

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Mohamed Elbachir El Ibrahimi
Bordj Bou Arreridj
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie Civil



MÉMOIRE

En vue de l'obtention d'un diplôme de Master en Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème

**Utilisation des SIG pour la modélisation de la
susceptibilité des terrains aux glissements de terrain
dans la région de Bouira**

Réalisé par :

Lahmidi Alla Eddine

Devant le jury composé de:

Dr. Noui Ammar	MCB	UBBA	Président
Dr. Hadji Riheb	MCB	UBBA	Examineur
Dr Mazouz Badis	MCB	UBBA	Examineur
Dr. Achour Yacine	MCA	UBBA	Encadreur
Dr. Kessal Oussama	MCB	UBBA	Co-encadreur

Promotion : 2020/2021

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur de mémoire Dr Achour Yacine. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé. J'adresse mes sincères remerciements à mon ami Nouioua Thamer qui m'a aidé énormément et à tous mes professeurs intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur, et mes frères pour leurs encouragements.

Enfin, je remercie mes amis Moiz, Mohamed, Youcef et Firas qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Résumé :

Les glissements de terrain sont responsables de dommages économiques, de pertes en vies humaines et de changements irréversibles dans l'environnement naturel. La localité d'Ain Turck (bouira) est connue pour ses pentes instables caractérisées par une morphologie très rugueuse avec des pentes raides (**20 à 25%**).

Dans cette étude, un modèle de susceptibilité aux glissements de terrain a été développé par le processus de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (**AHP**) dans un environnement **SIG**. Sept couches d'entrée de facteurs de causalité des glissements de terrain ont été sélectionnées (pente, aspect de la pente, altitude, proximité des routes, proximité des réseaux hydrographiques, courbure plane, courbure du profil). La carte de susceptibilité aux glissements de terrain dérivée de la méthode **AHP** a été obtenue après avoir attribué des poids à différents facteurs.

Nous observons que **50 %** de notre zone d'étude est vulnérable aux glissements de terrain où la susceptibilité est élevée et très élevée d'après le modèle final.

Mots clés :

Analyse Multicritère Hiérarchique (**AHP**).

Glissement de terrain.

Susceptibilité.

Système d'information géographique (**SIG**).

Morphologie.

Pentes.

Abstract:

Landslide phenomena are responsible for economic damages, loss of human lives and irreversible changes in natural. The locality of Ain Turck (bouira) is known for its unstable slopes characterized by a very rough morphology with slopes (20 to 25%).

In this study, a landslide susceptibility model was developed by analytic hierarchy process (**AHP**) in a **GIS** environment. Seven input layers of landslide causative factors were selected including: (slope, slope aspect, elevation, proximity to roads, and proximity to hydrographic systems, plane curvature, and profile curvature). The landslide susceptibility map derived from AHP method was obtained after assigning the weights of different factors.

We observe that **50%** of our study area is vulnerable to landslides where the susceptibility is high and very high from the final model.

Keywords

Analytic hierarchy process (**AHP**).

Landslides.

Susceptibility.

Geographic information system (**GIS**).

Morphology.

Slopes.

ملخص:

تتسبب ظاهرة الانهيارات الأرضية في حدوث أضرار اقتصادية جسيمة وخسائر في الأرواح وتغيرات لا رجعة فيها في البيئة الطبيعية. تشتهر منطقة عين الترك بمنحدراتها الغير مستقرة التي تتميز بمورفولوجيا خشنة للغاية مع منحدرات شديدة الانحدار (20 إلى 25٪).

في هذه الدراسة ، تم تطوير نموذج الحساسية للانهيارات الأرضية بواسطة عملية التحليل الهرمي متعدد المعايير في بيئة نظم المعلومات الجغرافية. تم اختيار سبع طبقات من العوامل المسببة للانهيارات الأرضية بما في ذلك : (المنحدر ، جانب المنحدر ، الارتفاع ، القرب من الطرق ، القرب من الشبكات الهيدروغرافية ، الانحناء المستوي ، الانحناء الجانبي). تم الحصول على خريطة الحساسية للانهيارات الأرضية المستمدة من طريقة التحليل الهرمي متعدد المعايير بعد تعيين أوزان العوامل مختلفة.

نلاحظ أن 50٪ من منطقة دراستنا معرضة للانهيارات الأرضية حيث تكون القابلية للتعرض عالية وعالية جداً وفقاً للنموذج النهائي.

الكلمات المفتاحية

التحليل الهرمي متعدد المعايير.

انهيارات أرضية.

نظام المعلومات الجغرافية.

القابلية.

منحدرات.

مورفولوجيا.

Sommaire

REMERCIEMENTS

Résumé

Abstract

ملخص

Acronymes.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des Tableaux.....	III
Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	4
Synthèse bibliographique	4
1.Introduction.....	5
2. Les glissements de terrain.....	5
2.1 Glissement plan	5
2.2 Glissement rotationnel ou circulaire	6
2.3 Glissements complexe	6
• Les écoulements et chutes de blocs.....	7
• Le fluage.....	8
3. Principales causes des glissements.....	9
4. Indices et phénomènes induits par les glissements.....	10
1.Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité	12
1.1. Approches semi-quantitatives :	13

1.1.1. Méthodes d'analyse multicritiques :	13
a. Approche de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) :.....	14
b. Méthode de superposition pondérée :	15
c. Méthode logique floue	16
1.2. Approches quantitatives	16
1.2.1. Approches statistiques	16
a. Approche statistique bivariée	17
1-Méthode d'analyse fréquentielle (rapport de vraisemblance) :.....	17
2-Méthode du « Weights of Evidence » poids de la preuve (WOE) :.....	17
b. Approche statistique multivariée	18
1.2.2. Méthodes d'intelligence artificielle (IA) :	18
1.2.3. Approche probabiliste	19
1.2.4. Approche déterministe	19
1.3.Approches qualitatives.....	20
Techniques d'inventaire géomorphique et de glissement de terrain	20
Conclusion.....	20
Chapitre II.....	22
Description générale de la région d'étude.....	22
1.Introduction.....	23
2. Localisation géographique de la région d'étude.....	23
3. Climat.....	25
3.1. Précipitation	25
3.1.1. Précipitation mensuelle et répartition saisonnière	25
a. Les moyennes des précipitations mensuelles	25
b. La répartition saisonnière.....	27
3.2. Température.....	28
3.3. Vent	28

3.2. Cadre géologique et géomorphologique.....	30
4. Contexte Géologique.....	31
4.1 Géologie régionale.	31
4.1.1. Aperçu sur la géologie du nord Algérien.	31
a. Les zones internes.....	31
• Le socle kabyle.	33
• La dorsale kabyle ou chaine calcaire.	33
• La Dorsale interne.	33
• La Dorsale médiane.....	34
• de la dorsale médiane.	34
b. Le domaine des flyschs.	34
• Les flyschs mauritaniens.	34
• Les flyschs massyliens	35
• Le Cénomaniens.	35
• Le Crétacé.....	35
c. Les zones externes :.....	36
• Les séries péni-telliennes et les unités méridionales a Nummulites.....	36
d. L'avant- pays allochtone	37
• L'organisation Sétifienne.	37
• L'organisation constantinoise.....	37
Les séries néritiques Constantinoises.....	37
e. L'avant pays autochtones.	38
4.2. Géologie locale.....	38
• Les flyschs du flanc du Sud du Djurdjura.	38
• Les flyschs inférieurs.	39
• Les flyschs supérieur.....	39

a. Le Miocène.....	39
b. Le Quaternaire.....	39
c. Tectonique	40
5. Réseau Hydrographique	41
6. Sismicité.....	41
7. Morphologie.....	42
8. Conclusion.....	43
Chapitre III.....	44
Base de données utilisé dans le modèle	44
Introduction.....	45
1.Zone d'étude.....	45
2.Construction de la carte d'inventaire.....	46
3.Facteurs de prédisposition du glissement de terrain	49
a. Pente.	50
b. Altitude.....	50
c. L'exposition des versants	51
d. Proximités aux réseaux hydrographiques	52
e. la courbure de plan	54
f. La courbure de profil	54
g. Proximité aux routes	56
4.Conclusion.....	57
Chapitre IV.....	58
Modélisation de la susceptibilité aux glissements Via AHP	58
Introduction.....	59
1.Analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain.....	59
1.1 Analyse Multicritère Hiérarchique AHP	59
Degrés d'importance de chaque caractéristique.....	61

Définition	61
Explication	61
2.2 Attribution de poids.....	62
2.Résultats et discussion	64
4. Validation du modèle.....	66
Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	71
Références Bibliographiques.....	72
Annexes.....	95
Glossaire.....	99

Acronymes

AHP : Analyse Multicritère Hiérarchique.

RC : Le ratio de cohérence.

CA : Indice de cohérence aléatoire.

IC: l'indice de coherence.

OLSI: Overall Landslide Susceptibly Index.

MNT : Modèle Numérique du Terrain.

SIG : Système D'information Géographique.

IA : d'intelligence artificielle.

WOE: Weights of Evidence .

LSA: Landslide Susceptibility Analysis

Liste des figures

Figure 1 Glissement plan (Durville,J. Gilles,S. 2000).	6
Figure 2 Glissement rotationnel complexe (Gilles,S. Pierre, P.1998).	7
Figure 3 Types d'écroulement (Philippe,R. 1988).	8
Figure 4 Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain (Aissa, M.2011).	11
Figure 5 Landslide suceptibility and hazard zonation techniques.....	13
Figure 6 Daïras de la wilaya bouira	24
Figure 7 Carte montrant la situation de la wilaya de bouira.	24
Figure 8 Variation des moyennes mensuelles des précipitations 2007-2019. www.infoclimat.fr).....	26
Figure 9 Pluviometrie mensuelle moyenne (www.infoclimat.fr).	27
Figure 10 Repartitionnc saisonniere.....	27
Figure 11 Temperature moyenne maximale et minimal (www.infoclimat.fr).....	28
Figure 12 Vitesse moyenne du vent (www.infoclimat.fr).....	29
Figure 13 Direction de vent (www.infoclimat.fr)	30
Figure 14 Carte structurale schématique de la chaîne Magrébide montrant la disposition des zones internes et externes, et coupe simplifiée sur la transversale de la et de la petite grande Kabylie. (D.BELHAI, 1996).	32
Figure 15 Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (d'après Delga, 1969).	32
Figure 16 Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides.	35
Figure 17 Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien.....	37
Figure 18 La relations structurale : Néritique / Sellaoua (Chadi et al. 1999).	38
Figure 19 La wilaya de Bouira appartient d'après la carte de zonage sismique (RPA, 2003) à la Zone IIa à sismicité moyenne.	42
Figure 20 Carte de localisation de la zone d'étude.	46
Figure 21 Exemple d'un glissement dans notre zone d'étude.	47
Figure 22 Exemple d'un glissement dans notre zone d'étude.	48
Figure 23 Carte d'inventaire du glissement de la zone d'étude.	49
Figure 24 Carte des pentes de la zone d'étude.	50
Figure 25 Carte d'altitude.	51

Figure 26 Aspect des pentes.....	52
Figure 27 Proximités aux réseaux hydrographiques.	53
Figure 28 la courbure de plan.....	54
Figure 29 La courbure de profil.	55
Figure 30 Proximité aux routes.	56
Figure 31 Organigramme détaillé de la procédure de cartographie.	63
Figure 32 Carte de susceptibilité de la zone d'étude.....	66
Figure 33 glissement de terrain dans la partie de susceptibilité très élevée de la zone d'étud.	67
Figure 34 glissement de terrain dans la partie de susceptibilité très élevée de la zone d'étud.	68

Liste des Tableaux

Tableau 1 Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain.	9
Tableau 2 Échelle de préférence entre deux paramètres dans AHP (Saaty 1977).	15
Tableau 3 Zoning sismique de l'Algerie (RPA, versi en 2003).	42
Tableau 4 Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre.	60
Tableau 5 Échelle proposée par SAATY (1991).	61
Tableau 6 Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice.	62
Tableau 7 Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés.	64
Tableau 8 Subdivision des différentes classes de risque d'érosion.	65

Introduction générale

Introduction générale

Les glissements de terrain sont plus répandus que tout autre événement géologique et peuvent se produire n'importe où dans le monde. Ils se produisent lorsque de grandes masses de sol, de roches ou de débris descendent une pente en raison d'un phénomène naturel ou d'une activité humaine. Les coulées de boue ou les coulées de débris sont également un type courant de glissement de terrain rapide. Entre 1998 et 2017, les glissements de terrain ont touché environ 4,8 millions de personnes et causé plus de **18 000** décès.

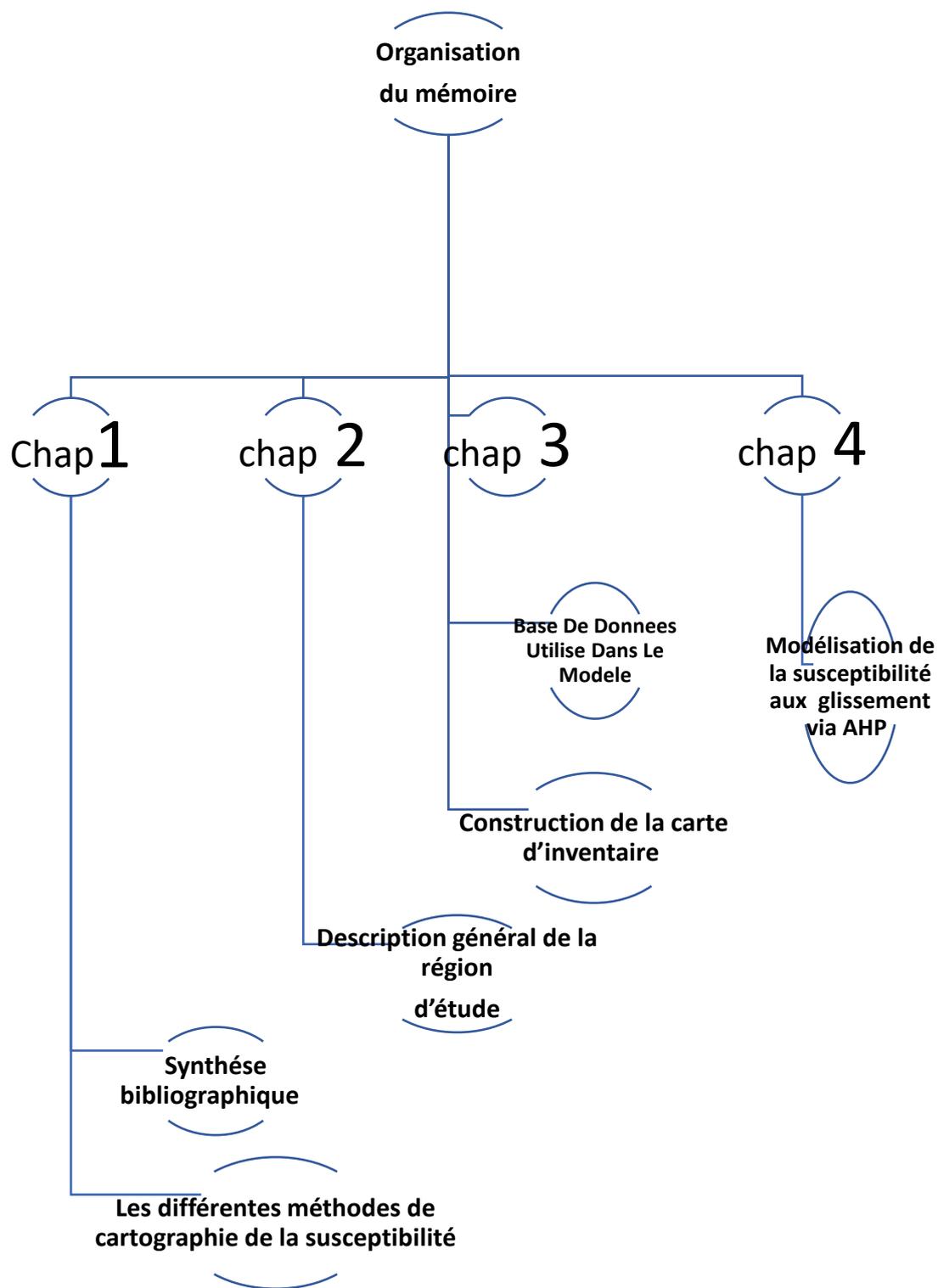
Les glissements de terrain causent des milliards de dollars de dommages aux infrastructures et des milliers de morts chaque année dans le monde. Les glissements de terrain peuvent causer des tonnes de dommages, dont certains peuvent entraîner des blessures réelles, notamment : l'eau et les débris en mouvement rapide peuvent entraîner des traumatismes ; Conduites électriques, d'eau, de gaz et d'égout cassées pouvant entraîner des blessures ou des maladies , il y a eu de nombreux glissements de terrain au fil des ans, y compris le glissement de terrain de Rio de Janeiro en 2011 qui a causé plus de **600** décès , aussi l'éruption du mont St. Helens en mai 1980 a provoqué le plus grand glissement de terrain de l'histoire. Une avalanche de débris d'éboulement suffisamment importante pour remplir **250** millions de camions à benne basculante à ras bord a parcouru environ 14 milles, détruisant, entre autres, neuf ponts routiers. Les conséquences de l'action d'un aléa sur les enjeux sont fonction des éléments exposés et de leur vulnérabilité, qui est le plus fréquemment exprimée en termes de valeur ou de degré de dégâts (Glade, 2003).

