une influence importante sur le risque de glissement de terrain. En effet, les tremblements de terre peuvent provoquer des mouvements de terrain en modifiant la structure géologique de la zone touchée, en créant des fractures et des fissures dans le sol. De plus, les séismes peuvent également déstabiliser les pentes, en affaiblissant les matériaux qui les composent, augmentant ainsi le risque de glissement de terrain.

Les séismes peuvent également déclencher des glissements de terrain indirectement, en provoquant des inondations ou des avalanches qui peuvent ensuite causer des glissements de terrain. Les répliques sismiques peuvent également aggraver les mouvements de terrain en provoquant des secousses supplémentaires qui fragilisent encore davantage les sols.

6. Hydrographie

L'hydrographie, c'est-à-dire le réseau hydrographique (oueds, Chaaba, etc.), joue un rôle important dans la genèse des glissements de terrain. Les eaux de surface et les précipitations peuvent saturer les sols, augmentant leur porosité et leur perméabilité, ce qui peut réduire leur cohésion et leur résistance mécanique, augmentant ainsi le risque de glissement. Les eaux souterraines peuvent également avoir

un effet sur le risque de glissement de terrain. L'eau qui s'infiltré dans le sol peut accumuler des pressions interstitielles dans les couches de sol poreuses, réduisant ainsi la force de frottement entre les particules de sol, ce qui peut également augmenter le risque de glissement.

De plus, les cours d'eau peuvent également éroder les talus, ce qui affaiblit les sols et augmente le risque de glissement de terrain. Les cours d'eau peuvent également créer des zones de faiblesse dans les sols en causant des variations de charge hydraulique, ce qui peut également augmenter le risque de glissement.

7. Type des sols

Le type de sol a également une influence significative sur le risque de glissement de terrain. Dans la zone de Beni Ilmane se trouve plusieurs types de sol, les xérosols calciques sont des sols désertiques qui ont tendance à être très secs et durs, ce qui peut les rendre plus résistants au glissement. Les cambisols calciques, quant à eux, sont des sols plus riches en matière organique et plus poreux, ce qui peut les rendre plus instables en cas de saturation en eau. Les luvisols sont des sols argileux qui ont tendance à se contracter et à se dilater en fonction de la teneur en eau, ce qui peut causer des mouvements de terrain. Enfin, les yermosols sont des sols très peu développés qui ont tendance à être instables en raison de leur faible densité et de leur structure lâche. Il est donc important de prendre en compte le type de sol dans l'évaluation du risque de glissement de terrain.

8. Couvert végétal

La couverture végétale peut influencer le risque d'inondation de plusieurs façons. Tout d'abord, Les arbres peuvent aider à réduire le risque d'inondation en interceptant une partie des précipitations, en ralentissant le ruissellement de l'eau et en renforçant les sols pour qu'ils puissent mieux retenir l'eau. En revanche, la suppression des arbres peut augmenter le risque d'inondation en réduisant la capacité du sol à absorber l'eau.

Les cultures peuvent avoir un effet similaire aux arbres en aidant à absorber l'eau, mais elles peuvent également augmenter le risque d'inondation si le sol est surutilisé et que sa capacité à absorber l'eau est réduite.

Les zones bâties peuvent également augmenter le risque d'inondation en perturbant le drainage naturel du sol et en réduisant sa capacité à absorber l'eau. Les zones bâties imperméables, telles que les parkings et les routes augmentent le ruissellement de l'eau et ainsi accroître le risque d'inondation.

Les pâturages, quant à eux, peuvent aider à absorber l'eau, mais s'ils sont surutilisés, ils peuvent également réduire la capacité du sol à absorber l'eau et augmenter le risque d'inondation.

3.1.3. Analyse et traitement des données

Une fois que les données thématiques sont collectées, elles doivent être analysées et traitées pour obtenir une compréhension claire du phénomène étudié. Cela peut inclure des analyses géostatistiques, des techniques de traitement d'image, ou des méthodes d'analyse géospatiales pour créer des cartes thématiques.

3.1.4. Sélection des facteurs prédisposant

Dans cette étape, les facteurs prédisposant les plus significatives qui affectent le phénomène étudié sont identifiés et présenté par des cartes thématiques en utilisant un logiciel pour les systèmes d'informations géographiques (SIG) disponible sur le marché.

3.1.5. Production de la carte de susceptibilité

La production de la carte de susceptibilité est une étape cruciale dans notre travail. Après avoir collecté et pondéré les données thématiques, la carte de susceptibilité peut être créée à l'aide d'un outil SIG, tels que le logiciel ArcGIS, Qgis...

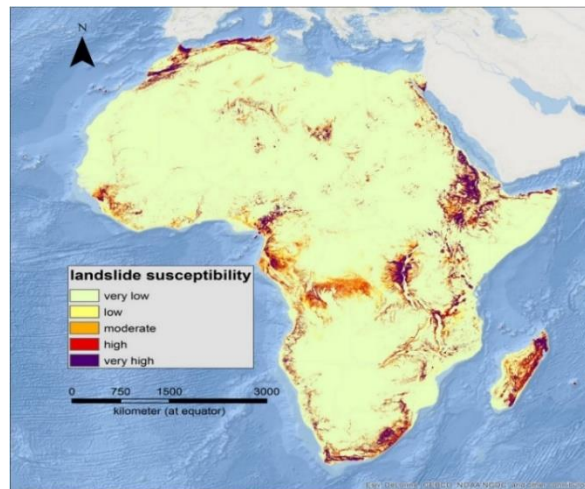


Figure 5. Landslide susceptibility map of Africa

(Source : Jente Broeckx, Matthias Vanmaercke, Rica Duchateau, Jean Poesen, (2018) A data-based landslide susceptibility map of Africa. Earth-Science Reviews Volume 185, Pages 102-121)

3.2. CHOIX DE LA METHODE DE CONCEPTION

Pour élaborer les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain, diverses méthodes telles que la logique floue, les méthodes statistiques ou la procédure d'analyse hiérarchique peuvent être utilisées.

En se basant sur les cartes thématiques préalablement réalisées, il est possible d'établir une carte de susceptibilité en utilisant la méthode AHP. Cette méthode de prise de décision multicritères permet de hiérarchiser les différents critères de façon à obtenir une cartographie de la susceptibilité des zones étudiées. En utilisant l'AHP, les décideurs peuvent évaluer de manière objective l'importance relative de chaque critère en fonction de sa contribution à la susceptibilité globale.

Cette approche permet ainsi de mieux comprendre les risques potentiels et d'identifier les zones qui nécessitent une attention particulière en matière de gestion et de prévention.

3.2.1. La méthode Processus de Hiérarchie Analytique (AHP)

Le Processus de Hiérarchie Analytique est une méthode qui permet de quantifier la relation entre les différents facteurs et de déterminer leur importance relative dans la modélisation des données. Cette méthode permet d'attribuer des pondérations aux différents facteurs en fonction de leur impact sur le phénomène étudié. Les facteurs les plus importants auront une pondération plus élevée que les facteurs moins importants.

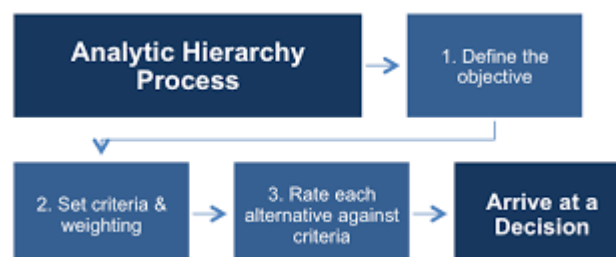


Figure 6. Etapes de la méthode de conception

3.2.2. Attribution des pondérations par la méthode SAATY

L'attribution des pondérations est une étape importante de la modélisation des données et de la création d'une carte de susceptibilité. Après avoir identifié les facteurs prédisposant les plus significatifs, des pondérations sont attribuées en fonction de leur impact sur le phénomène étudié. Pour réaliser cette étape on utilise la méthode dite méthode Saaty.

La méthode SAATY ou méthode d'analyse hiérarchique des processus est une méthode de prise de décision multicritères développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970. Elle permet de hiérarchiser et d'évaluer des facteurs et des alternatives pour aider à prendre des décisions complexes.

La méthode Saaty implique la construction d'une matrice de comparaison des critères et des alternatives, dans laquelle chaque élément est évalué en fonction de l'importance qu'il revêt par rapport aux autres éléments. Les valeurs sont généralement attribuées à l'aide d'une échelle de notation allant de 1 à 9, où 1 signifie que les deux éléments sont équivalents et 9 signifie qu'un élément est extrêmement plus important que l'autre.

Tableau 1. Saaty scale for criteria comparison (Akay & Yilmaz, 2017; Nadège, 2023)

Importance	Definition of scale
1	Equal Importance
3	Moderate prevalence of one over another
5	Strong or essential prevalence
7	Very strong or demonstrated prevalence
9	Extremely high prevalence
2, 4, 6, 8	Intermediate values

3.2.3. Procédure de la méthode

Désignons par $(c_i ; i=1, \dots, n)$ les n -critères (ou facteurs de prédisposition) considérés et par $(w_i ; i=1, \dots, n)$ leurs poids. Désignons ensuite par $C=[c_{ij}]$ la matrice de comparaison par paire des critères, dans laquelle le terme c_{ij} représente l'importance relative de c_i par rapport à c_j . Il s'ensuit donc que $c_{ji}=1/c_{ij}$, d'où $c_{ii}=1$.