Afin d'évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers, plusieurs approches et techniques ont été proposées. Il s'agit notamment des inventaires des glissements de terrain, du zonage heuristique du terrain et de la vulnérabilité, des méthodes statistiques, des méthodes déterministes, des méthodes probabilistes, etc. (Reichenbach et al., 2018; Corominas et al., 2014; Raghuvanshi et al. 2014a; Negassa et Kala 2015; Kanungo et al., 2006; Aleotti et Chowdhury 1999; Guzzetti et al., 1999). D'une manière générale, toutes ces techniques ou approches peuvent être classées en approches qualitatives et quantitatives Les approches qualitatives comprennent l'analyse ou l'inventaire de la distribution, l'analyse géomorphique et les techniques d'évaluation expertes (heuristiques) qui sont basées sur les

connaissances et l'expérience de l'évaluateur (Corominas et al. 2014; Raghuvanshi et al., 2014). Les approches quantitatives comprennent principalement des techniques statistiques, déterministes, probabilistes et sans distribution (Raghuvanshi et al., 2014a; Kanungo et al., 2006). Plusieurs méthodes d'experts ont été appliquées pour l'évaluation de la vulnérabilité environnementale. L'un des outils les plus importants est la combinaison d'une méthode de processus de hiérarchie analytique (AHP) (Saaty, 1980) avec une plate-forme de système d'information géographique (SIG).

Le but de cette étude est de fournir et d'appliquer une approche semi-quantitative pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain en appliquant une méthode multiparamétrique qui est la méthode AHP, qui est utilisée pour évaluer la Susceptibilité aux risques de glissement de terrain et la cartographie de la zonation des dangers. Il s'agit d'une approche systématique qui implique la définition des problèmes, la détermination des objectifs et des solutions de rechange initialement développée par Saaty, (1980).

Organisation du mémoire



Chapitre I

Synthèse bibliographique

1. Introduction :

Les problèmes de stabilité de pente constituent l'un des phénomènes considérés souvent comme étant des risques naturels déclenchés et réactivés par la seule force de la nature (propriété des sols, l'angle de la pente, la présence d'eau, ...). Cependant, l'action humaine est souvent prépondérante dans ce type d'aléas et constitue l'un des facteurs déclenchant les plus répandus des instabilités. Et d'autre fois avec l'intervention des deux causes (nature et humaine). Ces instabilités, provoquent d'importants dégâts : ils affectent les versants naturels ainsi que des talus créés de façon artificielle, et constituent une menace pour les infrastructures ou les zones habitées, puisque la construction de nombreuses infrastructures nécessite la mise en place de talus.

Dans ce chapitre nous allons donner une généralité sur les glissements de terrain et les méthodes de cartographie de la susceptibilité.

2. Les glissements de terrain :

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant. Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissement :

- Glissement Plan, le long d'une surface plane
- Glissement Circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe
- Glissement Quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types (Philippe, R. 1988).

2.1 Glissement plan :

Ils se manifestent lorsqu'il existe une surface topographique pouvant guider une rupture plane: telle qu'une couche mince de caractéristiques médiocres sur un substratum, Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Philippe, R. 1988).

-Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (Saturation Du Matériau, Augmentation De Pressions Interstitielles....) ;
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosions des berges) ;
- Les séismes (Gilles, S. Pierre, P.1998).

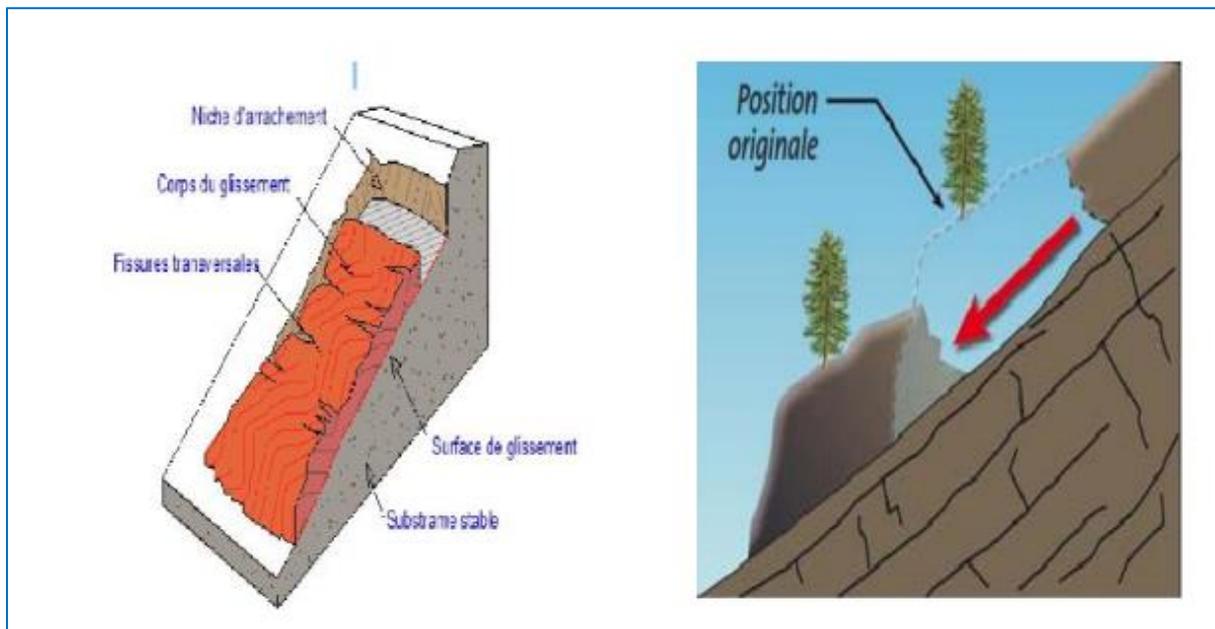


Fig. 1 Glissement plan (Durville, J. Gilles, S. 2000).

2.2 Glissement rotationnel ou circulaire :

Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée le long d'une "surface de rupture" dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblai sur sols mous et de déblai en sols homogènes. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

2.3 Glissements complexe :

Lorsque le sol est hétérogène ou anisotrope il peut y avoir formation de glissements "complexes" dont certaines parties correspondent à des mouvements rotationnels et d'autres à des mouvements plans. C'est le cas, en particulier, des remblais sur versants. Les volumes des

masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Philippe,R. 1988).

-Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles....)
- Les terrassements
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosion des berges)
- Les séismes (Gilles,S. Pierre, P.1998).

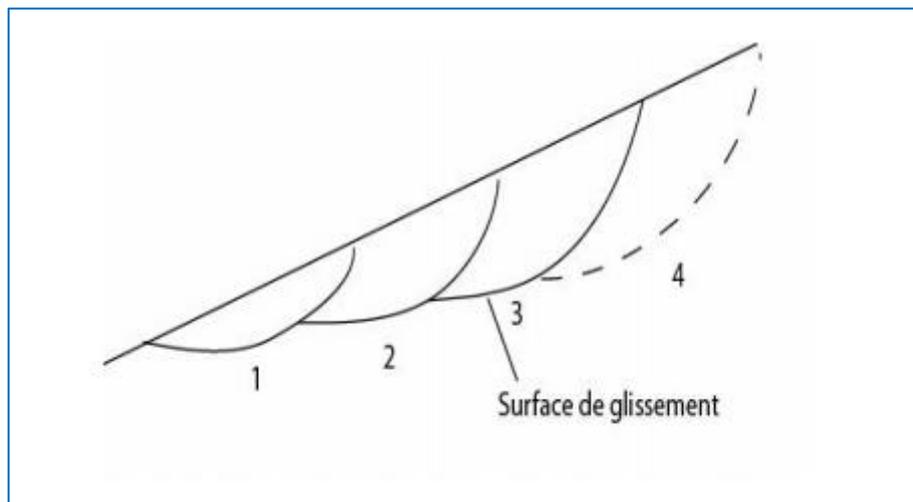


Fig. 2 Glissement rotationnel complexe (Gilles,S. Pierre, P.1998).

- **Les écroulements et chutes de blocs**

Ce sont des chutes brutales et soudaines de masses rocheuses importantes, qui durent quelques secondes et dont les causes peuvent être internes au massif.

- Dislocation d'une masse rocheuse par altération interne
- Glissement banc sur banc d'une masse rocheuse stratifiée
- Ecroulement de masses mises en surplomb par érosion ou dislocation de couches tendres sous-jacentes

- Ecoulement par fluage ou glissement d'une couche sous-jacente Les volumes de sol mis en jeu varient entre une dizaine de milliers de mètres cubes (écroulement en masse) et une centaine de mètres cubes (chutes de blocs). (Philippe,R. 1988).

-Principaux facteurs déclenchant

- Les apports d'eau
- Les cycles gel-dégel
- L'altération
- L'érosion
- Les séismes (www.geotech-fr.org/sites/default/files/congres/jngg/184.pdf).

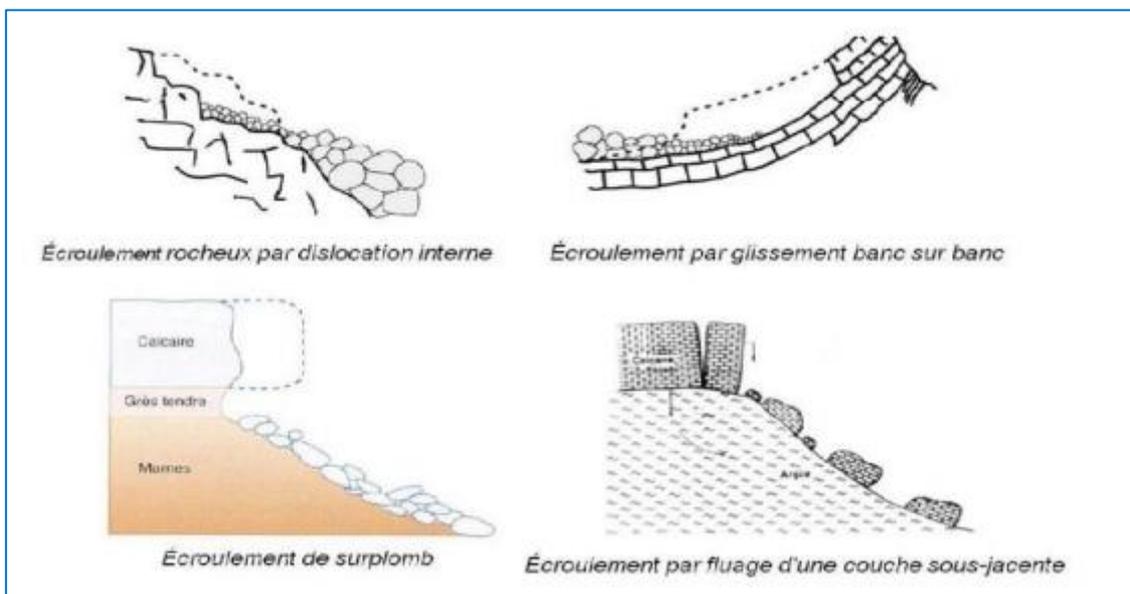


Fig. 3 Types d'écroulement (Philippe,R. 1988).

- **Le fluage:**

Le fluage est caractérisé par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles. Dans le cas de fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement au glissement) : en fait le matériau est sollicité à un état proche de la rupture (Gilles,S. Pierre, P.1998)

- **Les coulées et laves torrentielles:**

Ce sont des mouvements fluides de suspensions de matériaux de granulométrie variable. Les mouvements se produisent lorsque la matrice fine atteint une teneur en eau très élevée qui la liquéfie. Les volumes déplacés se chiffrent en dizaines de milliers de mètres cubes. -

Principaux facteurs déclenchant

- La disponibilité d'importantes quantités d'eau.
- Fortes précipitations.
- Rupture des digues.
- Rupture des barrages.

Tab. 1 *Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain.*

Terrain		Vitesse moyenne	volume	Facteurs déclenchant
Glissement	Sols massifs fracturés	très lente à moyenne	de quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	eau, terrassements
Fluage	Formations meubles	très lente	de quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	chargement, évolution du matériau
Ecrolement	massifs rocheux	de très lente à très rapide	de quelques m ³ à plus de dix mille m ³	eau, gel dégel, séisme
Coulée	sols argileux et limoneux lâches	très rapide	de dix à plusieurs centaines de milliers de m ³	très fortes pluies, rupture de digues

3. Principales causes des glissements :

Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- La nature des terrains :

La nature de terrains dépend de la :

- Géométrie de terrains
- Résistance au cisaillement des sols ou des roches.

- L'action de l'eau : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.

-Les actions climatiques : Les facteurs climatiques prépondérants sont constitués par les apports d'eau. Les autres actions externes, susceptibles de modifier l'état d'équilibre d'un versant, résultent principalement de modifications de géométrie, de chargements et de déchargements.

- Les causes mécaniques externes : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus, toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ...).

-Construction sur pente : La construction de remblais sur pente naturelle diminue de l'ensemble pente et remblai (Martin.2008).

4. Indices et phénomènes induits par les glissements :

Indices caractéristiques d'activité d'un glissement : niche d'arrachement, fissures, bourrelets, arbres basculés, zone de rétention d'eau, fissuration des bâtiments, déformation des routes, etc. phénomènes aggravants induits par les glissements de terrain:

- formation d'embâcles sur les cours d'eau

- laves torrentielles suite à l'apport de matériaux dans les cours d'eau

-coulées de boue à partir des bourrelets de pieds formés de matériaux remaniés.

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables : des périodes de vitesse de glissement plus élevée avec des phases de calme apparent.

• Glissements de terrains actifs :

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toutefois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des vitesses plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec des phases successives d'accélération.

• Glissements de terrains réactivés :

Désignent les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante.

• Glissements de terrains inactifs :

Désignent les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années. Ceux-ci se subdivisent en quatre catégories :

- Glissements bloqués.
- Glissements latents.
- Glissements abandonnés.
- Glissements stabilisés. (Aissa,M. 2011).

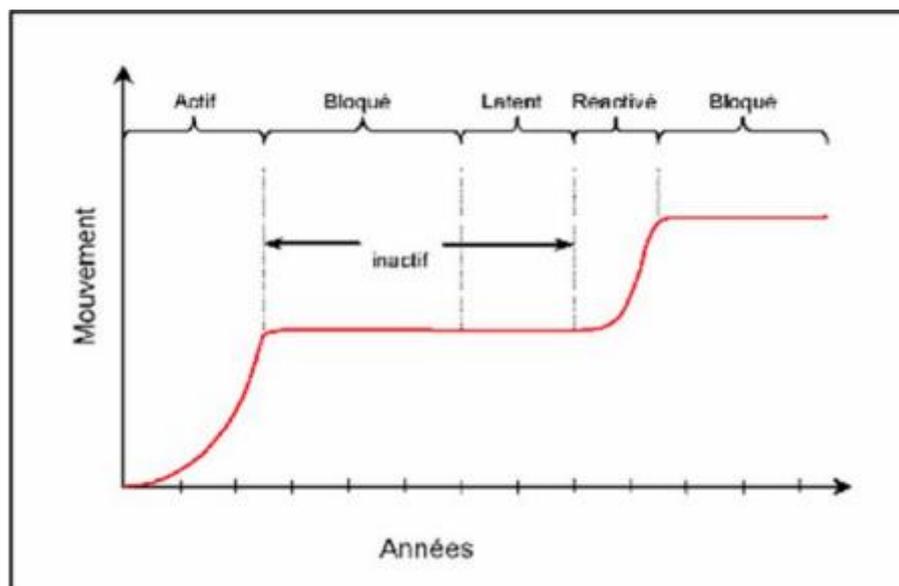


Fig. 4 : Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain (Aissa, M.2011).

1. Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité :

Afin d'évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers, plusieurs approches et techniques ont été proposées. Il s'agit notamment des inventaires des glissements de terrain, du zonage heuristique du terrain et de la vulnérabilité, des méthodes statistiques, des méthodes déterministes, des méthodes probabilistes, etc. (Reichenbach et al., 2018; Corominas et al., 2014; Raghuvanshi et al. 2014; Negassa et Kala 2015; Kanungo et al., 2006; Aleotti et Chowdhury 1999; Guzzetti et al., 1999). D'une manière générale, toutes ces techniques ou approches peuvent être classées en approches qualitatives et quantitatives (fig. 1). Les approches qualitatives comprennent l'analyse ou l'inventaire de la distribution, l'analyse géomorphique et les techniques d'évaluation expertes (heuristiques) qui sont basées sur les connaissances et l'expérience de l'évaluateur (Corominas et al. 2014; Raghuvanshi et al., 2014a). Les approches quantitatives comprennent principalement des techniques statistiques, déterministes, probabilistes et sans distribution (Raghuvanshi et al., 2014; Kanungo et al., 2006). Les approches qualitatives sont considérées comme subjectives (Girma et al., 2015; Raghuvanshi et al. 2014a; Kanungo et al., 2006; Automne et al., 2006; Casagli et al., 2004) considérant que les approches quantitatives sont considérées comme objectives par nature (Girma et al., 2015; Automne et al., 2006). Ces derniers temps, des approches quantitatives ont été largement utilisées pour la Susceptibilité aux glissements de terrain et l'évaluation des dangers.

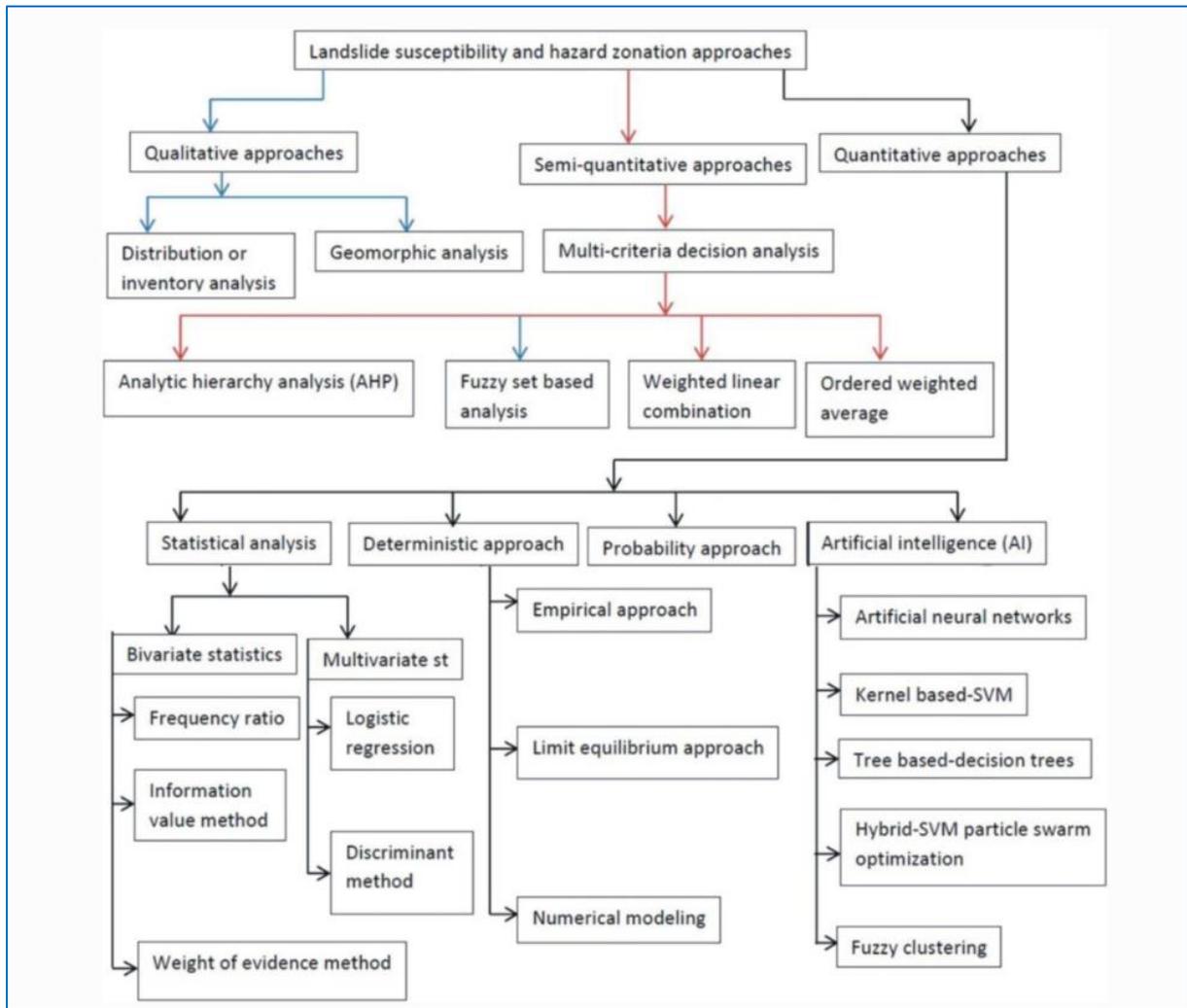


Fig. 5 Landslide suceptibility and hazard zonation techniques.

1.1. Approches semi-quantitatives :

1.1.1. Méthodes d’analyse multicritiques :

Ces méthodes sont des approches semi-quantitatives qui sont principalement utilisées pour l’évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain (Abija et al. 2020; Erenner et al., 2016; Ahmed 2015; Feizizadeh et al. 2014; Kavzoglu et al., 2013; Feizizadeh et Blaschke 2012; Gorsevski et Jankowski, 2010) et les études de zonage des dangers (Bera et al., 2019). Les méthodes qui sont catégorisées dans l’analyse multicritères sont le Processus De Hiérarchie Analytique (AHP), l’analyse basée sur des ensembles flous, la combinaison linéaire pondérée et la moyenne pondérée ordonnée (Bera et al. 2019; Ahmed 2015; Feizizadeh et Blaschke, 2012). Récemment, pour minimiser la subjectivité pendant les facteurs pondérant

des approches logiques floues sont également utilisés. Certains sous-groupes susmentionnés de méthodes de décision multicritiques sont examinés dans les paragraphes suivants. Il s'agit de l'AHP, le concept de logique floue et de la méthode de superposition pondérée.

a. Approche de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) :

L'AHP est une approche de prise de décision multicritique qui est utilisée pour évaluer la Susceptibilité aux risques de glissement de terrain et la cartographie de la zonation des dangers. Il s'agit d'une approche systématique qui implique la définition des problèmes, la détermination des objectifs et des solutions de rechange, la formulation d'une matrice de comparaison par paires, la détermination du poids et la recherche d'une priorité globale (Pardeshi et al. 2013; Saaty, 2008). Le glissement de terrain est un processus complexe qui résulte de la combinaison de divers facteurs causatifs (Raghuvanshi, 2019; Chimidi et al., 2017). L'approche AHP peut être appliquée en valeur absolue ou relative de la relation entre les facteurs causatifs et les glissements de terrain. En mesure absolue, chaque alternative est comparée à une alternative idéale tandis que, dans la mesure relative, chaque alternative est comparée à de nombreuses autres alternatives. L'approche de mesure absolue est normative et est conditionnée par ce qui est connu pour être le meilleur. En revanche, l'approche de mesure relative est conditionnée par l'expérience et la capacité de juger les observations d'un évaluateur, de ce fait, elle est de nature descriptive (Pardeshi et al. 2013; Saaty et Vargas, 2006; Saaty, 2008). Chacun des facteurs de causalité du glissement de terrain peut être considéré comme une alternative. De plus, ces facteurs causatifs sont attribués avec des nombres absolus (1 à 9) en fonction de leur importance relative dans l'induction de l'instabilité de la pente (Yagi, 2003). Ainsi, des matrices de comparaison sont élaborées pour déterminer le ratio de cohérence (RC) et l'indice de cohérence (IC) (Pardeshi et al., 2013).

Tab. 2 Échelle de préférence entre deux paramètres dans AHP (Saaty 1977).

Degrés d'importance	Définition	Explication
1	Également	Deux facteurs contribuent également à l'objectif
3	Modérément	L'expérience et le jugement favorisent légèrement un facteur par rapport à un autre.
5	Fortement	L'expérience et le jugement favorisent fortement ou essentiellement un facteur par rapport à un autre
7	Très fortement	Un facteur est fortement favorisé par rapport à un autre et sa domination est démontrée dans la pratique
9	Extrêmement	La preuve de favoriser un facteur par rapport à un autre est du plus haut degré possible d'une affirmation.
2, 4,6	Intermédiaire	Utilisé pour représenter les compromis entre les préférences dans les poids 1, 3, 5, 7 et 9.
Réciproques	Opposés	Utilisé pour la comparaison inverse.

b. Méthode de superposition pondérée :

La méthode de recouvrement pondéré est une méthode simple et directe qui peut être utilisée pour l'évaluation du risque de glissement de terrain dans la zone donnée (Ayele et al., 2014; Erenner et Duzgun 2012; Bachri et Shresta 2010; Intarawichian et Dasananda, 2010). Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les conditions qui ont entraîné les glissements de terrain passés si se reproduire à l'avenir dans d'autres zones, encore une fois des glissements de terrain peuvent se produire. Dans la méthode de superposition pondérée, pour chaque couche de facteur causal considérée, chaque cellule est reclassée en fonction de l'échelle préférée en fonction de l'importance par rapport à la contribution que la classe de facteurs particulière peut avoir sur l'occurrence d'un glissement de terrain. Cette échelle préférée est généralement prise de 1 à 9, 9 étant la plus importante par rapport à l'événement de glissement de terrain. Ainsi, toutes les couches de facteurs causatifs sont combinées dans un environnement SIG à l'aide de l'équation du modèle de superposition pondérée. En outre, des poids respectifs sont également attribués aux facteurs causatifs sur une échelle ordinale de 0 à 9. Les nombres numériques attribués à la classe de facteurs sont appelés cotes et les nombres

attribués aux facteurs causals respectifs sont connus sous le nom de poids (Kanungo et al., 2006; Lee et al., 2004). Le poids ou la cote plus élevé d'un facteur causal ou de sa classe respective représente sa plus grande importance pour l'occurrence d'un glissement de terrain (Ayele et al., 2014)

$$s = \frac{\sum W_{J_e} S_{ij}}{\sum W_{J_e}}$$

Où; J_e est le poids de la 1ère carte de facteurs, ' S_{ij} ' est le poids de la classe spatiale de la carte factorielle 'jth', ' S ' est la valeur de l'unité spatiale dans la carte en sortie.

c. Méthode logique floue :

Les processus, événements ou fonctions qui changent continuellement peuvent éventuellement ne pas être définis en termes d'événements vrais ou faux, ainsi ces événements ou activités sont exprimées de manière floue. Les choses qui sont vagues ou non claires sont connues comme floues. La logique floue est considérée comme un sur-ensemble de logique booléenne qui est une extension pour traiter les valeurs de vérité partielles qui sont complètement fausses ou complètement vraies (Lee 2007; Chacón et al., 2006; Gorsevski et al., 2003). La méthode de la logique floue est appliquée dans les études de glissement de terrain pour éviter la subjectivité en raison de la sélection de divers facteurs causatifs multiples (Meten et al. 2015; Chacón et al., 2006; Zadeh, 1978). La méthode de la logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous dans laquelle les degrés d'appartenance des éléments peuvent avoir différents degrés de confiance dans un intervalle de [0, 1] (Ross 2010; Lee 2007; Kanungo et al., 2006). Il existe divers opérateurs flous qui peuvent être utilisés, ceux-ci sont; 'flou ou', 'flou et', 'produit algébrique flou', 'somme algébrique floue' et 'opérateur gamma'.

$$\mu_{Combination} = \text{Min} (\mu_{un} \mu_B, \mu_C \text{ Il y a un. } \text{http://www.unece})$$

1.2. Approches quantitatives :

1.2.1. Approches statistiques :

Les approches statistiques sont les méthodes les plus couramment utilisées pour la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers Des examens sur diverses méthodes mises au point dans le cadre d'évaluations et de développements antérieurs et ultérieurs de méthodes ont été présentés par Reichenbach et al.(2018), Corominas et al.(2014)

et Fell et al.(2008). Certaines des techniques, qui ont été développées plus tôt, ont été abandonnées, certaines méthodes ont été modifiées et de nouvelles techniques sont toujours en cours de développement (Ayalew et Yamagishi 2005). Un examen approfondi de la littérature effectué au cours des présents travaux a révélé que les techniques statistiques qui ont été utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage par les chercheurs précédents peuvent être classées de manière générale dans; Approches statistiques bivariées et multivariées.

a. Approche statistique bivariée :

L'approche statistique bivariée est basée sur une logique inductive, qui suggère que si une situation tient dans tous les cas observés que la situation tiennent dans tous les cas. Ainsi, ces techniques sont fondées sur l'hypothèse générale que « le passé et le présent sont la clé de l'avenir » (Dai et Lee, 2001). Pour les études sur les glissements de terrain, on suppose généralement que la combinaison de conditions relatives à divers facteurs causatifs peut éventuellement conduire à un glissement de terrain dans une zone donnée

1-Méthode d'analyse fréquentielle (rapport de vraisemblance) :

Parmi les approches statistiques bivariées L'analyse de fréquence est la méthode la plus couramment utilisée (Chimidi et al. 2017; Hamza et Raghuvanshi 2017; Girma et al., 2015; Lee et Min, 2001). Cette méthode utilise la corrélation entre chacune des classes de facteurs responsables et la distribution spatiale des glissements de terrain passés dans la région (Chimidi et al., 2017; Girma et al., 2015; Moung-Jin et al. 2014; Akgun et al., 2012; Pradhan et Lee 2009; Lee, 2005). La méthode d'analyse de fréquence est basée sur le rapport entre les glissements de terrain dans une classe de facteurs en pourcentage des glissements de terrain et la surface de la classe de facteurs en pourcentage de la zone entière.

2-Méthode du « Weights of Evidence » poids de la preuve (WOE) :

La méthode du poids de la preuve (**WOE**) est largement utilisée pour la prévision des zones potentiellement sensibles aux glissements de terrain (Süzen et Doyuran, 2004; Van Westen et al., 2003; Van Westen, 1993). Cette méthode est utilisée pour combiner l'ensemble de données des glissements de terrain au moyen d'une approche quantitative axée sur les données. Avec la méthode **WOE** probabilité préalable (Prior), Probabilités conditionnelles (Cond) et les poids négatifs et positifs de la vulnérabilité aux glissements de terrain peuvent être calculés. Pour 'Prior_p' la densité de glissement de terrain doit être calculée comme le

nombre total de pixels dans la zone couverte par les glissements de terrain par rapport au nombre total de pixels dans la zone étudiée. Avant peut être exprimé en

$$prior_p = p\{s\} = \frac{N_{pix}(sli iDe)}{N_{pix}(total)}$$

Où, 'ln' est le log naturel, 'P' est la probabilité, 'Bi' est la présence d'un facteur causal prédictif potentiel de glissement de terrain 'S' est la présence d'un

b. Approche statistique multivariée :

La vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers au moyen d'une approche statistique multivariée sont fondés sur la relation entre la contribution relative de chacun des facteurs causatifs et la vulnérabilité totale aux glissements de terrain dans la région (Nandi et Shakoor, 2009; Kanungo et al., 2009; Ayalew et Yamagishi 2005; Süzen et Doyuran 2004; Dai et al., 2001). Dans les méthodes multivariées d'analyse de la Susceptibilité aux glissements de terrain, le pourcentage de glissements de terrain pour chaque pixel est déterminé et la couche de données sur la présence ou l'absence de glissements de terrain est développée par analyse statistique. Les méthodes statistiques multivariées couramment utilisées pour la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers sont les suivantes: Modèle de régression logistique, modèles de régression multiple et analyse discriminante (Kanungo et al., 2006; Guzzetti et al., 1999; Chung et Fabbri 1995; Van Westen 1993; van Westen 1994; Yin et Yan, 1988). Glissement de terrain

1.2.2. Méthodes d'intelligence artificielle (IA) :

La méthode de l'intelligence artificielle (IA) utilise certains des concepts statistiques. Cependant, ces méthodes sont basées sur des hypothèses, des algorithmes prédéterminés et des résultats. Les méthodes d'IA conviennent lorsqu'une relation mathématique directe ne peut être établie entre la cause et l'effet Il existe un certain nombre de méthodes d'IA ou de méthodes d'apprentissage automatique (Kavzoglu et al., 2018) qui peuvent être utilisées pour les études sur les glissements de terrain. Ceux-ci peuvent être classés comme ; réseaux neuronaux artificiels (ANN), méthodes basées sur le flou, hybrides, basées sur le noyau et basées sur l'arbre (arbre de décision). En outre, il existe un certain nombre de sous-méthodes

sous chaque catégorie, pour instantané, ann-adaptive neuro-fuzzy système d'inférence, réseau neuronal de rétro-propagation, etc.

1.2.3. Approche probabiliste :

Afin d'évaluer la Susceptibilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers, le degré de relation entre la distribution passée des glissements de terrain et les facteurs causatifs est converti en une valeur basée sur une fonction de distribution de probabilité. L'approche probabiliste aide à prédire la probabilité de distribution spatiale et temporelle des glissements de terrain dans la zone donnée (Lari et al., 2014; Guzzetti et al., 2005b). L'approche probabiliste utilise la comparaison de la distribution spatiale des glissements de terrain avec les facteurs causatifs considérés (variables explicatives) dans un cadre de théorie probabiliste (Lari et al. 2014; Kanungo et al., 2009; Straub et Schubert, 2008). L'approche probabiliste, bien que considérée comme quantitative, présente un certain degré de subjectivité dans l'attribution des poids à divers facteurs causatifs (Kanungo et al., 2006). Ainsi, l'approche probabiliste peut être considérée comme semi-quantitative.

1.2.4. Approche déterministe :

L'approche déterministe tient compte de l'évaluation des risques de glissement de terrain selon les lois mécaniques. Ces méthodes comprennent des méthodes empiriques (Raghuvanshi, 2019; Liu et Chen, 2007; Hack 1998; Anbalagan 1992; Romana 1985; Selby, 1980), méthodes cinématiques (Raghuvanshi, 2019; ZainAlabideen et Helal 2016; Karaman et al., 2013; Kulatilake et al., 2011; Goodman, 1989), modélisation statique des pentes infinies (Pack et al., 1998; Dietrich et al., 1995), modélisation dynamique des pentes infinies (Simoni et al., 2008; Baum et al., 2002), 2-D (Sharma et al., 1995; Hoek et Bray, 1981) et l'équilibre limite 3D et la modélisation numérique (Raghuvanshi, 2019; Tang et al., 2016; Karaman et al., 2013; GEO-PENTE 2011; Gitirana Jr. et al. 2008; Stead et al., 2006; Hungr et Rawlings, 1995). Les principaux facteurs qui sont pris en compte pour les techniques déterministes sont; la géométrie de la pente, les caractéristiques de discontinuité et sa relation avec la pente, l'état des eaux souterraines et le drainage de surface.