La matrice de comparaison par paire s'écrit comme suit :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ 1/c_{12} & 1 & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/c_{1n} & 1/c_{2n} & & 1 \end{bmatrix}$$

L'indice de cohérence (CI) de la matrice de comparaison est défini par la relation suivante :

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

où λ_{max} représente la valeur propre maximale définie par la relation suivante (Saaty T. L., 1977):

$$\lambda_{max} = T.w$$

tel que $T=[w1/\Sigma wi \ w2/\Sigma wi \ w3/\Sigma wi \ \dots \ wn/\Sigma wi]$ désigne le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère et w calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaison.

Pour vérifier la cohérence de la matrice de comparaison qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, on utilise le ratio de cohérence (CR) défini par la relation suivante :

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

CA désigne l'indice de cohérence aléatoire moyen dérivé d'un échantillon de matrices réciproques générées aléatoirement en utilisant les échelles 1/9, 1/8, ..., 8 et 9 (Tableau 2).

Tableau 2. Average random consistency index (CA)

n (number of criteria)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CA	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

On notera que le ratio de cohérence (CR) doit être inférieur à 0,10.

En utilisant cette méthode, les pondérations peuvent être attribuées de manière objective, en prenant en compte les opinions et les connaissances des experts ainsi que les données disponibles. Cette méthode permet de hiérarchiser les facteurs en fonction de leur importance relative et de réduire les erreurs potentielles liées à la subjectivité.

3.4. LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE (SIG)

Le SIG (Système d'Information Géographique) est un outil informatique qui a pour objectif de collecter, analyser, stocker et présenter les données spatiales et géographiques.

Il a été créé et développé pour représenter et d'analyser de façon précise et exhaustive les données géographiques, qu'elles soient naturelles ou artificielles. Les utilisateurs peuvent ainsi prendre des décisions éclairées en s'appuyant sur des informations fiables et pertinentes.

Les fonctionnalités du SIG sont très variées, allant de la simple visualisation de données à l'analyse spatiale avancée. Il permet notamment de déterminer les zones d'impact environnemental d'un projet, de réaliser des simulations de croissance urbaine, d'optimiser les réseaux de transport, de gérer les ressources naturelles, de cartographier les risques naturels et technologiques, de localiser des équipements publics, de réaliser des enquêtes auprès des populations et bien plus encore.



Dans le cadre de notre travail, le SIG peut être utilisé pour intégrer et visualiser les données géographiques pertinentes telles que les cartes géologiques, hydrogéologique et topographique, il faire la conception et la création des cartes thématiques et les cartes de susceptibilité.

3.5. OUTILS NUMERIQUES

Les outils numériques de SIG sont des logiciels spécialisés qui permettent de collecter, stocker, analyser et visualiser des données géographiques. Ils sont largement utilisés pour produire des cartes, des plans, des analyses de données et des modèles numériques.

On peut citer, entre autres :

MAPINFO outil convivial pour la cartographie, la gestion de BD et l'analyse spatiale.

QGIS est un logiciel SIG libre et gratuit, qui offre des fonctionnalités avancées pour la cartographie, la gestion de données, l'analyse spatiale et la modélisation.

ARCGIS PRO est un outil SIG complet et professionnel, qui permet de créer des cartes, des applications web, des analyses de données, de réaliser des modèles numériques et de visualiser des données 3D.

SURFER est un logiciel spécialisé dans la cartographie et l'analyse de données topographiques, géophysiques et géologiques. Les outils numériques de SIG offrent ainsi une grande variété de fonctionnalités pour répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur et les aider à mieux comprendre l'espace géographique qui les entoure.

Et enfin **ArcGIS** développé par la société ESRI, est un logiciel très puissant qui offre une grande variété de fonctionnalités pour l'analyse spatiale, la cartographie, la modélisation, la gestion de données et la publication de cartes en ligne.

Les outils numériques de SIG offrent ainsi une grande variété de fonctionnalités pour répondre aux besoins spécifiques de chaque utilisateur et les aider à mieux comprendre l'espace géographique qui les entoure.

4. CONCEPTION DE L'OUTIL

L'utilisation d'outils SIG, tels que l'ArcGIS, facilite grandement la production de la carte de susceptibilité.

Ces outils permettent d'intégrer les différentes couches thématiques pour créer une carte synthétique de susceptibilité. Ils offrent des fonctionnalités avancées la modélisation et la simulation, qui permettent de prévoir les impacts des événements futurs sur la zone d'étude.

La carte de susceptibilité est un outil de cartographie qui :

- Permet d'identifier les zones d'une commune donnée en termes de risques naturels majeurs tels que les inondations, les glissements de terrain ;
- Peut être utilisée comme outil d'aide à la décision pour les communes soumises aux risques naturels majeurs ;
- Permet de visualiser les zones les plus à risque, d'identifier les zones d'habitation et les infrastructures critiques qui sont susceptibles d'être touchées en cas d'événement naturel majeur ;
- Et de mettre en place des mesures préventives et d'urgence pour réduire les risques.

Dans le cadre de notre travail, la carte de susceptibilité est utilisée pour aider les décideurs locaux à prendre des décisions éclairées en matière d'implantation de projets dans les zones à risque, et/ou pour la définition des plans d'urgence et des plans de secours en cas de catastrophe naturelle.

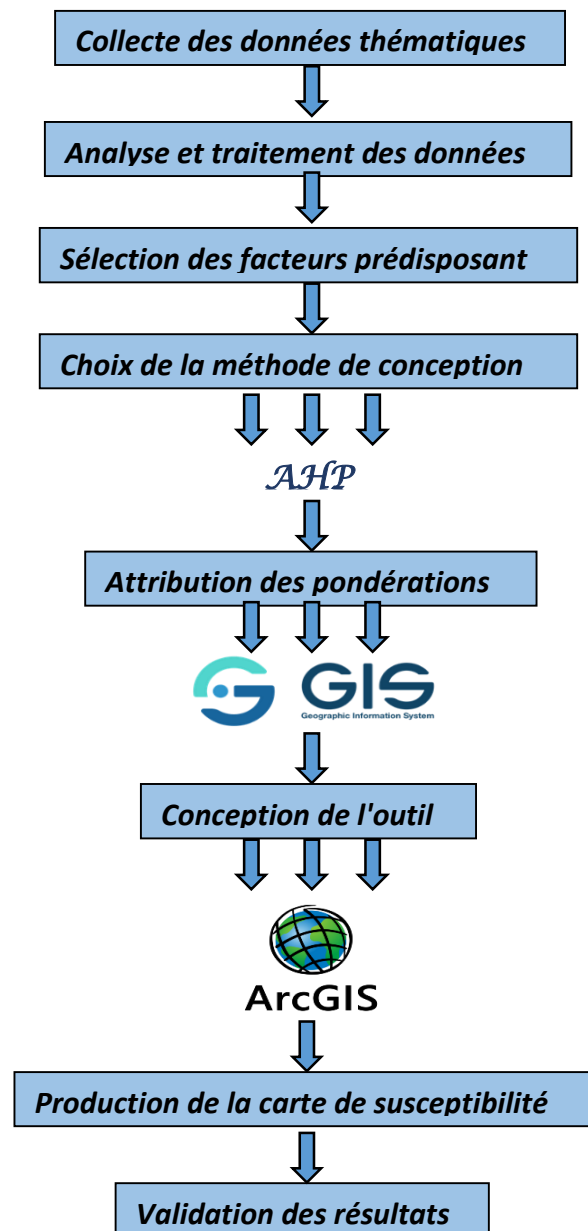


Figure 7. Etapes de Production d'une carte de susceptibilité

4.1. VALIDATION DES RESULTATS

Les résultats obtenus à partir de l'analyse doivent être validés pour s'assurer de leur fiabilité et de leur précision. Cette étape peut inclure la comparaison des résultats avec les données historiques, ainsi que la validation des résultats sur le terrain.

4.2. CARTE DE SUSCEPTIBILITE AUX RISQUES NATURELS POUR LES DECIDEURS LOCAUX

La carte de susceptibilité aux inondations est un outil important pour les décideurs locaux lorsqu'ils planifient l'implantation de projets et la gestion des risques d'inondation. Les décideurs peuvent utiliser cette carte pour identifier les zones à haut risque d'inondation et éviter l'implantation de projets dans ces zones. La carte peut également être utilisée pour identifier les zones à faible risque d'inondation et encourager le développement dans ces zones.

En outre, la carte peut aider les décideurs à élaborer des plans de gestion des risques d'inondation efficaces. Les zones à haut risque peuvent être ciblées pour des mesures préventives telles que la construction de digues et de barrages, l'amélioration des systèmes de drainage, etc. Les zones à faible risque peuvent bénéficier de mesures de conservation telles que la plantation d'arbres pour la protection contre l'érosion, la restauration des oueds et de zones humides pour améliorer la capacité de stockage d'eau, etc.