1.3. Approches qualitatives :

Techniques d'inventaire géomorphique et de glissement de terrain :

Les techniques géomorphiques sont les méthodes directes de cartographie de la vulnérabilité aux glissements de terrain et de la zonation des dangers. La plupart des données relatives aux divers facteurs responsables des glissements de terrain sont obtenues par télédétection et l'obtention de données provenant de travaux directs sur le terrain est rarement utilisée dans ces méthodes. La cartographie géomorphique de la susceptibilité des glissements de terrain est réalisée à l'moyen de photographies aériennes (Mandaglio et al. 2016; Kanungo et al., 2009; Guzzetti et al., 1999; Verstappen 1983) ou à partir d'images satellites (Nossin 1989). Ces méthodes sont le plus souvent, mais pas nécessairement, associées à la production d'une carte d'inventaire des glissements de terrain.

L'inventaire des glissements de terrain comprend la cartographie des glissements de terrain passés dans la région. Cette méthode comprend également l'alerte et l'enregistrement de données sur l'emplacement, le type et les dimensions des glissements de terrain. En outre, des données et des renseignements sur les facteurs responsables, le mécanisme de déclenchement et la fréquence des glissements de terrain sont également recueillis (Girma et al., 2015; Automne et al., 2006; Dai et al., 2002; Dai et Lee, 2001). La cartographie de l'inventaire des glissements de terrain est considérée comme simple et est requise pour la plupart des techniques de zonage de la vulnérabilité et des dangers (Dai et Lee, 2002), soit pour formuler les règles générales de la prévision des dangers, soit pour valider le modèle prédit. En général, ces techniques géomorphiques ne tiennent pas compte des facteurs qui ont initié ou déclenché les glissements de terrain. Les principaux facteurs pris en compte pour le zonage des risques de glissement de terrain sont la lithologie, la géomorphologie, l'utilisation des terres et la couverture des terres et la présence ou l'absence de glissements de terrain dans la région.

Conclusion

Les glissements des pentes sont des mouvements de masse dont la gravité est la principale force en jeu. Dans ce chapitre, ont été présentés la définition des glissements, leurs classifications, morphologie des glissements, nous allons aussi présentés la cinématique des mouvements de masse.

Pour une atténuation et une gestion adéquate des glissements de terrain, l'évaluation de la susceptibilité et le zonage des dangers sont très importants. Les glissements de terrain sont

influencés par plusieurs facteurs déclencheurs externes et causaux inhérents qui varient considérablement d'un endroit à l'autre. De plus, diverses approches utilisées pour les études d'évaluation des glissements de terrain peuvent être divisées en approches qualitatives et quantitatives. Les approches qualitatives comprennent l'analyse géomorphologique l'approche quantitative comprend les techniques statistiques et déterministes.

Chapitre II

Description générale de la région d'étude

1. Introduction :

La fréquence des glissements de terrain de type profond et rotationnel sur des versants façonnés entièrement dans des roches cohérentes (granites, gneiss, calcarénites), réputées peu favorables à ces mouvements de masse lorsqu'elles ne sont pas altérées, s'explique non seulement par l'état de fracturation de ces roches mais aussi par le contexte et l'évolution géomorphologiques : climat méditerranéen humide, association de grands versants et de topographies planes, régularisation des versants et raidissement de leur base par l'entaille récente du réseau hydrographique.

Ces glissements sont le point de départ d'un enchaînement de processus accentuation du glissement, évolution de la cicatrice d'arrachement par écroulement, éboulement et éboulisation, évacuation de la masse glissée par les eaux courantes qui aboutit à l'estompement du modelé issu des glissements profonds et à une nouvelle régularisation des versants.

2. Localisation géographique de la région d'étude :

La wilaya de Bouira est une wilaya algérienne située en Kabylie, caractérisée par un relief fortement accidenté, son chef-lieu est situé à une altitude de 525 m, au bas du piémont Sud-Ouest du Djurdjura dont le sommet le plus élevé est Lala-Khadija (2308 m).

La wilaya de Bouira est composée de 12 Dairas.

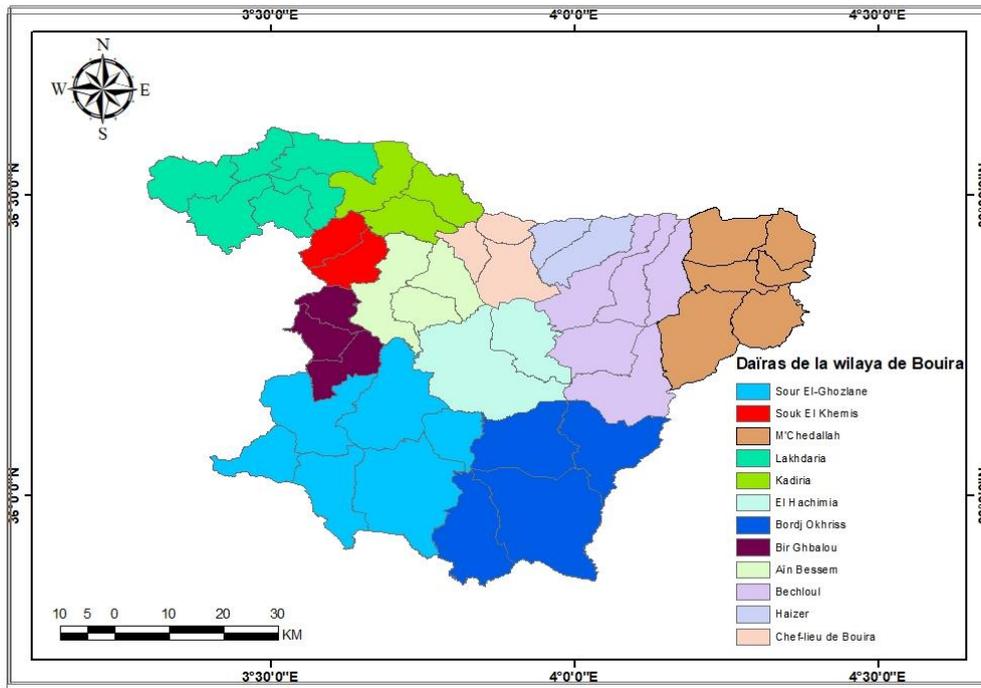


Fig. 6 Daïras de la wilaya bouira

La Wilaya est limitée Au Nord par les Wilaya de Boumerdes et Tizi-Ouzou Sud et Sud-Ouest par les Wilaya M'Sila et Médéa l'Est et Sud-Est par les wilayas de Bejaia et Bordj-Bouaréridj et l'Ouest par les Wilaya de Blida et Médéa.

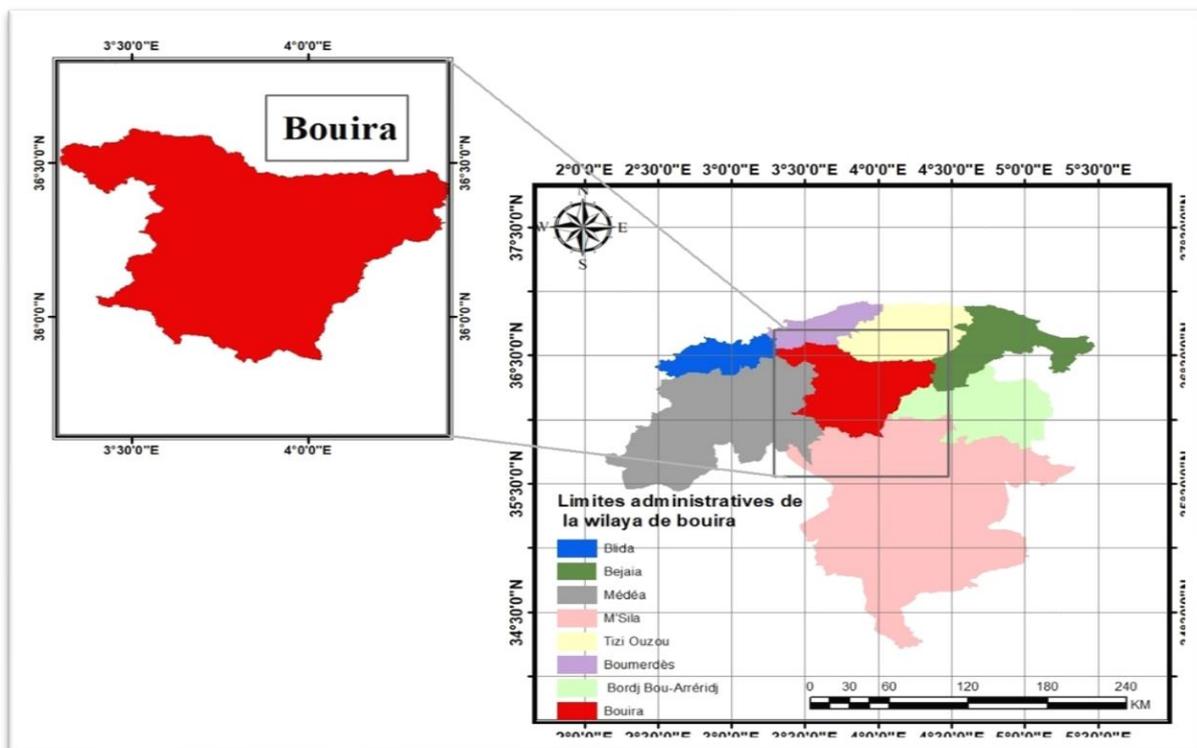


Fig. 7 Carte montrant la situation de la wilaya de bouira.

3. Climat :

Le climat est chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver. La pluviométrie moyenne est de **660 mm/an** au nord et de **400 mm/an** dans la partie sud. Les températures varient entre **20** et **40 °C** de mai à septembre et de **2** à **12 °C** de janvier à mars.

3.1. Précipitation :

La saison la plus humide dure, du 9 septembre au 28 mai, avec plus de **15%** de chances qu'un jour donné soit un jour humide. La probabilité d'une journée humide culmine à **28%** le 7 février.

La saison plus sèche dure, du 28 mai au 9 septembre. La plus petite chance d'une journée humide est de **3%** le 18 juillet.

Parmi les jours humides, nous distinguons ceux qui subissent la pluie seule, la neige seule, ou un mélange des deux. Sur la base de cette catégorisation, la forme la plus courante de précipitations tout au long de l'année est la pluie seule, avec une probabilité maximale de **27%** le 20 novembre.

3.1.1. Précipitation mensuelle et répartition saisonnière :

a. Les moyennes des précipitations mensuelles :

A jour de précipitation est un jour au cours duquel on observe une accumulation d'eau ou mesurée en eau d'au moins 1 millimètre. La probabilité de jours de précipitation à Bouïra varie au cours de l'année.

La saison connaissant le plus de précipitation dure, du 9 septembre au 28 mai, avec une probabilité de précipitation quotidienne supérieure à **15 %**. La probabilité de précipitation culmine à **28 %** le 7 février.

La saison la plus sèche dure, du 28 mai au 9 septembre. La probabilité de précipitation la plus basse est **3 %** le 18 juillet.

Pour les jours de précipitation, nous distinguons les jours avec pluie seulement, neige seulement ou un mélange des deux. En fonction de ce classement, la forme de précipitation la plus courante au cours de l'année est de la pluie seulement, avec une probabilité culminant à **27 %** le 20 novembre.



Fig. 8 Variation des moyennes mensuelles des précipitations 2007-2019. (www.infoclimat.fr).

Pour montrer la variation au cours des mois et pas seulement les totaux mensuels, nous montrons l'accumulation de pluie au cours d'une période glissante de 31 jours centrée sur chaque jour de l'année. Bouïra connaît des variations saisonnières considérables en ce qui concerne les précipitations de pluie mensuelles.

La période pluvieuse de l'année dure, du 22 août au 15 juin, avec une chute de pluie d'au moins **13** millimètres sur une période glissante de 31 jours. La plus grande accumulation de pluie a lieu au cours des 31 jours centrés aux alentours du 22 décembre, avec une accumulation totale moyenne de **69** millimètres.

La période sèche de l'année dure, du 15 juin au 22 août. La plus petite accumulation de pluie a lieu aux alentours du 21 juillet, avec une accumulation totale moyenne de **4** millimètres.

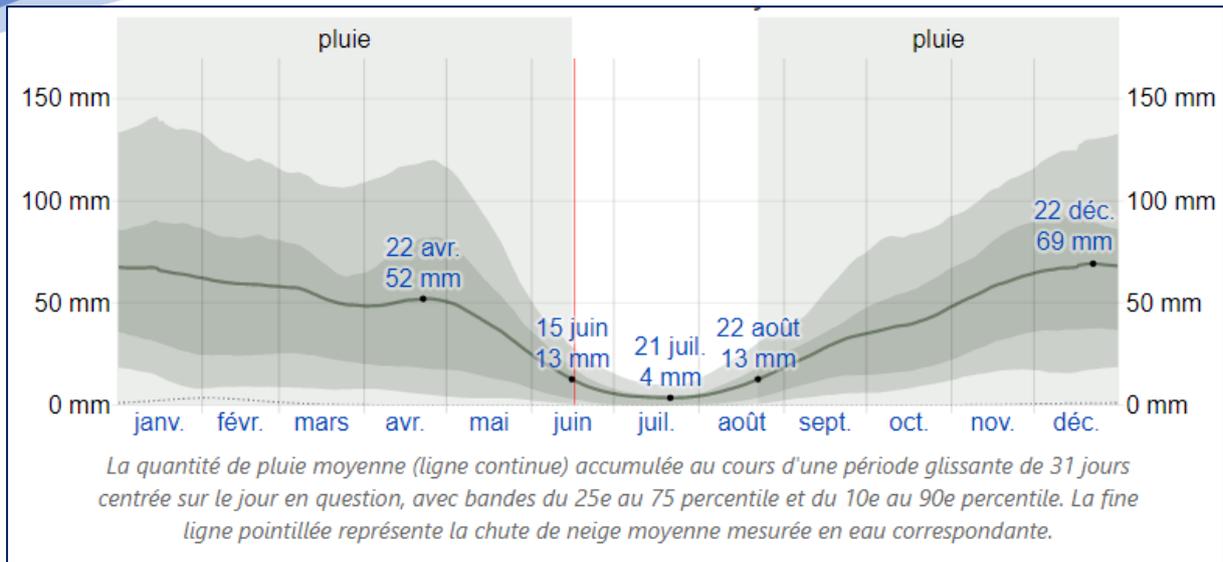


Fig. 9 Pluviométrie mensuelle moyenne (www.infoclimat.fr).

b. La répartition saisonnière :

Pour la répartition saisonnière, on adopte les saisons agricoles Automne (Septembre. Octobre. Novembre.), Hiver (Décembre. Janvier. Février.), Printemps (Mars. Avril. Mai.) Et l'Été (Juin. Juillet. Aout.)

A l'automne, la région d'étude reçoit **208.153 mm** soit **28%** du total de pluie moyenne annuelle. Pour l'hiver, la hauteur moyenne de pluie reçue est de **204.390 mm** et représente **37%** de pluie moyenne annuelle tombée. Le printemps les précipitations moyennes sont de l'ordre de **214.207 mm** soit **27%** du total de pluie moyenne annuelle.

- L'été est le moins arrosé, la pluviométrie totale annuelle représente **8%** **50.280 mm** du total enregistré durant l'année.

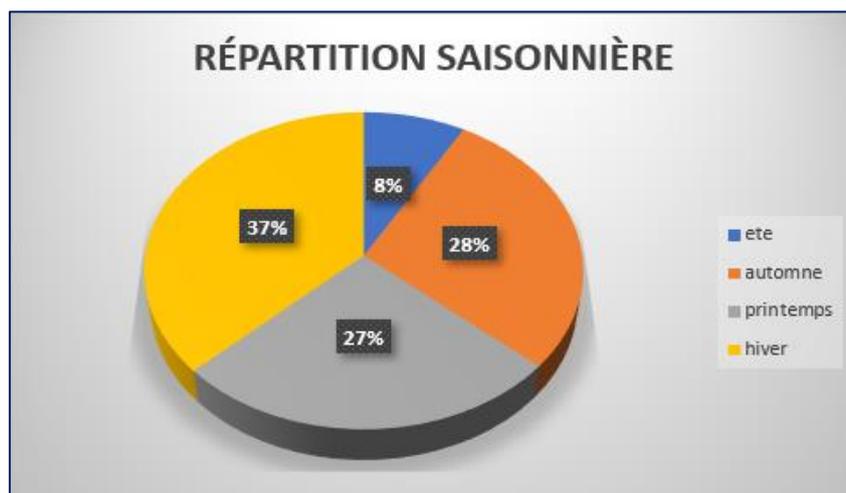


Fig. 10 Répartition saisonnière.

3.2. Température :

La saison très chaude dure, du 20 juin au 13 septembre, avec une température quotidienne moyenne maximale supérieure à **29 °C**. Le jour le plus chaud de l'année est le 5 août, avec une température moyenne maximale de **33 °C** et minimale de **17 °C**.

La saison fraîche dure, du 19 novembre au 19 mars, avec une température quotidienne moyenne maximale inférieure à **17 °C**. Le jour le plus froid de l'année est le 19 janvier, avec une température moyenne minimale de **0 °C** et maximale de **13 °C**.