5. ETUDES DE CAS DANS LA WILAYA DE MSILA

5.1. SUSCEPTIBILITE AUX INONDATIONS DE BOUSAADA

5.1.1 Présentation de la zone d'étude

La commune de Boussaâda est située dans le sud-est du nord algérien, se trouve à environ 250 km d'Alger et à une distance d'environ 200 km à vol d'oiseau de la mer. Elle est positionnée à l'intersection des coordonnées spatiales 4° 11' longitude et 35° 13' latitude nord, avec une altitude de 560m au-dessus du niveau de la mer, et s'étend sur une superficie de 255km².

5.1.2 Contexte géologique, climatique, topographique et hydrographique

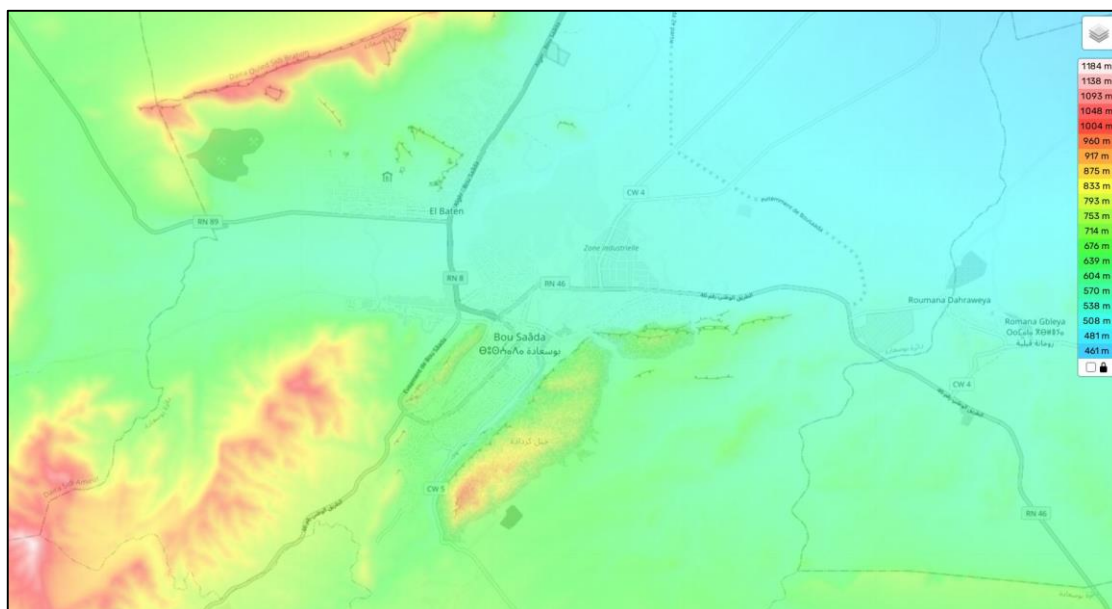
Contexte géologique : La région de Boussaâda est constituée de formation du Quaternaires : constitué Des alluvions récentes : de Cailloux de sable et encroûtements calcaire blanchâtre, la zone montagneuse du nord est un ensemble de dépôts crétacés méocènes et miocènes constitués essentiellement de calcaire, marnes grés, lumachelles, conglomérats, argiles, poudingues et gypse.

Contexte climatique : Boussaâda possède un climat tempéré méditerranéen a été chaud et sec (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger. Sur l'année, la température moyenne à Boussaâda est de 19.9°C et les précipitations sont en moyenne de 23.5mm.

Contexte topographique : La région de Boussaâda est caractérisée par la présence de chaînes de montagne d'orientation variée surtout au niveau de la partie Sud et Sud-ouest. Les reliefs existants sont :

- Djebel Grigour côté Nord-ouest de la ville.
- Djebel Moubkhira côté Sud-ouest du chef-lieu (772 m).
- Djebel Kerdada côté Sud (947 m).
- Mont de Menkeb Sidi Brahim (718 m) côté Sud-est de la ville et djebel el maaleg côté Sud de la commune.
- Les terres agricoles du côté Nord-est (village agricole d'El Maadher).

- Les vallées Traversant le périmètre de Boussaâda :
- La vallée de l'oued Boussaâda qui forme une sorte de couloir entre le Djebel Moubakhera et Djebel Kerdada et coule au pied de ce dernier en se jetant dans la plaine Nord.
- La vallée de l'Oued Maiter située à l'Ouest de la ville de Boussaâda avec une altitude de 587m à la limite Ouest de la commune et 547 m sur la RN 8, formant un couloir venteux animé par les vents Ouest et Nord, engendrant des champs de Dunes orientés Ouest-Sud-ouest / Est-Nord-est.



*Figure 8. Carte topographique de la commune de Boussaâda
(Source : <https://fr-fr.topographic-map.com>)*

Les formes récentes ne sont généralement pas stabilisées, ce sont parfois des dunes au pied des reliefs comme celui du Djebel Kerdada.

Sur la rive Est de l'Oued MAITER on trouve des champs de Sebkhass où les larges lits de l'Oued sont souvent à sec et sont soumis à la déflation des vents de l'Ouest.

Contexte hydrographique : Le réseau hydrographique de Boussaâda est marqué par deux oueds, c'est l'oued Maitar issu du versant sud de djebel Mobakhria, et l'autre oued Boussaâda est issu du djebel Kardada. Et les eaux pluviales qui traversent ces deux Oueds se déversent dans le chott du Hodna

5.1.3. Facteurs prédisposant (données)

Pour élaborer une carte de susceptibilité des risques d'inondation, il est essentiel de collecter des données sur les facteurs prédisposant qui contribuent à l'inondation. Ces facteurs incluent la précipitation, l'altitude, la pente, la géologie, l'hydrologie, le couvert végétal et les cartes de sol.

La collecte de ces données peut être effectuée à partir de différentes sources en ligne. Certaines des sources les plus courantes incluent des sites tels que la NASA, Sentinel, et USGS. La NASA fournit des données sur la précipitation à travers le programme de satellites TRMM, tandis que Sentinel fournit des images radar haute résolution pour la surveillance de la surface terrestre. USGS fournit des données sur la topographie et la géologie. Il existe également d'autres sites similaires, tels que le Centre européen pour la prévision des crues, qui fournit des prévisions de crues en temps réel.

Tableau 3. Types, sources et propriétés des données de Boussaâda

Données	Type	Source	Résolution	Date
DEM/ SRTM	Raster	USGS	30m	2018
Limites administratives	Vecteur shapefile	Diva	30m	2018
Couvert végétal (LULC)	Raster	Sentinel	10m	2021
Précipitations	XLS	NASA/NetCDF		2010 à 2022
Lithologie (carte géologie)	Vecteur shapefile	USGS		
Sols	Vecteur shapefile	FAO		

Il est important de noter que la collecte de données peut nécessiter une certaine expertise en traitement et analyse de données. Les données brutes peuvent également nécessiter des corrections pour obtenir des données de qualité pour une analyse précise et fiable. La qualité des données est un facteur clé pour la précision des résultats de la carte de susceptibilité des risques d'inondation.

5.1.4. Hiérarchisation

Les valeurs des poids relatifs attribués dépendent de notre connaissance du contexte géodynamique responsable du développement de l'instabilité du sol dans la région. Pour créer la matrice AHP, des facteurs prédisposant identifiés dans une comparaison « paire par paire » ont été utilisés. Ces facteurs sont d'abord normalisés et hiérarchisés, puis pondérés selon l'opinion d'experts (tableau 4).

Tableau 4. Matrice AHP des poids de Boussaâda

	Précipitations	Pentes	Altitudes	Hydrographie	Géologie	Type de sol	LULC	Poids	Rang
Précipitations	1	2	2	4	4	5	8	0,30	1
Pentes	0,5	1	2	2	4	5	6	0,21	2
Altitudes	0,5	0,5	1	4	5	6	6	0,21	3
Hydrographie	0,25	0,5	0,25	1	5	6	6	0,14	4
Géologie	0,25	0,25	0,2	0,2	1	4	4	0,07	5
Type de sol	0,20	0,20	0,17	0,17	0,25	1	2	0,04	6
LULC	0,13	0,17	0,17	0,17	0,25	0,5	1	0,03	7
Valeurs des paramètres n=7, $\lambda_{max}=7,7506$, CI=0,1251, RI=1,32, CR=9,4%									

5.1.5. Cartes thématiques

Dans l'élaboration de la carte de susceptibilité des risques d'inondation, l'étape de la réalisation des cartes thématiques des facteurs prédisposant est fondamentale. Ces cartes permettent de visualiser les différents facteurs qui contribuent aux inondations, tels que la précipitation, l'altitude, la pente...

La réalisation des cartes thématiques peut être effectuée à l'aide de logiciels SIG. Ce type de logiciel permet d'analyser et de cartographier les données spatiales en utilisant des couches de données superposées.

Nous avons réalisé des cartes thématiques pour chacun des facteurs prédisposant identifiés, en utilisant des données disponibles à partir de différentes sources en ligne.