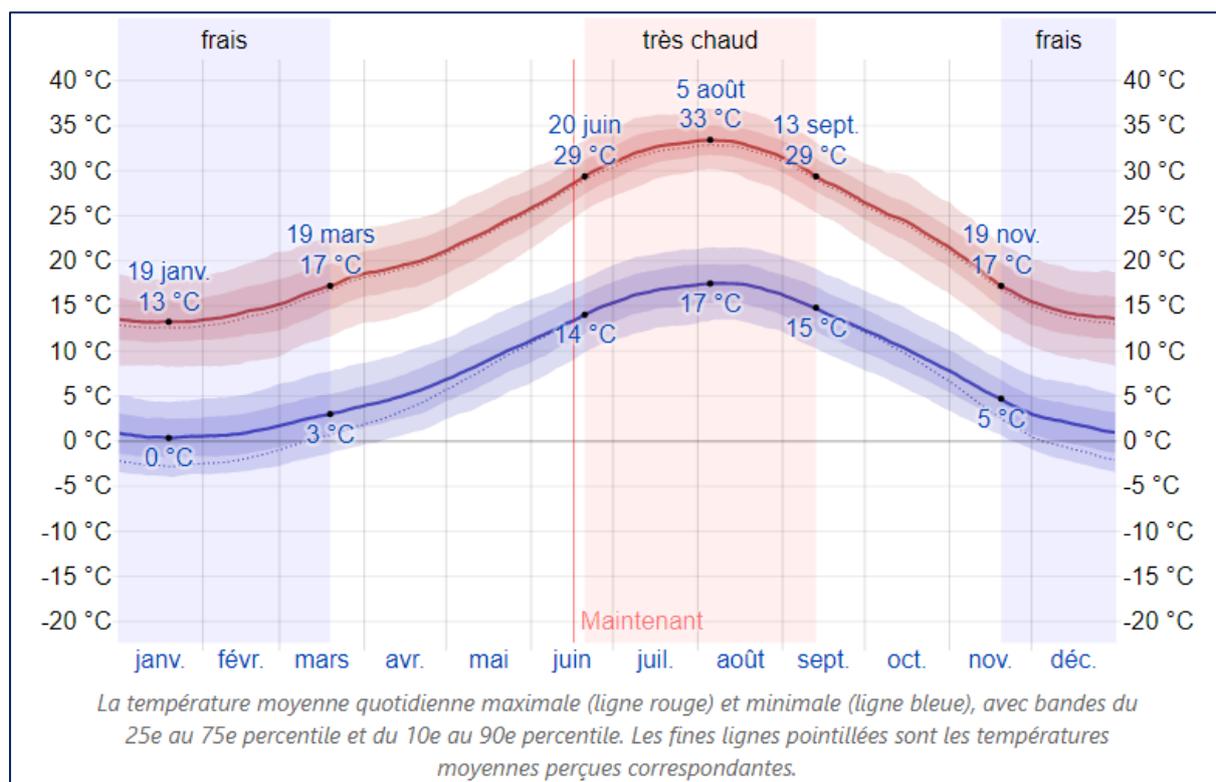


Fig. 11 Température moyenne maximale et minimal (www.infoclimat.fr).

3.3. Vent :

Cette section traite du vecteur vent moyen horaire étendu (Vitesse et Direction) à 10 mètres au-dessus du sol. Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs, et la vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires.

La vitesse horaire moyenne du vent à Bouïra connaît une variation saisonnière modérée au cours de l'année.

La période la plus venteuse de l'année dure, du 29 octobre au 1 mai, avec des vitesses de vent moyennes supérieures à **11,5** kilomètres par heure. Le jour le plus venteux de l'année est le 30 décembre, avec une vitesse moyenne du vent de **12,7** kilomètres par heure.

La période la plus calme de l'année dure, du 1 mai au 29 octobre. Le jour le plus calme de l'année est le 27 août, avec une vitesse moyenne horaire du vent de **10,3** kilomètres par heure.

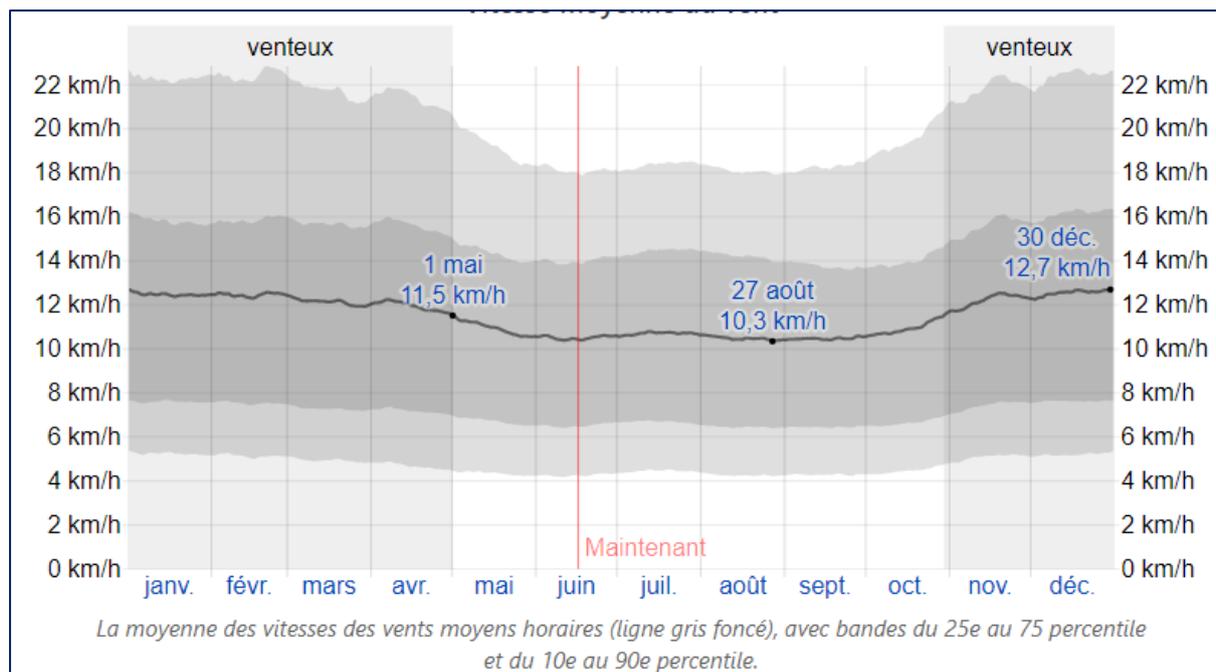


Fig. 12 Vitesse moyenne du vent (www.infoclimat.fr).

La direction horaire moyenne principale du vent à Bouïra varie au cours de l'année, le vent vient le plus souvent du Sud, du 1 janvier au 11 janvier et, du 1 octobre au 14 novembre, avec un pourcentage maximal de **37 %** le 31 octobre. Le vent vient le plus souvent de l'Ouest, du 11 janvier au 27 avril et, du 14 novembre au 1 janvier, avec un pourcentage maximal de **39 %** le 14 février. Le vent vient le plus souvent du nord, du 27 avril au 1 octobre, avec un pourcentage maximal de **41 %** le 7 août.

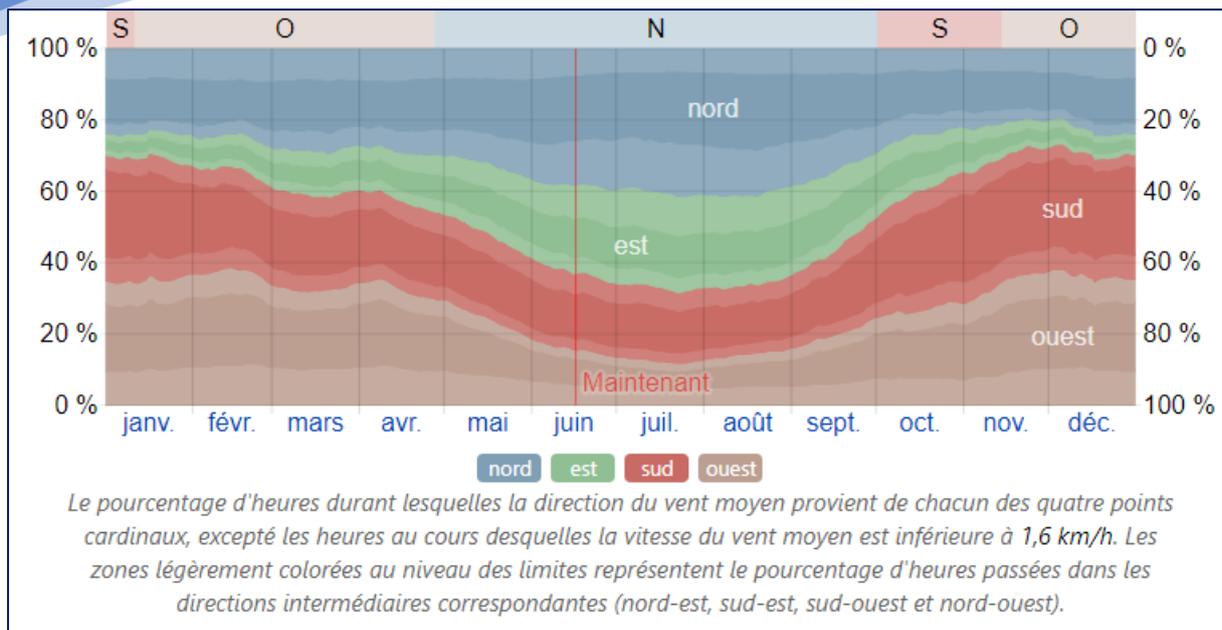


Fig. 13 Direction de vent (www.infoclimat.fr).

3.2. Cadre géologique et géomorphologique

Situé au pied du Djurdjura, massif calcaire appartenant à l'Atlas Tellien, le bassin de Bouira est rempli de sédiments tertiaires et quaternaires. Le Tell-Rif (ou Maghrébides) est une chaîne de type alpin qui résulte de la fermeture de la Téthys occidentale (J.P. BOUILLIN, 1986). La tectonique de la phase alpine se divise en deux phases : une phase lutétienne et une phase miocène accompagnée du chevauchement de nappes de charriage vers le sud (D. FRIZON DE LAMOTTE et al. 2000 ; R. BRACÈNE et D. FRIZON DE LAMOTTE, 2002). Le versant sud du Djurdjura est formé par l'empilement de ces nappes qui chevauchent les sédiments du bassin de Bouira. Les mouvements peuvent être considérés comme n'étant pas totalement achevés, car la réactivation des chevauchements a dénivélé d'une dizaine de mètres le glacis et les cônes de déjection quaternaires situés à la rupture de pente entre le versant du Djurdjura et le bassin (A. BOUDIAF et al., 1999). La forte activité sismique actuelle, qui exploite des failles orientées NE-SO et ENE-OSO (A. YELLES-CHAOUICHE et al., 2006), montre que le soulèvement du Tell est toujours actif et que la bordure du bassin de Bouira est affectée par cette tectonique.

4. Contexte Géologique :

Dans cette partie de notre travail, nous nous intéresserons particulièrement au plateau d'El Asnam, qui se situe à 13 km à l'Est du chef-lieu de la wilaya de Bouira. Il couvre une surface de l'ordre de 55 km², chevauchant deux sous bassins à savoir l'Oued Ed Dous au Nord et l'Oued Zaiane au Sud Est. Ces deux oueds sont les affluents de l'Oued Sahel, lui-même affluent de l'Oued Soummam. Ce plateau abrite une nappe d'eau importante exploitée pour les besoins en eau potable. Des principales agglomérations de la zone Bouira - El .Asnam.

4.1 Géologie régionale :

4.1.1. Aperçu sur la géologie du nord Algérien :

La région d'étude fait partie de la chaîne des Bibans. Du point de vue géologique, cette chaîne appartient aux zones externes ou zones telliennes, qui sont un domaine intégrant de l'orogénèse alpin Maghrébin « Chaîne des Maghrébides ». La chaîne des Maghrébides est un tronçon de la chaîne alpine d'Afrique du Nord qui s'étend du Rif à la Sicile le long du littoral africain de la méditerranée ; la chaîne des Maghrébides est considérée comme une paléo-limite entre l'Europe et l'Afrique. Cet édifice orogénique résulte de la structuration du bassin maghrébin et de ses marges lors des phases tectoniques tertiaires. Ce bassin était le siège d'un coulisage Afrique– Europe synchrone de l'ouverture de l'Atlantique et de la Téthys au Jurassique. En Algérie du Nord, l'orogénèse maghrébine est structurée en grands domaines suivants : le domaine interne au Nord, le domaine des flyschs, le domaine externe au Sud, l'avant- pays allochtone et l'avant- pays autochtones.

a. Les zones internes :

Les zones internes sont représentées par les massifs anciens cristallins appelé socle Kabyle ou Kabylyde, formés principalement de roches métamorphiques (gneiss, marbres, phyllades et amphibolites) bordés à leur partie méridionale par les formations de couverture en écaillés appelée chaîne calcaire ou la Dorsale Kabyle (Delga, 1967) Au cours de l'orogénèse Alpine, le socle et la dorsale Kabyle ont été largement charriés vers le sud sur le domaine des flyschs.

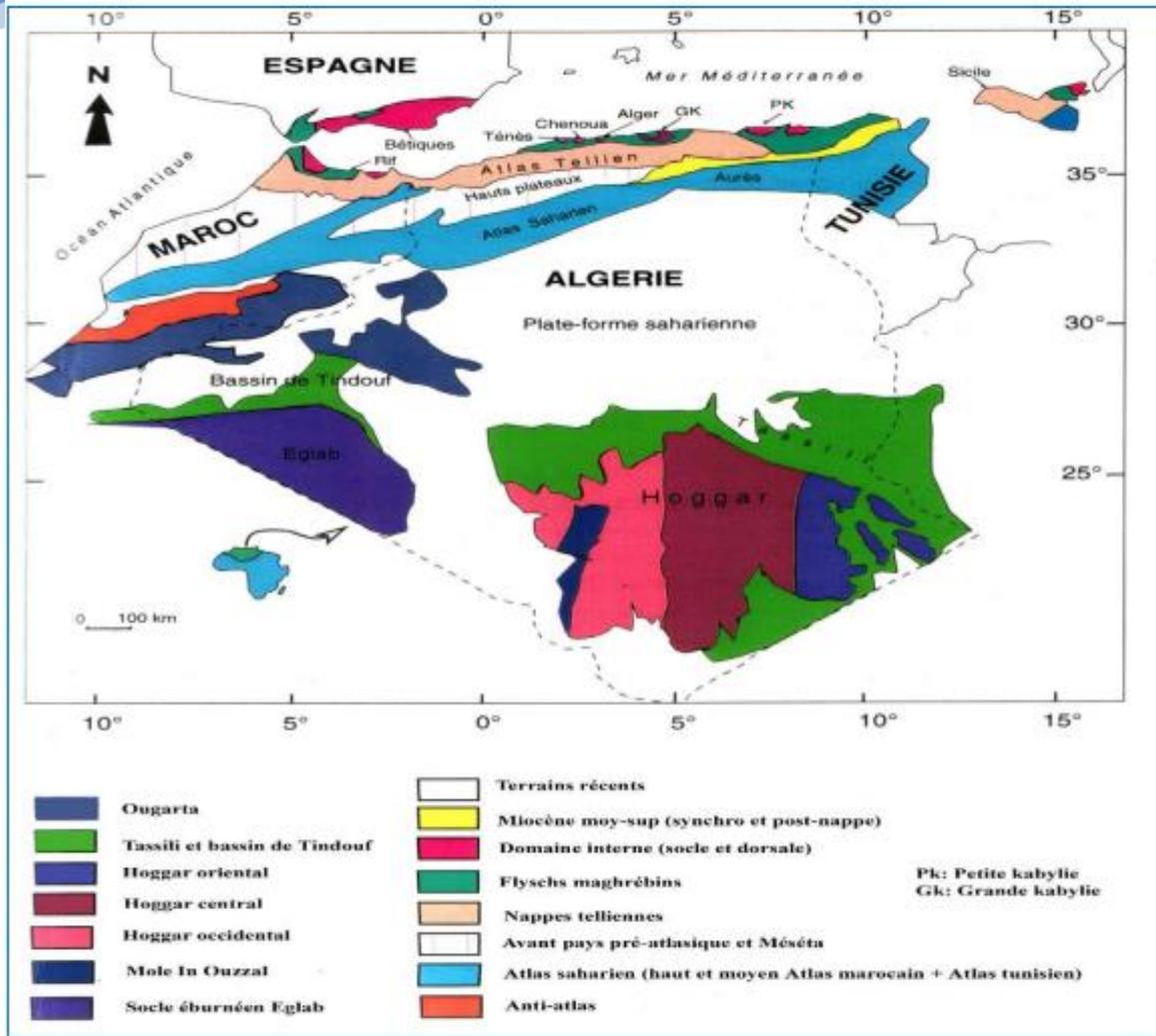


Fig. 14 Carte structurale schématique de la chaîne Magrébide montrant la disposition des zones internes et externes, et coupe simplifiée sur la transversale de la et de la petite grande Kabylie. (D.BELHAI, 1996).

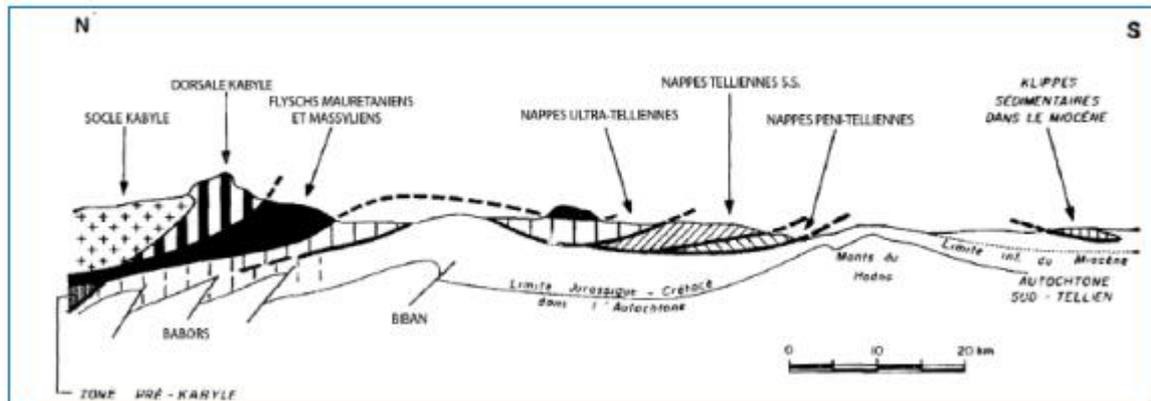


Fig. 15 Rapports structuraux entre les différentes unités de la chaîne des Maghrébides (d'après Delga, 1969).