Nous présentons ci-dessous les cartes thématiques réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS :

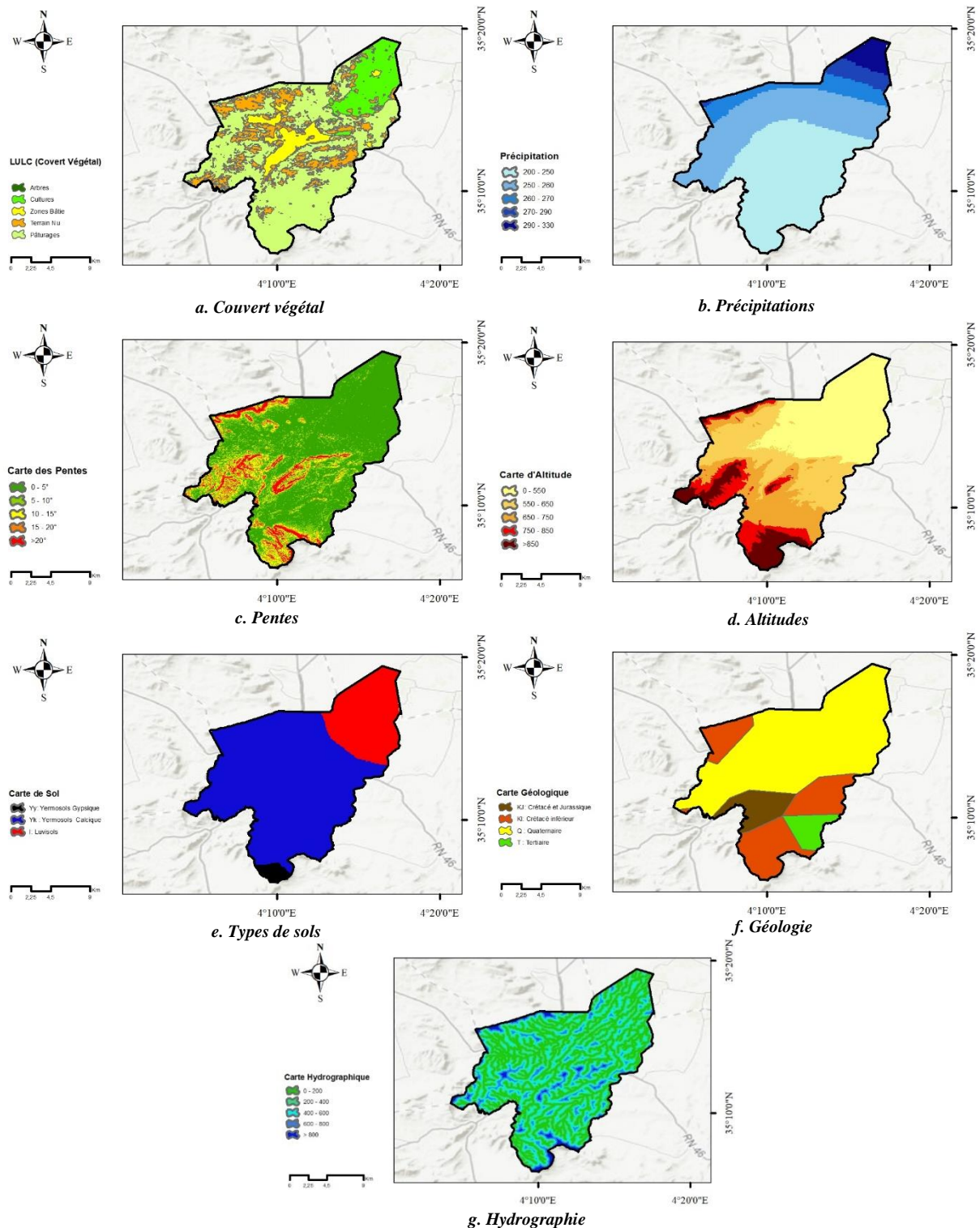


Figure 9. Cartes thématiques des facteurs prédisposant aux inondations de Boussaâda

Ces cartes thématiques ont été réalisées pour identifier les zones les plus vulnérables aux risques d'inondation, en fonction des facteurs prédisposant. Ces cartes ont ensuite été utilisées pour élaborer la carte de susceptibilité des risques d'inondation.

4.1.6. Carte de susceptibilité aux inondations

Après avoir réalisé les cartes thématiques des facteurs prédisposant, nous avons utilisé la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) pour élaborer la carte de susceptibilité des risques d'inondation, en fonction des facteurs prédisposant. Cette méthode permet d'attribuer une valeur numérique à chaque facteur prédisposant et de pondérer leur importance relative dans la probabilité d'inondation. Les cartes thématiques que nous avons réalisées ont permis de recueillir des données la précipitation, l'altitude, la pente, la géologie, l'hydrographie, le couvert végétal et le type de sol.

Les décideurs locaux peuvent utiliser cette carte de susceptibilité pour prendre des mesures nécessaires pour le choix d'implantation des projets.

Nous présentons ci-dessous la carte de susceptibilité des risques d'inondations de la commune de Boussaâda :

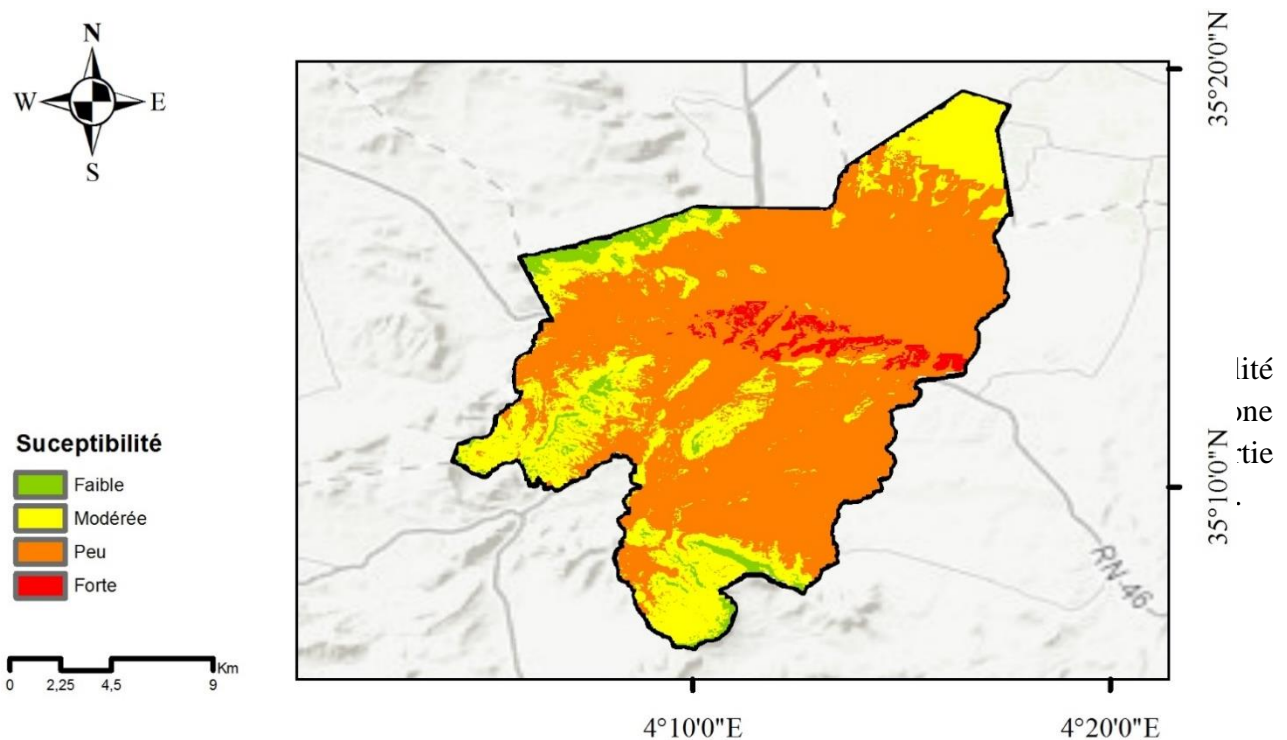


Figure 10. Carte de susceptibilité aux inondations de Boussaâda

De même, la carte de susceptibilité aux inondations révèle également quatre niveaux de susceptibilité allant du faible, peu, modéré et forte. Les résultats indiquent que seule une petite partie de la zone étudiée est classifiée comme présentant une forte ou faible susceptibilité, tandis que la majeure partie est classée comme peu susceptible, avec une partie restante présentant une susceptibilité modérée.

5.2. SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN DE BENI ILMENE

5.2.1. Présentation de la zone d'étude

La commune de Beni Ilmane se trouve au nord de la wilaya de M'sila. Elle est bordée au nord par les communes d'Al-Mazdour et Takadit de la wilaya de Bouira, ainsi que par la commune de Ben Daoud de la wilaya de Bordj Bou Arreridj. À l'est, elle est limitrophe de la commune de Nougat, et au sud de la commune de Sidi Hadjres.