- **Le socle kabyle :**

Le socle kabyle est représenté essentiellement par les massifs littoraux de grande kabylie et de petite kabylie ainsi que les massifs de Chenoua (Ouest d'Alger) et d'Alger. Il comprendrait les termes suivants :

- Un ensemble crustal profond appartenant de quartzites, granulites (Bouillin et al ; 1976).
- Des gneiss présentant des intercalations de quartzites, d'amphibolites et des marbres.
- Des phyllades ayant subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à Biotite et une zone supérieure à chlorite.
- Un ensemble essentiellement sédimentaire paléozoïque débutant au Cambrien (Baudelot et Géry ; 1979) et atteignant le Carbonifère.

- **La dorsale kabyle ou chaîne calcaire :**

Elle est représentée par des formations variées mais principalement carbonatées (calcaires) d'âge Liasique à Eocène moyen (Raoult, 1975). En général, la dorsale kabyle est caractérisée aussi par un style tectonique en écaille. Ces écailles comprennent également des formations paléozoïques ainsi que des terrains de l'Eocène supérieur et de l'Oligocène.

Cette chaîne calcaire est subdivisée du nord vers le sud en trois unités (Raoult, 1974 ; Vila, 1980) :

- Séries internes ;
- Séries médianes ;
- Et externes.

Ces unités sont séparées par des limites correspondent à des accidents cisailant. (Boillot, 1984 ; Lemoine, 1955 ; Bouillin, 1986).

- **La Dorsale interne :**

La dorsale interne occupe une place importante dans l'évolution tectonosédimentaire,

Elle est considérée comme une paléo-plateforme littorale kabyle. Elle est très souvent condensée et montre nettement du sud au nord un amincissement de ces séries ou lacunes.

Cette dorsale est caractérisée par une série transgressive sur le substratum Paléozoïque,

- Elle débute par des microconglomérats du Permo-Trias ;
- Un Trias supérieur et un lias basal à calcaires néritiques ;
- Des calcaires Néocomiens suivi par une lacune jusqu'au Sénonien supérieur ;
- Un Paléocène –Yprésien caractérisé formé de calcaires du Nummulitique II.

- **La Dorsale médiane :**

C'est la plus développée de la dorsale kabyle (flandrin, 1952) et occupe une position centrale dans le dispositif structural du Djurdjura. Elle est particulièrement déformée et limitée au nord par le socle cristallin et les terrains primaires de la dorsale interne par l'intermédiaire d'une zone tectonique importante .Au sud elle chevauche les formations de la dorsale externe. La Dorsale externe Elle est chevauchée par les formations

- **de la dorsale médiane :**

Elle se caractérise par une série, du Crétacé à l'Eocène, détritique et lacuneuse avec un faciès intermédiaire entre la dorsale interne et médiane.

b. Le domaine des flyschs :

C'est un ensemble d'âge qui s'étend du néocomien à l'Eocène et chevauche largement les zones externes. Ce sont des nappes de flysch avec une dominante carbonatée en écaillés et souvent décalé de son substratum initial (bouillin J.P. , 1986). Il se présente en position soit supra kabyle sur les massifs des socles, soit infra kabyle le long d'une bande continue au sud des massifs des socles qui les chevauchent. Classiquement, on distingue deux types de flysch : le flysch Mauritanien au nord et le flysch massylien au sud, (bouilliin et al, 1977).

- **Les flyschs mauritaniens :**

Le flysch mauritanien est caractérisé par :

- un crétacé inférieur à faciès guérrouch (Delga, 1955) ;
- et des flyschs de penthièvre d'âge crétacé supérieur ;
- se termine par des formations conglomératiques et micro conglomératiques puis des grés d'âge éocène à oligocène.

- **Les flyschs massyliens**

Sont des formations allant du Crétacé inférieur (Néocomien) au Lutétien.

Débutent par un flysch Crétacé inférieur argilo quartzitique dont les bancs sont d'épaisseur décimétrique.

- **Le Cénomaniens :**

est constitué par des phanites blanches et noires tout-à-fait typiques.

- **Le Crétacé**

Supérieur est caractérisé par des argiles alternant avec des microbrèches tendres en petits bancs. Les ensembles les plus méridionaux de ce flysch aient été associés à une série comportant du Néocomien calcaire à Ammonites (Vila, 1971 ; Bouillin, 1977).

- Paléocène marneux, Yprésien- Lutétien inférieur marno- calcaire clair ou blanc à bancs de silex et à petites intercalations bio- détritiques ou à petits galets, Lutétien à tendance siliceuse.

- Les flyschs Numidiens II constitue une nappe indépendante d'âge Oligocène supérieur à Miocène inférieur et recouvre indifféremment toutes les unités de cet édifice et comprend (Coiffait, 1992)

- Argiles « sous- numidiennes » vertes, rouges ou violacées, à rares bancs gréseux et à Tubotomaculum. (D'âge Oligocène moyen- supérieur) ;

- Grés numidiens (jusqu'à 2000 m à l'Est) en bancs épais, à quartz roulés hétérogènes (Aquitaniens -Burdigaliens inférieurs) ;

- Des argiles et des marnes claires à silexite « supra-numidienne » (Burdigalien inf.).

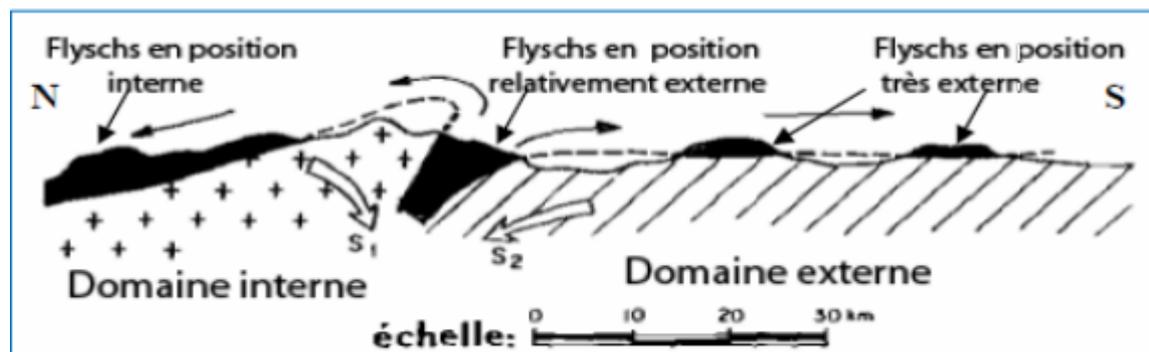


Fig. 16 Position des nappes de flyschs par rapport aux unités de la chaîne des Maghrébides.

c. Les zones externes :

Le domaine externe est représenté par importantes séries mésozoïques et cénozoïques, à dominante marno-calcaire ou gréseuse. Leur structure tectonique en nappes décalées au-dessus du Trias gypso-argileux, montre une progression vers le Sud vers les unités allochtones présaharien des Hautes Plaines. Les massifs des Bibans et de l'Atlas blidéen, d'âge crétacé, sont considérés comme autochtones ou parautochtones. Plusieurs auteurs (Bouillin 1977 ; Vila 1980) distinguent du nord au sud :

- La série ultra-telliennes Elles sont définies par un faciès homogène essentiellement marneux du Crétacé à l'Eocène avec quelques intercalations de bancs de calcaire à silex noir. Ces séries n'affleurent de façon notable. Qu'à l'Est du Djebel Sidi Driss (J.F.Raoult, 1968) puis se développent au Djebel Bou Sbaa au nord de Guelma (J.M. Villa, 1968). Dans ces unités, y est représenté le socle cristallin du Djebel Edough « massif cristallin externe » de l'Est de l'Algérie alpine.

- Les Séries telliennes sensu stricto Elles vont du Trias au Lutétien avec des variations de faciès dans le temps. Le Lias est de type plateforme, le Dogger et Malm marneux, le Cétacé d'abord détritique devient marneux à argilo-calcaire, l'Eocène se caractérise par des marnes épaisses et l'yprésien est calcaire. Ces séries sont groupées en cinq unités :

- Les nappes Baboriennes (Obert, 1981) ;
- Les unités Bibaniques (Caire, 1957) ;
- Les nappes de Djemila, béni Abdallah, Barbacha, Dra el Arba ;
- Les unités Gouraya, Arablou, Brek ;
- Les nappes Sétifiennes à matériel Éocène.

- **Les séries péni-telliennes et les unités méridionales à Nummulites**

Le terme péni-tellien a été créé pour désigner une série allochtone du versant nord du Djebel Zouaoui, dans le massif du Chettaba, (Vila et Lahondère in Marre et al. 1977). Les séries ainsi localisées présentent, du Lias au Sénonien supérieur, des alternances de faciès telliens typiques et de faciès rappelant ceux des domaines néritiques Sétifien ou Constantinois, plus méridionaux. La taille et la nature des blocs remaniés au Sénonien appuient l'hypothèse d'une

proximité paléogéographique immédiate entre ces domaines. La Figure 17 montre un exemple d'agencement des différents domaines et unités cités précédemment en Algérie (exemple du Constantinois, Algérie nord-orientale).

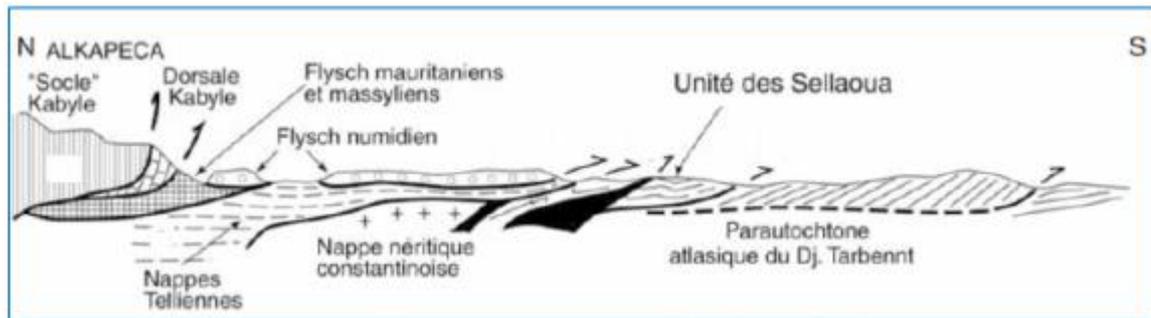


Fig. 17 Coupe générale synthétique des Maghrébides de l'Est algérien.

d. L'avant- pays allochtone

• L'organisation Sétifienne :

Les unités sud sétifiennes sont caractérisées par des séries mésozoïques de plateforme qui admettent des intercalations pélagiques. Ces unités apparaissent en fenêtre sous les nappes telliennes au Nord (Guergour et Anini) ou en demi-fenêtre à l'Ouest, au contact avec le massif des Bibans ; à l'Est, s'intercalent l'unité néritique constantinoise et les écailles préatlasiques de Sellaoua.

• L'organisation constantinoise :

Les séries de l'avant-pays allochtone Constantinois présentent une différenciation entre les séries néritiques Constantinoises au Nord et les séries de type Sellaoua au Sud.

Les séries néritiques Constantinoises :

Constituent l'essentiel des reliefs calcaires des monts de Tadjenanet, d'Oued Athménia, de Constantine, d'Ain Mlila et de Guelma, sur 160 Km d'Ouest en Est et sur 80 Km du Nord au Sud. C'est un ensemble de formations carbonatées du Mésozoïque, chevauchant les écailles de Sellaoua et les unités Sud-sétifiennes. Seules des cassures et des plissements à grand rayon de courbure ont caractérisés les déformations de ces reliefs calcaires lors des phases tectoniques alpines. Les séries de type Sellaoua II est représenté par des formations allochtones à

sédimentation argilomarneuse et marno-calcaire allant du valanginien à la fin du Maestrichtien. Les plissements dateraient de l'éocène supérieur, les écaillages et les chevauchements du tortonien. Les contacts de base des écailles sont injectés par des évaporites .

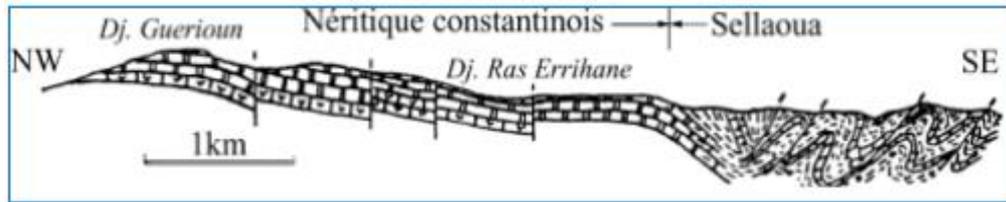


Fig. 18 La relations structurale : Nérétique / Sellaoua (Chadi et al. 1999).

e. L'avant pays autochtones :

C'est un vaste domaine incluant d'Ouest en Est les monts du Hodna, de Belezma, des Aurés et du Mellègue et plus au Sud, la vaste zone de diapirs est représentée par les djebels d'El Ouasta, d'Ouenza-Boukhadra, de Mesloula, etc. Il est caractérisé par la présence du Trias gypsifère et de séries secondaires (essentiellement Crétacés) très fortement subsidentes. Cet autochtone, formé par des structures modérément plissées au cours de la « phase atlasique » fini-Eocène est bordé au Nord par une marge particulièrement accidentée marquée par des phénomènes tectoniques alpins importants (Écaillage, renversement de séries...) définissant ainsi des éléments parautochtones et délimitant «le front sud Sétifien » de l'édifice Alpin.

4.2. Géologie locale :

Le secteur d'étude se localise dans la partie occidentale de la dépression de la Soummam. Cette dernière forme la jonction entre le tell septentrional au Nord et le Tell méridional au Sud. Le secteur d'étude est bordé au Nord par les flyschs du flanc Sud du Djurdjura et au Sud par des affleurements du Miocène. Les séries stratigraphiques s'étendant sur la région sont :

- **Les flyschs du flanc du Sud du Djurdjura :**

Sur le flanc méridional de la chaîne du Djurdjura, s'étendent de façon continue d'Ouest en Est des formations à faciès flyschs. Cet ensemble puissant de plus de 500 m (J.Flandrin) longtemps attribué au Crétacé est représenté par des schistes verdâtres, des quartzites, des bancs de microbrèches, des conglomérats et des lentilles de calcaires

- **Les flyschs inférieurs :**

Ils peuvent être repartis en trois types de faciès :

- Flysch tertiaire représenté par une série péritique bleue sombre avec des intercalations de grés.
- Flysch sénonien à microbrèches. Cette série est essentiellement constituée de marne se débitant en fine palètes.
- Flysch cénomano-turonien. Il est formé de phanites associés à de petits bancs de calcaires.

- **Les flyschs supérieurs :**

Ces flyschs surmontent les précédents. Ils sont plus ordonnés, mais la série est renversée.

- a. Le Miocène :**

Il s'agit de formations du Miocène inférieur post-nappe. Cette puissante formation continentale se développe largement dans la vallée de la Soummam. Ce Miocène forme la majeure partie des affleurements de bordure de la plaine. Les dépôts miocènes sont essentiellement formés d'assises conglomératiques jaunâtres à rouge brique avec des argiles sableuses ainsi que des passées argileuses et des grés. Les formations sont caractérisées par d'importantes variations de faciès. Elles sont recouvertes sur le plateau de Bled el Madjen par des formations quaternaires.

- b. Le Quaternaire :**

Dans le secteur d'étude le Quaternaire est représenté par divers types de dépôts :

- Les alluvions actuelles, constituées par des limons sablonneux résultant des crues.

Les alluvions occupent le fond de l'oued Ed Dous.

- Les alluvions anciennes des vallées sont représentées par des dépôts caillouteux, limoneux et argilo-sableux .

- Les terrasses anciennes, ce sont des formations caillouteuses composées de conglomérats et de grés à ciment argileux. Ces formations constituent la majeure partie de la couverture de la plaine du Hamza. A ces formations s'ajoutent les dépôts de cônes de déjections et éboulis de pentes.

c. Tectonique :

Sur la carte de la sont représentés les ensembles structuraux de la région d'étude. Nous distinguons des formations autochtones et allochtones :

Formations autochtones et paraautochtones

- Miocène poste-nappes Cet ensemble structural occupe toute la dépression de la vallée de l'Oued Soummam.
- Crétacé supérieur (Paléocène à Cénomaniens) : Cette unité structurale est représentée par des marnes grises et schistes à bancs de calcaires.
- Crétacé inférieur (Néocomien à Albien) : Situé au dessus de l'ensemble structural précédent, se compose de marnes, d'argiles schisteuses et de grès.

Formations allochtones

- Nappe épitellienne : Cette nappe chevauche vers le Sud de la région d'étude la nappe Sud tellienne, et vers l'Est de Bordj Bou-Arredj elle repose sur le substratum autochtone.
- Nappe sous numide : Cette nappe renferme des dépôts sénoniens à microbrèches, des lits de galets à éléments Jurassiques.
- Nappe Numidienne : Cette nappe correspond essentiellement à l'oligocène de faciès « numidien ».
- Nappe du flysch : Au Sud de la chaîne du Djurdjura, cette nappe forme une bande continue d'Ouest en Est. La région d'étude s'étend sur du Miocène post-nappe, coincée entre le flysch du Nord (elle-même en contact anormal avec l'Oligocène kabyle du Djurdjura) et le Crétacé inférieur, lui-même en contact anormal avec le Crétacé supérieur.