La commune de Beni Ilmane a été choisie pour l'étude de cas de glissement de terrain en raison de plusieurs facteurs qui en font une zone particulièrement exposée à ce risque naturel. Tout d'abord, sa

topographie accidentée, caractérisée par des pentes raides et des altitudes variables, en fait une zone propice aux glissements de terrain. De plus, la commune est située dans une zone sismique active, ce qui peut également contribuer à déclencher des mouvements de terrain.

La géologie de la région est également un facteur important. Les sols de la commune sont constitués de formations géologiques complexes, avec une variété de roches et de sédiments qui peuvent influencer la stabilité du sol. Les précipitations, qui peuvent être abondantes dans la région, sont un autre élément clé. Les fortes pluies peuvent saturer le sol et causer des glissements de terrain, en particulier sur les pentes les plus abruptes.

5.2.2. Contexte géologique, sismique et topographique de la commune étudiée

Contexte géologique

La géologie de la région de Beni Ilmane est représentée essentiellement par une formation composée des grandes couches d'argile ou d'argile marneuse intercalée par des roches dures de calcaire ou des grès et limons.

Contexte sismique

D'après le RPA 99 Version 2003, Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante, soit :

Zone 0 : Sismicité négligeable.

Zone I : Sismicité faible.

Zone IIa et IIb : Sismicité moyenne.

Zone III : Sismicité élevé.

La région de Beni Ilmane est classée zone IIa, de sismicité moyenne.

Contexte topographique

Le relief de la région est très varié, au nord un terrain accidenté et des plaines fertiles, et au sud, des plaines étendues. La zone montagneuse est connue par le célèbre mont dit Djebel Kherrat.

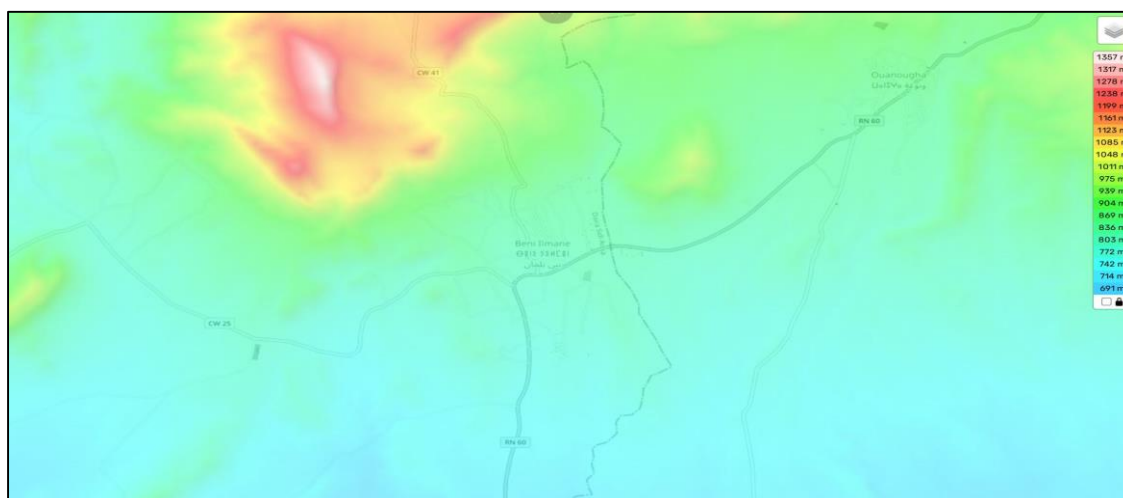


Figure 11. Carte topographique de la commune de Beni Ilmane
(Source : <https://fr-fr.topographic-map.com>)

5.2.3. Méthode d'hierarchisation AHP

La méthode (AHP) est utilisée pour déterminer les poids des huit facteurs de prédisposition qui contribuent aux instabilités de terrain dans la région étudiée (Fares, 1994). Pour ce faire, une comparaison "paire-par-paire" est effectuée entre chacun des huit facteurs. Les facteurs sont alors standardisés et classés en fonction de leur importance relative.

Cette méthode permet d'obtenir une matrice qui permet de calculer les poids attribués à chaque facteur. Ces poids sont basés sur les connaissances du contexte géodynamique de la région, qui sont fournies par des experts en géologie et en géotechnique.

Tableau 5. Matrice AHP des poids de Beni Ilmane

	Pentes	Altitudes	Précipitations	Séisme	Hydrographie	LULC	Géologie	Type de sol	Poids	Rang
Pentes	1	1	2	3	4	5	6	7	0,26	1
Altitudes	1	1	2	3	4	5	6	6	0,26	2
Précipitations	0,50	0,50	1	3	4	5	6	7	0,19	3
Séisme	0,33	0,33	0,33	1	3	3	3	4	0,10	4
Hydrographie	0,25	0,25	0,25	0,33	1	4	4	4	0,08	5
LULC	0,20	0,20	0,20	0,33	0,25	1	2	2	0,04	6
Géologie	0,17	0,17	0,17	0,33	0,25	0,5	1	2	0,03	7
Sols	0,17	0,17	0,33	0,25	0,5	1	0,5	1	0,04	8
Valeurs des paramètres n=8, $\lambda_{max}=8,8755$, CI=0,1250, RI=1,32, CR= 9,4%										

5.2.4. Facteurs prédisposant (données)

La collecte de données des facteurs prédisposant est également une étape essentielle dans l'élaboration d'une carte de susceptibilité des risques de glissement de terrain. Les facteurs qui contribuent aux glissements de terrain incluent la précipitation, l'altitude, le séisme, la pente, la géologie, l'hydrologie, le couvert végétal et les cartes de sol.

Les données peuvent être collectées à partir de diverses sources en ligne. Des sites tels que la NASA, Sentinel et USGS peuvent fournir des données sur les précipitations, la topographie, la géologie et les séismes. La NASA fournit des données sur la pluviométrie, la température et l'humidité de la surface terrestre à travers le programme de satellites TRMM, tandis que Sentinel fournit des images radar haute résolution pour la surveillance de la surface terrestre. USGS fournit des données sur la topographie, la géologie et les séismes.

Il existe également d'autres sources de données en ligne pour la collecte des données des facteurs prédisposant, tels que la base de données mondiale de géologie de l'UNESCO, qui fournit des informations détaillées sur les formations géologiques et les régions sismiques. Les données de couverture végétale peuvent être collectées à partir de l'imagerie satellite de la NASA et de l'Agence spatiale européenne.

Il est important de noter que les données collectées peuvent nécessiter une certaine expertise en traitement et analyse de données. La qualité des données est également un facteur clé pour l'élaboration d'une carte de susceptibilité des risques de glissement de terrain précise et fiable.

Tableau 6. Types, sources et propriétés des données de Beni Ilmane

Données	Type	Source	Résolution	Date
DEM/ SRTM	Raster	USGS	30m	2018
Limites administratives	Vecteur shapefile	Diva	30m	2021
Couvert végétal (LULC)	Raster	Sentinel	10m	
Précipitations	XLS	NASA/NetCDF		2010 à 2022
Lithologie (carte géologie)	Vecteur shapefile	USGS		
SOLS	Vecteur shapefile	FAO		
Séisme	XLS	USGS		2010

5.2.5. Cartes thématiques

La réalisation de cartes thématiques des facteurs prédisposant est une étape fondamentale dans l'élaboration de la carte de susceptibilité des risques de glissement de terrain. Les cartes thématiques permettent de visualiser et d'analyser les différents facteurs qui contribuent aux risques de glissement de terrain.

Les facteurs prédisposant tels que la précipitation, l'altitude, le séisme... peuvent être représentés sous forme de cartes thématiques. Ces cartes permettent de visualiser la distribution spatiale de chaque facteur et de déterminer leur degré influence sur les risques de glissement de terrain.

Nous avons réalisé les cartes thématiques à l'aide de logiciels SIG (Système d'Information Géographique) tels qu'ArcGIS. Ce logiciel permet de manipuler, analyser et représenter les données spatiales de manière efficace et précise.

Par exemple, pour représenter le facteur pente dans une carte thématique, les données topographiques sont indispensables. Ces données peuvent être récupérées à partir de modèles numériques de terrain appelés DEM (Digital Elevation Model) qui représentent la topographie d'une zone en utilisant des points de mesures altimétriques.

Les données DEM sont généralement fournies par des organismes publics tels que l'USGS (United States Geological Survey) ou le SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Ces données sont accessibles gratuitement en ligne ou peuvent être achetées auprès de fournisseurs commerciaux. Ces données peuvent ensuite être représentées sous forme de cartes thématiques avec différentes couleurs pour représenter les différentes classes de pente.

Dans notre cas d'étude, nous avons réalisé des cartes thématiques pour chacun des facteurs prédisposant identifiés, en utilisant des données disponibles à partir de différentes sources en ligne.