D'après M.Kieken, on distingue deux phases tectoniques :

- La première phase tectonique Eocène supérieur-Oligocène supérieur
- La deuxième phase tectonique débute à l'Oligocène-Miocène et se termine au Miocène inférieur.

5. Réseau Hydrographique :

La wilaya de Bouira renferme d'importantes ressources en eau. Elle est traversée par des bassins versants importants dont l'apport moyen annuel est de l'ordre de 561 millions de m³ constitué par :

- Bassin versant d'Isser : **135** millions de m³/an;
- Bassin versant Sahel Soummam : **380** millions m³/an;
- Bassin versant du Hodna : **35** millions m³/an;
- Bassin versant Humus : **11** millions m³/an.

Il ne faut pas oublier de citer les trois barrages qui existent dans la wilaya, et qui alimentent Bouira et quelques-unes de ses wilayas avoisinantes, nous nottons :

- Le barrage de Tilesdit.
- Le barrage de Koudiet Acerdoune.
- Le barrage de Lekehel.

6. Sismicité :

Les caractéristiques sismo-tectoniques du Nord Algérien montrent que celui-ci est caractérisé par une activité tectonique récente se manifestant sous forme de séismes de magnitudes plus ou moins élevées. Les désordres induits par les séismes au niveau du sol, représentent la cause principale des dégâts. Ils sont de diverses natures.

Parfois le résultat est la combinaison de plusieurs types de désordres. Tout phénomène sismique se manifeste par des vibrations au niveau du sol généré par les ondes sismiques et l'apparition de failles en surface, lorsque les séismes sont de fortes magnitudes.

Les instabilités liées aux séismes concernent entre autres :

- les glissements de terrain
- les ruptures de failles en surface...

La conception et la réalisation des ouvrages devront donc, tenir compte de la sismicité de la région et se conformer à la réglementation en vigueur La nouvelle réglementation parasismique (RPA, version 2003) classe les zones sismiques comme suit : (voir carte classification sismique des wilayas d'Algérie RPA).

Tab. 3 Zoning sismique de l'Algerie (RPA, versi en 2003).

Zone 0	sismicité négligeable
Zone I	sismicité faible
Zones IIa et IIb	sismicité moyenne
Zone III	sismicité élevée

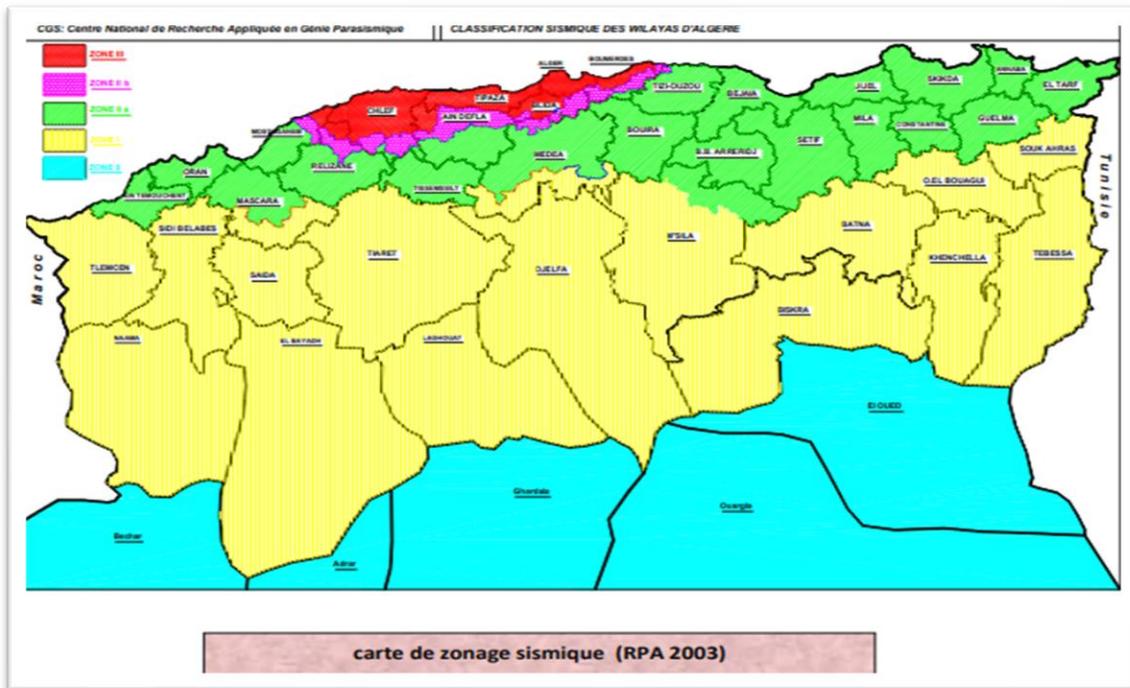


Fig. 19 : La wilaya de Bouira appartient d'après la carte de zonage sismique (RPA, 2003) à la Zone IIa à sismicité moyenne.

7. Morphologie :

Situé au pied du Djurdjura, massif calcaire appartenant à l'Atlas Tellien, le bassin de Bouira est rempli de sédiments tertiaires et quaternaires. Le Tell-Rif (ou Maghrébides) est une chaîne de type alpin qui résulte de la fermeture de la Téthys occidentale (J.P. BOUILLIN, 1986). La tectonique de la phase alpine se divise en deux phases : une phase lutétienne et une phase miocène accompagnée du chevauchement de nappes de charriage vers le sud (D. FRIZON DE LAMOTTE et al., 2000 ; R. BRACÈNE et D. FRIZON DE LAMOTTE, 2002). Le versant sud du Djurdjura est formé par l'empilement de ces nappes qui chevauchent les sédiments du bassin de Bouira. Les mouvements peuvent être considérés comme n'étant pas

totalelement achevés, car la réactivation des chevauchements a dénivéle d'une dizaine de mètres le glacis et les cônes de déjection quaternaires situés à la rupture de pente entre le versant du Djurdjura et le bassin (A. BOUDIAF et al., 1999). La forte activité sismique actuelle, qui exploite des failles orientées NE-SO et ENE-OSO (A. YELLES-CHAOUUCHE et al., 2006), montre que le soulèvement du Tell est toujours actif et que la bordure du bassin de Bouira est affectée par cette tectonique.

8. Conclusion :

travers ce chapitre, nous avons présenté les conditions géologiques, morphologiques, climatiques, lithologiques et topographiques de la région d'étude. La bonne connaissance de ces derniers nous a permis de bien comprendre les facteurs qui ont une influence sur le glissement de terrain.

D'après ce qui précède, on peut dire que la région d'étude possède des conditions favorisant le développement du phénomène.

Chapitre III

Base de données utilisé dans le modèle

Introduction :

Souvent associés aux ravinements, les mouvements de terrain sont des aléas très fréquents au Maghreb. En effet, les montagnes et les alines du Tell et du Rif offrent une multitude de sites favorables, du fait de la prédominance de fortes pentes développées dans des roches marneuses ou argileuses (G. MAURER, 1968 ; A. BENAÏSSA, 1984 ; A. MARRE, 1987-a ; H. AMIRÈCHE, 2001 ; A. SLIMI, 2008).

Le centre-nord de l'Algérie, est l'une des nombreuses instabilités enregistrées le long du tronçon Lakhdaria-Bouira de l'autoroute Est-Ouest algérienne longue de 1200km. La localité d'Ain Turk est connue pour ses pentes instables caractérisées par une morphologie très accidentée avec des pentes raides (**20 à 25%**).

1. Zone d'étude :

Aïn Turk est une municipalité située à 8 km au Nord-Ouest du chef-lieu de la wilaya de Bouira. Elle est limitée du côté nord-est par la commune d'Ath Laziz et au nord par Aomar, au nord-ouest par celle de Djebahia. Entre les longitudes (**3°46'30.704"E - 3°30'21.766"E**) et les latitudes (**36°28'30"N - 36°20'30"N**) à des altitudes allant de 506 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat de la zone est chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver, la pluviométrie moyenne est de **660** mm/an au nord et de **400** mm/an et les températures varient entre **20** et **40** °C de mai à septembre et de **2** à **12** °C de janvier à mars.

Selon des enquêtes sur le terrain sur toutes les zones proches de l'autoroute est-ouest les glissements affectent considérablement Aïn Turk.

Il est essentiel de préparer et d'analyser les différents types de données car de nombreux facteurs affectent le glissement de terrain. Le logiciel **Arc GIS** version 10.4 est utilisé pour gérer la base de données spatiale.

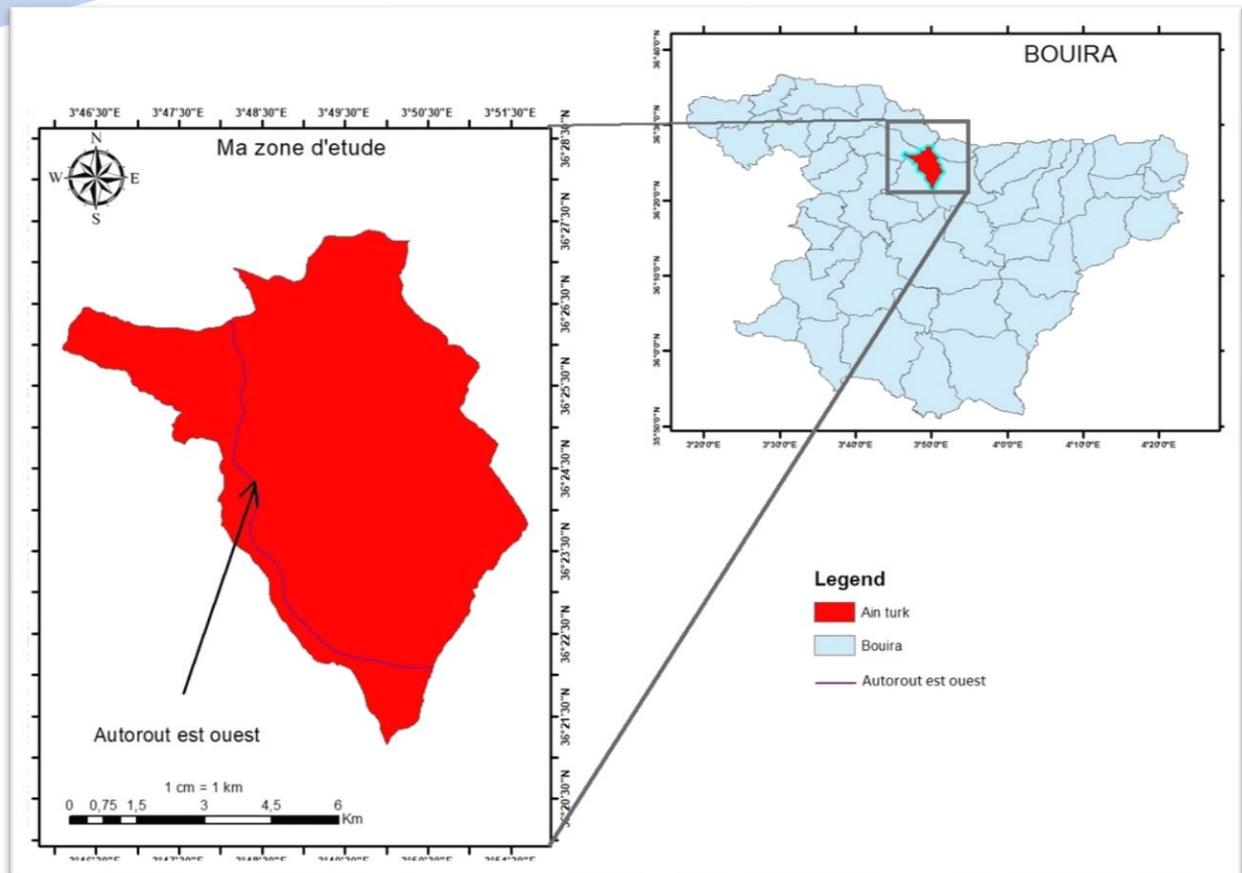


Fig. 20 Carte de localisation de la zone d'étude.

2. Construction de la carte d'inventaire :

Les inventaires de glissements de terrain constituent la base de l'évaluation de la susceptibilité, des dangers et des risques aux glissements de terrain (Soeters et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdury, 1999 ; Ardizzone et al., 2002 ; Dai et Lee, 2008 ; Van Westen et al., 2008). Ils sont essentiels pour les modèles de susceptibilité qui prédisent les glissements de terrain sur la base des conditions passées.

Les glissements de terrain dans la zone d'étude ont été identifiés, premièrement, à l'aide d'une image satellitaire à haute résolution par logiciel Google earth. Ce travail a été fait pour connaître approximativement l'emplacement des glissements.

Deuxièmement, des visites sur terrain ont été faite afin de confirmer et de localiser les formes de glissement de terrain déjà identifier par l'image satellitaire à l'aide de GPS (**Google Maps**).

Ensuite. Elles sont transférées dans un environnement SIG (Arc GIS) sous la forme de polygones, représentant la variable dépendante, pour servir comme couche principale dans l'évaluation de la susceptibilité.

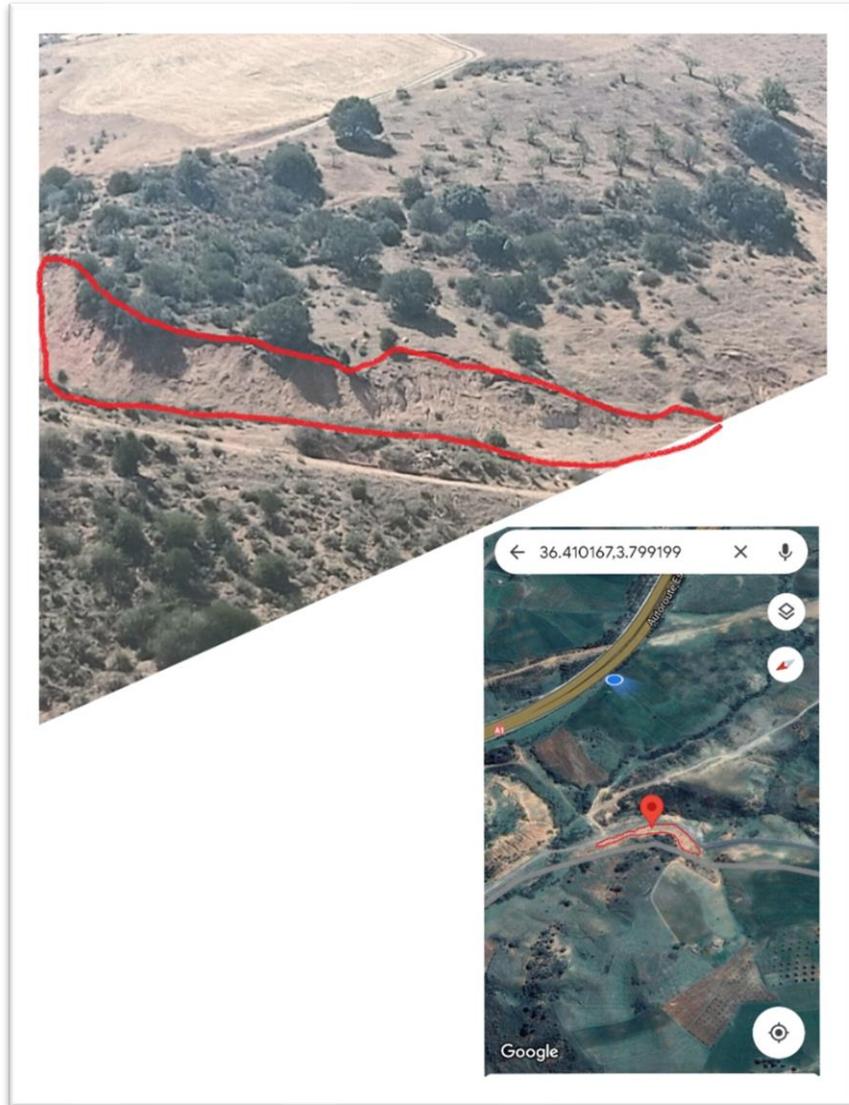


Fig. 21 Exemple d'un glissement dans notre zone d'étude.