Nous présentons ci-dessous les cartes thématiques réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS :

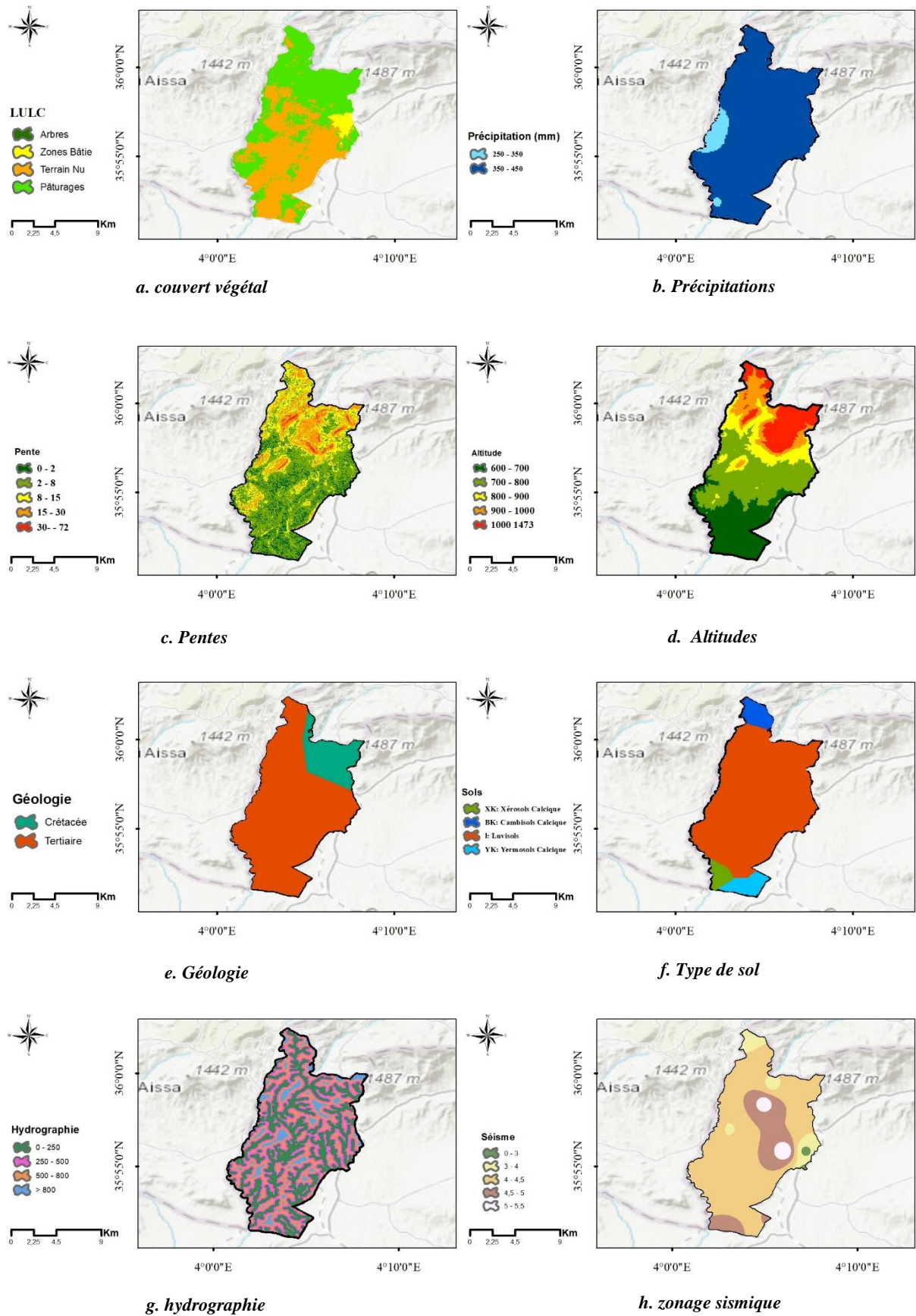


Figure 12. Cartes thématique des facteurs prédisposant du glissement de Beni Ilmane

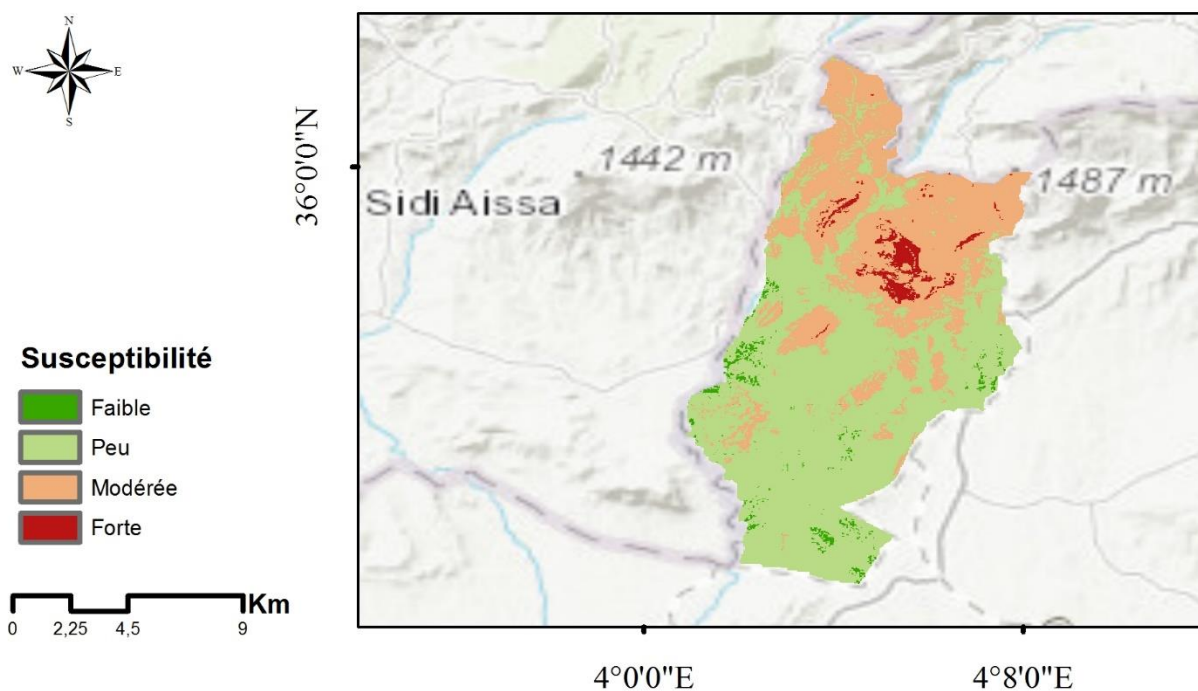
5.2.6. Carte de susceptibilité des glissements de terrain de Beni Ilmane

Les résultats obtenus à partir de la méthode d'Analytic Hierarchy Process (AHP) pour l'élaboration d'une carte de susceptibilité des risques de glissement de terrain à la commune de Beni Ilmane ont été prometteurs. La méthode a permis de prendre en compte plusieurs critères tels que la pente, la géologie et le séisme pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Beni Ilmane. La pondération de ces critères a été effectuée de manière rigoureuse en impliquant des experts locaux et en utilisant des données géospatiales.

Les résultats obtenus ont permis de diviser la zone d'étude en trois niveaux de susceptibilité aux risques de glissements de terrain : faible, moyen et élevé. La carte de susceptibilité obtenue montre clairement les zones les plus susceptibles aux risques d'inondation, en fonction des facteurs prédisposant.

Les décideurs locaux peuvent utiliser cette carte de susceptibilité pour prendre des mesures nécessaires pour le choix d'implantation des projets.

Nous présentons ci-dessous la carte de susceptibilité de risques des glissements de terrain de la commune de Beni Ilmane :



La carte de susceptibilité aux glissements de terrain révèle quatre niveaux de susceptibilité : faible, peu, modéré et forte. Les résultats indiquent que seule une petite partie de la zone étudiée est classée comme présentant une forte ou faible susceptibilité, tandis que le reste est réparti entre une susceptibilité peu élevée et modérée.

6. VALIDATION DES CARTES DE SUSCEPTIBILITE

6.1. INVENTAIRE DES RISQUES ANTERIEURS

L'inventaire des risques antérieurs des communes de Beni Ilmane et de Boussaâda a pour objectif de valider les cartes de susceptibilité établies en comparant les zones à risque identifiées sur ces cartes avec les zones qui ont réellement été touchées par le passé. Cette démarche vise à renforcer la fiabilité des cartes de susceptibilité en les confrontant aux événements antérieurs. En analysant les zones réellement affectées par des risques de glissements de terrain et les inondations, il sera possible d'évaluer l'exactitude et la pertinence des cartes. Cette validation des cartes de susceptibilité constitue une étape cruciale pour améliorer la prévention et la gestion des risques dans ces communes.

6.1.1. Glissements de terrain dans la commune de Beni Ilmane

Suite au séisme du 14 Mai 2010 qui a frappé la région de Melouza et Beni-Ilmane, des mouvements de terrain ont été observés, comme encadrés dans le tableau 3.

Tableau 7. Inventaire des risques antérieurs de la commune de Beni Ilmane (Zazoun, 2012)

N°	Longitude (DD)	Latitude (DD)	Lieu	Mouvement de terrain
1	35.967	4.115	Mendrous	Chute de pierres et fractures
2	35.976	4.101	Casbah	Affaissements
3	35.980	4.098	Casbah	Relais dextres
4	35.951	4.096	Djebel Kherrat	Push-up – dextres
5	35.966	4.096	Djebel Kherrat	Affaissements
6	35.964	4.095	Djebel Kherrat	Fractures (N-S)
7	35.966	4.098	Djebel Kherrat	Chute de pierres et fractures
8	35.969	4.102	Djebel Kherrat	Fractures (NE-SO)
9	36.017	4.114	Teniet El Haddada	Chute de pierres
10	36.013	4.115	Teniet El Haddada	Chute de pierres et affaissement
11	36.008	4.107	Koudiat El Haoès	Fractures (NE-SO)
12	36.009	4.107	Koudiat El Haoès	Chute de pierres et fractures
13	36.013	4.097	Ouled Mehenni	Chute de pierres et fractures
14	36.012	4.097	Ouled Mehenni	Affaissements
15	36.014	4.098	Ras El Kef	Affaissements
16	36.005	4.106	Samma	Fractures
17	36.003	4.108	Samma	Résurgence de source d'eau

Nous avons pu élaborer par la méthode AHP, deux cartes de susceptibilité une carte de susceptibilité aux glissements de terrain et une autre de susceptibilité aux inondations :

6.1.2. Inondations dans la commune de Boussaâda

Durant les dernières années, plusieurs quartiers et site dans la commune de Bousaada et ses environs, ont été inondés durant les périodes de crues et de pluies torrentielles.

Tableau 8. Inventaire des risques antérieurs de la commune de Boussaâda

Station	Date	Localité	Coordonnées Géographiques					
			Longitude			Latitude		
			°	'	"	°	'	"
1	28/10/2018	بجي أول نوفمبر	4	11	17,7	35	12	57,7
2	28/10/2018	انقطاع جزئي للطريق الوطني رقم 08 ببوسعادة	4	10	30,3	35	15	8,3
3	30/05/2018	جنان الروبي	4	9	38,3	35	10	59,2
	01/09/2019							
	14/05/2021							
	08/03/2022							
4	24/01/2019	حي ميتر بلدية بوسعادة.	4	9	30,3	35	13	12,1
5	06/09/2019	مطحنة فييرو	4	9	57,3	35	11	31
6	28/08/2020	سيدي سليمان	4	9	27,9	35	11	20,5
7	28/08/2020	حي مسيرح	4	11	0,3	35	12	40,7
8	28/08/2020	حي أولاد حميدة	4	11	15,5	35	12	37,5
9	14/05/2021	لميمين	4	10	55,3	35	12	59,1
10	14/05/2021	واد ميتر	4	9	3.46	35	14	1,5
	31/08/2021							
	09/09/2021							
	25/09/2022							
11	06/10/2022	معذر الدفلة	4	16	10.1	35	17	20,4

6.2. VALIDATION DE LA CARTE DE SUSCEPTIBILITE

6.2.1. Validation de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain

En conséquence du tremblement de terre dévastateur d'une magnitude de 5,2 et d'épicentre Djebel Kharrat, dans la commune de Beni Ilmane le 14 mai 2010, de nombreuses études exploratoires et tests géotechniques et géophysiques ont été réalisés pour déterminer les causes et évaluer l'état des sites endommagés. Des observations et des mesures structurales ont été effectuées par plusieurs stations de mesure. Traces de surface identifiables et bien visibles (fissures, dépressions, cailloux, etc.) ont été localisées en surface à l'aide d'un système d'information géographique (SEDDIKI, 2021).

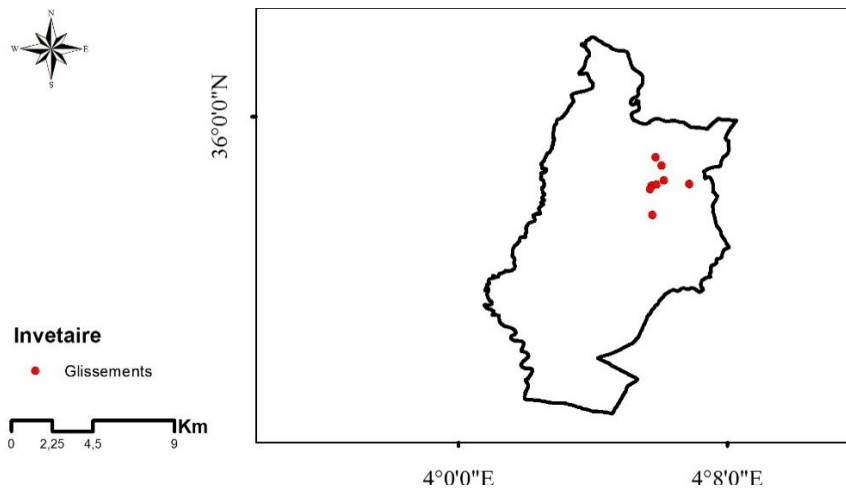


Figure 14. Inventaire des mouvements de terrain induits par le séisme de Beni Ilmane

En ce qui concerne la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) de sensibilité/spécificité, les résultats démontrent un pouvoir prédictif significatif (AUC= 0,673) lors de la comparaison entre la carte de susceptibilité et d'inventaire des glissements. Cette observation est illustrée dans la figure 14.

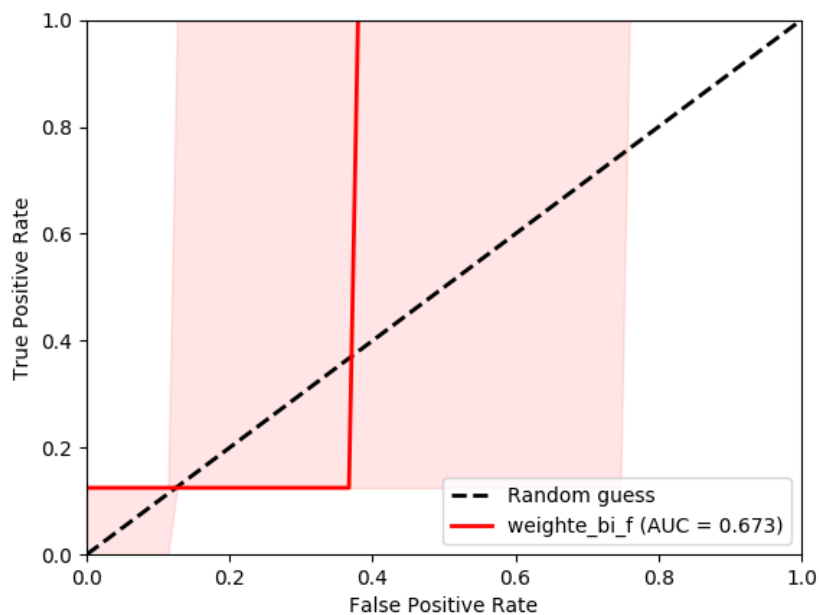


Figure 15. Courbe sensibilité/spécificité (ROC) pour la carte de susceptibilité de Beni Ilmane

6.2.2. Validation de la carte de susceptibilité aux inondations de Bousaada

Suite aux intempéries qui ont eu lieu ces dernières années à Bousaada, on a pu recueillir les lieux des inondations à partir de différentes sources, présence en lieu, services de protection civile et littérature. Les points géolocalisés sont repérés sur la figure 16.

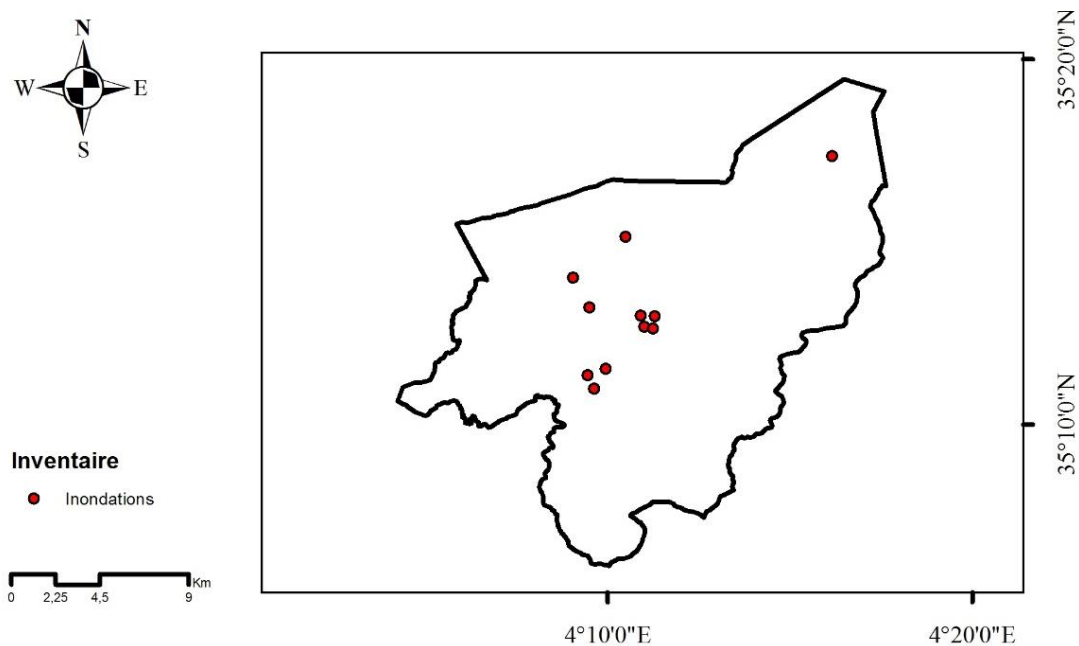


Figure 16. Inventaire des inondations de Bousaada durant les dernières années

La courbe ROC de sensibilité/spécificité met en évidence un pouvoir prédictif acceptable (AUC = 0,588) lors de la comparaison entre la carte de susceptibilité et la carte d'inventaire des inondations. Cette observation est illustrée dans la figure 15.

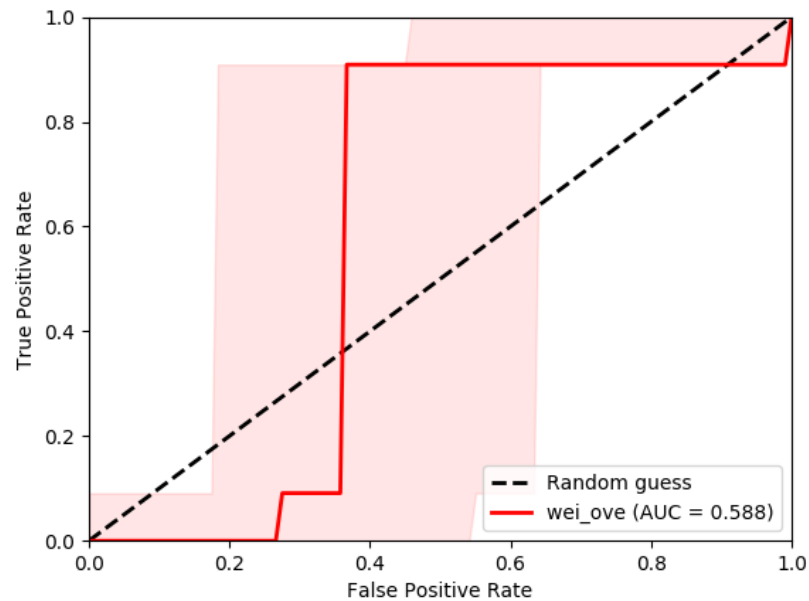


Figure 17. Courbe sensibilité/spécificité (ROC) pour la carte de susceptibilité de Boussaâda

6.3. AVANTAGES ET LIMITES DES CARTES DE SUSCEPTIBILITE DES RISQUES NATURELS

Les cartes de susceptibilité aux risques naturels, telles que celles développées dans notre étude sur la commune de Beni Ilmane pour les glissements de terrain et à Boussaâda pour les inondations, offrent de nombreux avantages dans l'aide à la prise de décision des décideurs locaux. Elles permettent de mieux comprendre les zones présentant un risque élevé, modéré ou faible, ce qui facilite la planification et l'implantation de projets dans les communes exposées à ces risques.

Grâce à ces cartes et à l'outil d'application numérique qui les accompagne, les décideurs peuvent visualiser et évaluer rapidement les zones à risque, ce qui les aide à choisir judicieusement l'emplacement des projets et à prendre des mesures appropriées pour réduire les risques. Cependant, il convient de noter que les cartes de susceptibilité ont aussi leurs limites. Elles sont basées sur des modèles et des données disponibles, ce qui peut introduire des incertitudes dans les résultats. De plus, elles ne prennent pas en compte tous les facteurs prédisposant possibles, tels que les changements climatiques futurs. Par conséquent, il est important de les utiliser comme un outil complémentaire dans la prise de décision, en tenant compte des autres informations et expertises disponibles pour une gestion globale et efficace des risques naturels.

6.4. PERSPECTIVES D'AVENIR POUR LES CARTES DE SUSCEPTIBILITE DES RISQUES NATURELS

Les cartes de susceptibilité des risques naturels présentent d'excitantes perspectives d'avenir. Grâce aux avancées technologiques, notamment l'intelligence artificielle et l'amélioration des modèles d'analyse, ainsi qu'au développement considérable des outils tels que les SIG et les logiciels spécialisés, il est possible d'améliorer davantage la précision et la fiabilité de ces cartes. L'intégration de données en temps réel provenant de différentes sources, telles que les capteurs satellitaires, les

données météorologiques et les réseaux sociaux, permettra une surveillance continue et une mise à jour régulière des cartes de susceptibilité. De nouvelles méthodes d'analyse, telles que l'intelligence artificielle, pourront également être appliquées pour améliorer la modélisation et la prévision des risques naturels. De plus, grâce à une accessibilité accrue des outils SIG et des applications numériques, un large éventail d'utilisateurs tels que les décideurs locaux, les bureaux d'études, les chercheurs et les communautés affectées pourront facilement accéder, utiliser et interpréter ces cartes. Dans l'ensemble, les perspectives d'avenir pour les cartes de susceptibilité des risques naturels sont prometteuses, offrant ainsi de nombreuses opportunités pour une gestion proactive des risques et une meilleure protection des populations et des infrastructures.

7. CONCLUSION

Ce travail représente une avancée significative dans la gestion des risques naturels et la prise de décisions éclairées en matière d'implantation et planification des projets. La démarche d'élaboration d'une carte de susceptibilité adaptée aux risques naturels, tels que les inondations et les glissements de terrain, offre aux autorités locales un outil précieux pour évaluer et minimiser les conséquences désastreuses de tels événements sur la vie et la santé des populations et la sécurité des constructions et des infrastructures.

L'étude de cas menée sur les communes de Boussaâda et Beni Ilmane met en évidence l'importance de prendre en compte divers facteurs prédisposant, tels que la géologie, le climat, la topographie et l'hydrographie, séisme...etc. pour évaluer la susceptibilité aux risques naturels. En utilisant la méthode Analytic Hierarchy Process (AHP) et les outils du système d'information géographique (SIG), les cartes de susceptibilité ont pu être réalisées, révélant des niveaux différenciés de susceptibilité dans les zones étudiées.

L'utilisation de ces cartes par les décideurs locaux peut guider efficacement les choix d'implantation de projets et permettre la mise en place de mesures de prévention et de protection appropriées. En intégrant la carte de susceptibilité dans les processus de décision, les autorités locales seront en mesure de mieux évaluer les risques et de minimiser les conséquences potentielles des catastrophes naturelles.

Ce travail contribue ainsi à l'amélioration de la gestion des risques naturels, à la protection de la vie et de la santé des populations, ainsi qu'à la sécurité des constructions et des infrastructures. En fournissant un outil pratique et pertinent, ils offrent aux décideurs locaux les moyens de prendre des décisions plus éclairées, en prenant en compte les enjeux liés aux risques naturels dans leurs plans d'aménagement du territoire. Il est donc essentiel de continuer à développer et à affiner ces méthodologies pour une gestion efficace des risques naturels à l'avenir.

REFERENCES

- Akay, A. E., & Yilmaz. (2017). Using GIS and AHP for planning primer transportation of forest products. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4, 19.
- ASSAKO, R.-J. A. (1997). *Apport des systèmes d'information géographique dans l'analyse des risques d'inondation et de glissement de terrain à Yaoundé1. De Bergier, Villes du Sud et environnement.*
- BROECKX, J. V. (2018). Une carte de sensibilité aux glissements de terrain basée sur des données en Afrique. (R. d. Terre, Éd.) 185, 102-121.
- Fares, A. R. (1994). Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain-(Région de Taounate-Rif, Nord du Maroc). (69), 63-72.
- LEROI, E. F.-L. (2001). (R. f. géotechnique, Éd.) (95-96), 155-163.
- Medjitna, W. (2021). *Nature Et Etendu De La Question Environnementale En Algerie: Un Pays A Risques Majeurs.*
- Nadège, K. J. (2023). Contribution of multicriteria analysis and GIS in the discrimination of flood risk areas on the Allada plateau in Southern Benin.
- Ramos, A. C. (2014). 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. *Geo-Eco-Trop*, 38(1), 33-44.
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning Priority Setting.* New York: Resource Allocation. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281. doi:doi: [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- SEDDIKI, A. &. (2021). *Apports de la télédétection et des systèmes d'information géographique à l'établissement d'une carte de susceptibilité aux mouvements de terrain à Beni Ilmane, wilaya de Msila, en Algérie.* First I.C.G.S.A.M.E.: From research to Practice Biskra Algeria.
- Zazoun, R. S. (2012). Le séisme du 14 Mai 2010 de Beni ilmène (Msila, algérie),(Ms: 5, 2): Analyse des traces de surface. *Bulletin du Service Géologique de l'Algérie*, 23(1), 85-101.

Sites internet :

www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-risques-majeurs

<https://fr-fr.topographic-map.com>

<https://journals.openedition.org>

www.novethic.fr

www.spiritualresearchfoundation.org

www.vie-publique.fr

www.wikipedia.org