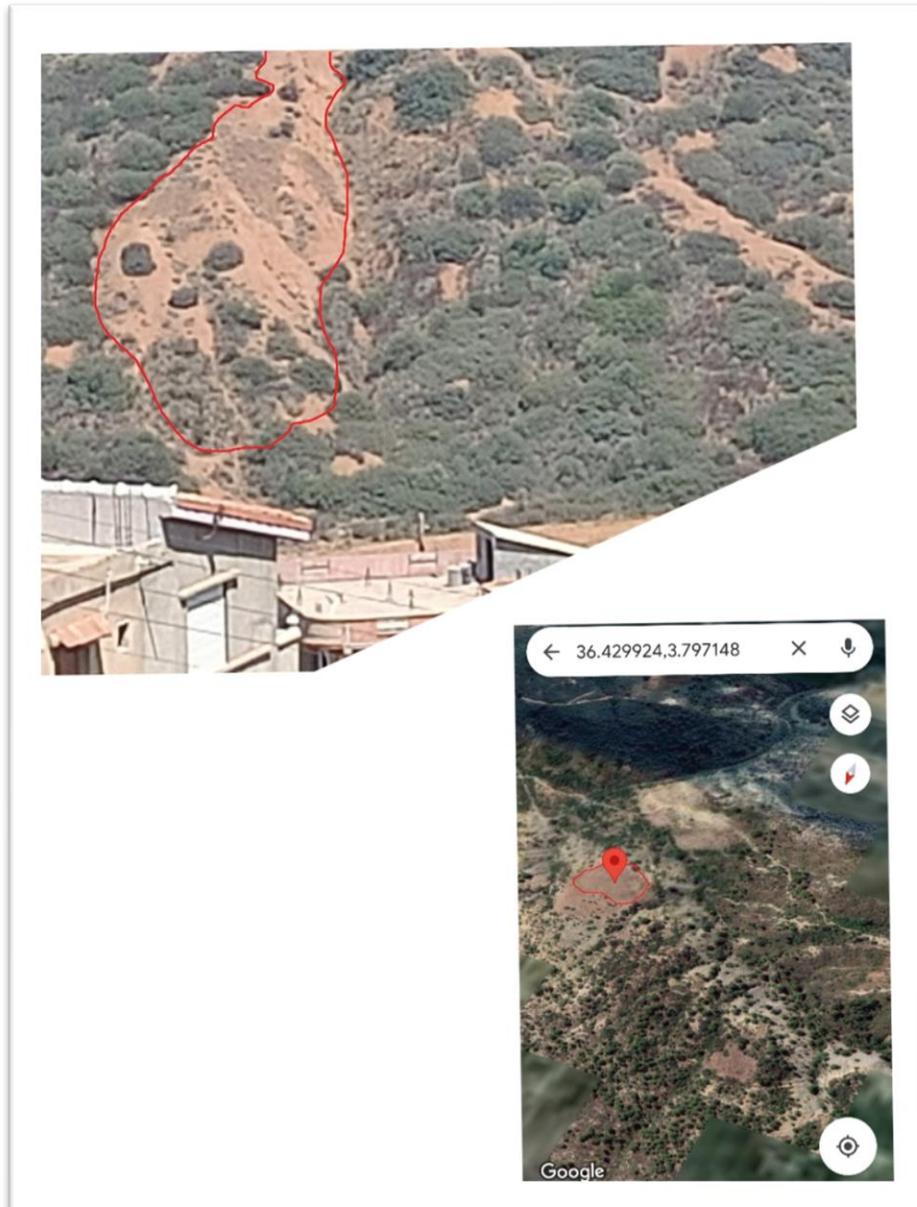


Fig. 22 Exemple d'un glissement dans notre zone d'étude.

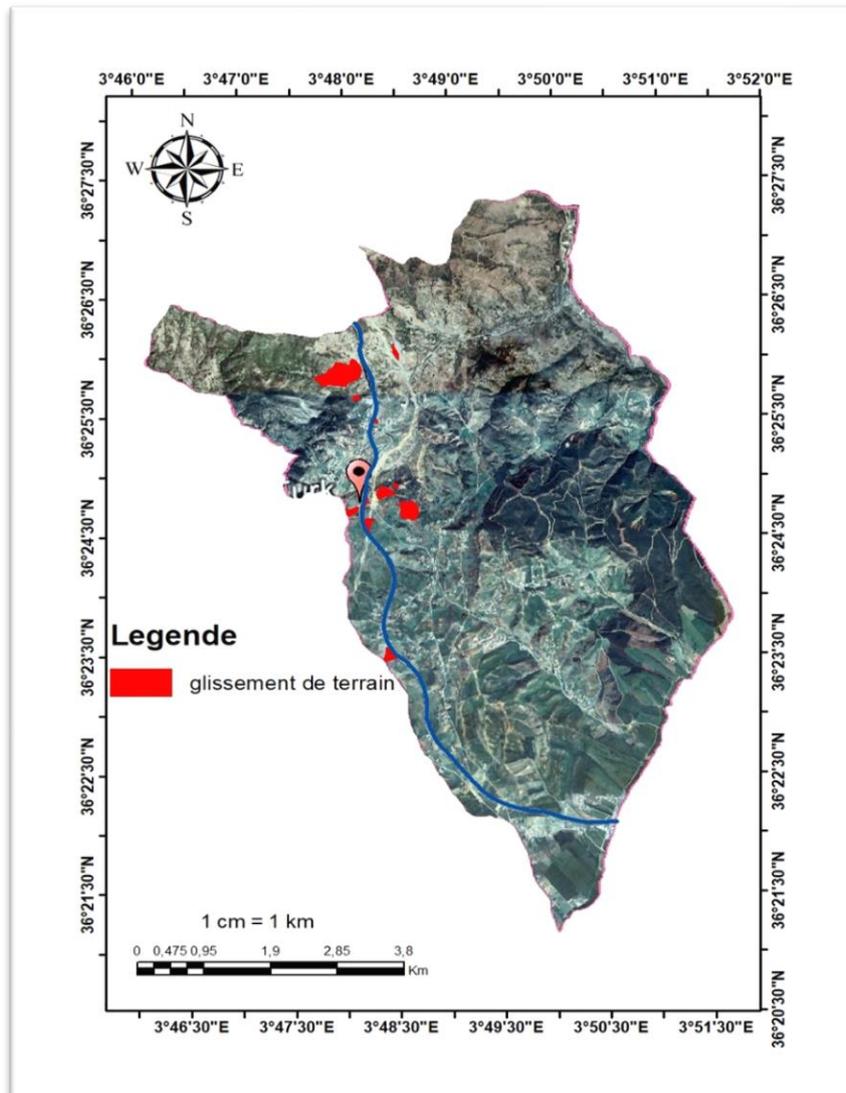


Fig. 23 Carte d'inventaire du glissement de la zone d'étude.

3. Facteurs de prédisposition du glissement de terrain :

Selon les études antérieures, un large éventail de facteurs de contrôle influence le déclenchement et le développement du glissement de terrain (Avelar *et al.* 2011, Coelho Netto *et al.* 2011) un ensemble de Sept principaux facteurs de prédisposition dans l'occurrence spatiale des glissements de terrain ont été pris en compte dans cette étude : la pente, l'exposition des versants, l'élévation, la proximité aux routes, la proximité aux réseaux hydrographiques, la courbure de plan, La courbure de profil. Une description de chaque facteur déterminant présumé est donnée ci-dessous.

a. Pente :

Sur une pente, les effets gravitationnels peuvent être séparés en un composant parallèle à la pente (qui tire l'objet vers le bas de la pente) et un composant perpendiculaire à celui-ci (qui tire l'objet contre la surface de la pente). À mesure que l'angle de la pente augmente (ce qui la rend plus raide), la composante parallèle de la gravité augmente et la composante perpendiculaire diminue, surmontant ainsi la résistance au mouvement vers le bas. Cette résistance est appelée frottement et dépend de la composante perpendiculaire de la gravité, ainsi que des surfaces de la pente et de l'objet. Lorsque le composant parallèle devient supérieur au composant perpendiculaire, l'objet glisse le long de la pente.

La carte de gradient de pente a été dérivée en utilisant " Slope " fonction des outils Spatial Analyst à partir du MNT. La couche d'angle de pente est classée en cinq classes (0-5, 5-15, 15-25, 25-35 et >35) basé sur la classification des ruptures naturelles (Fig. 24).

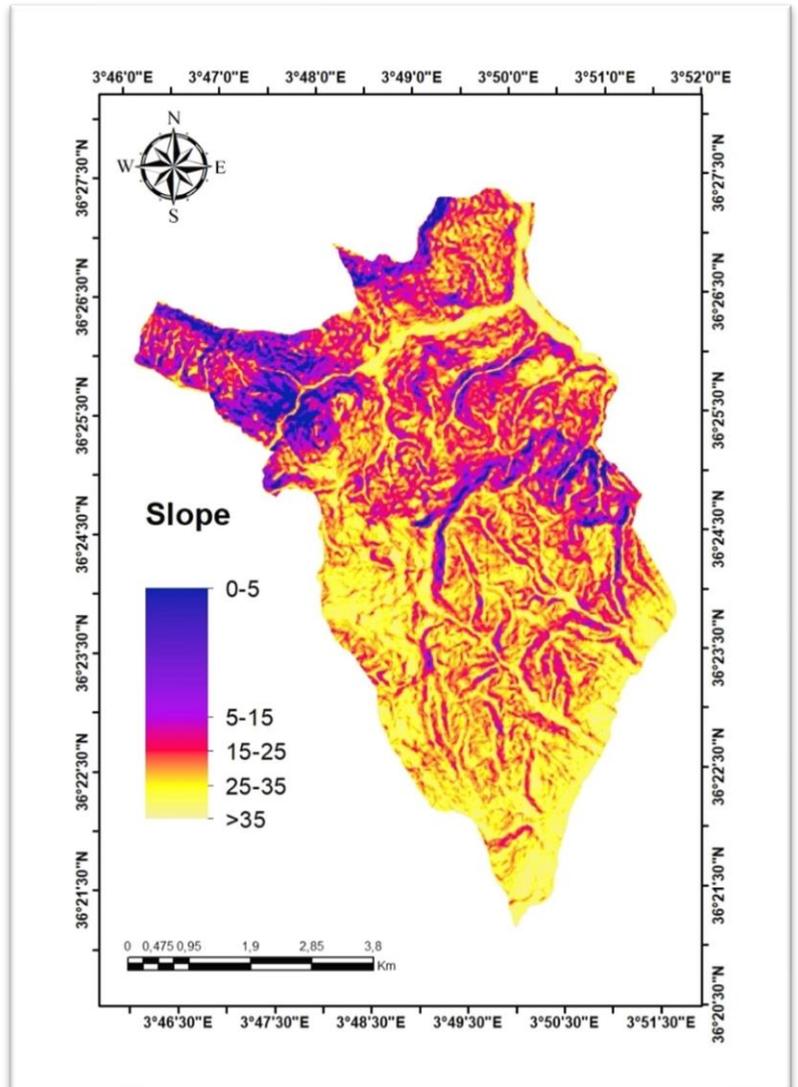


Fig. 24 Carte des pentes de la zone d'étude.

b. Altitude :

L'altitude est un autre paramètre fréquemment utilisé pour les études de susceptibilité aux glissements de terrain. Il est précisé que les glissements de terrain ont plus tendance à se produire à des altitudes plus élevées (Ercanoğlu et al.2004).

Dans ce projet, une carte d'altitude (Fig. 25) est préparée à partir du Modèle Numérique du Terrain (MNT), de résolution 12.5 m x 12.5 m. La carte d'altitude a été divisée en cinq classes (<950, 950-1200, 1200-1350, 1350-1500 et >1500 m).

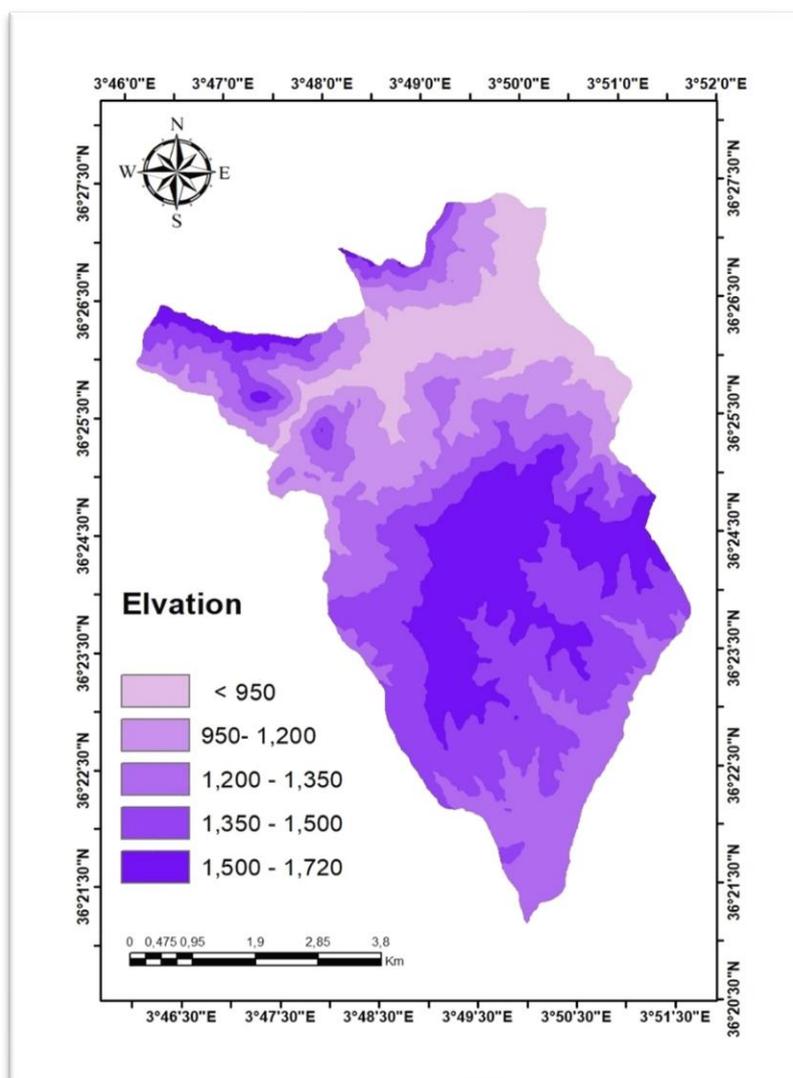


Fig. 25 Carte d'altitude.

c. L'exposition des versants :

L'intensité de l'exposition à la lumière, le type et l'étendue du couvert végétal et l'apport des eaux de surface varient considérablement selon l'aspect de la pente, la différence de température entre jour et nuit sur une pente ensoleillée est également plus importante que sur une pente ombragée et le cycle sec-humide est également plus rapide, ce qui réduit la résistance et la stabilité de la masse rocheuse et du sol sur la pente ensoleillée, à son tour augmenter la probabilité de glissement de terrain.

La carte des aspects des pentes a également été préparée à partir d'un MNT sous neuf classes directionnelles (Rahmati et al.,2016): Plat (- 1 °), Nord (337,5 ° –360 °, 0 ° –22,5 °), Nord-Est (22,5 ° –67,5 °), Est (67,5 ° –112,5 °), Sud-Est (112,5 ° –157,5 °) , Sud (157,5 ° – 202,5 °), Sud- Ouest (202,5 ° –247,5 °), Ouest (247,5 ° –292,5 °) et Nord-Ouest (292,5 ° – 337,5 °)(Fig. 26).

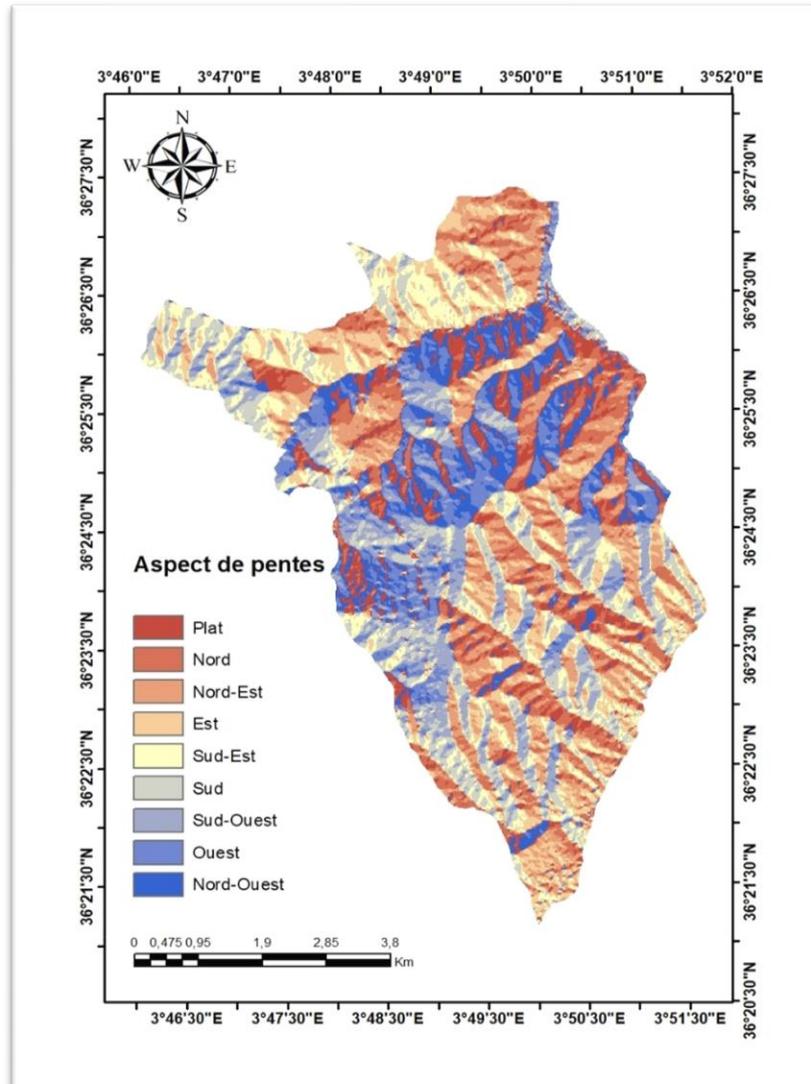


Fig. 26 Aspect des pentes.

d. Proximités aux réseaux hydrographiques :

Comme l'eau peut augmenter le poids du sol et des matériaux rocheux, on la connaît comme un facteur qui déclenche un glissement de terrain. L'espace intersyrieux du sol et des roches exposés sur la pente est d'environ 10 % à 35 % de leur taille. Lorsqu'il est sec, l'espace intersyrieux est occupé par l'air. Cependant, après des précipitations à long terme, l'espace

interstitieux est entièrement occupé par l'eau et augmente donc le poids des sédiments. En d'autres termes, la puissance qui pousse les sédiments à se déplacer vers le bas est donc augmentée.

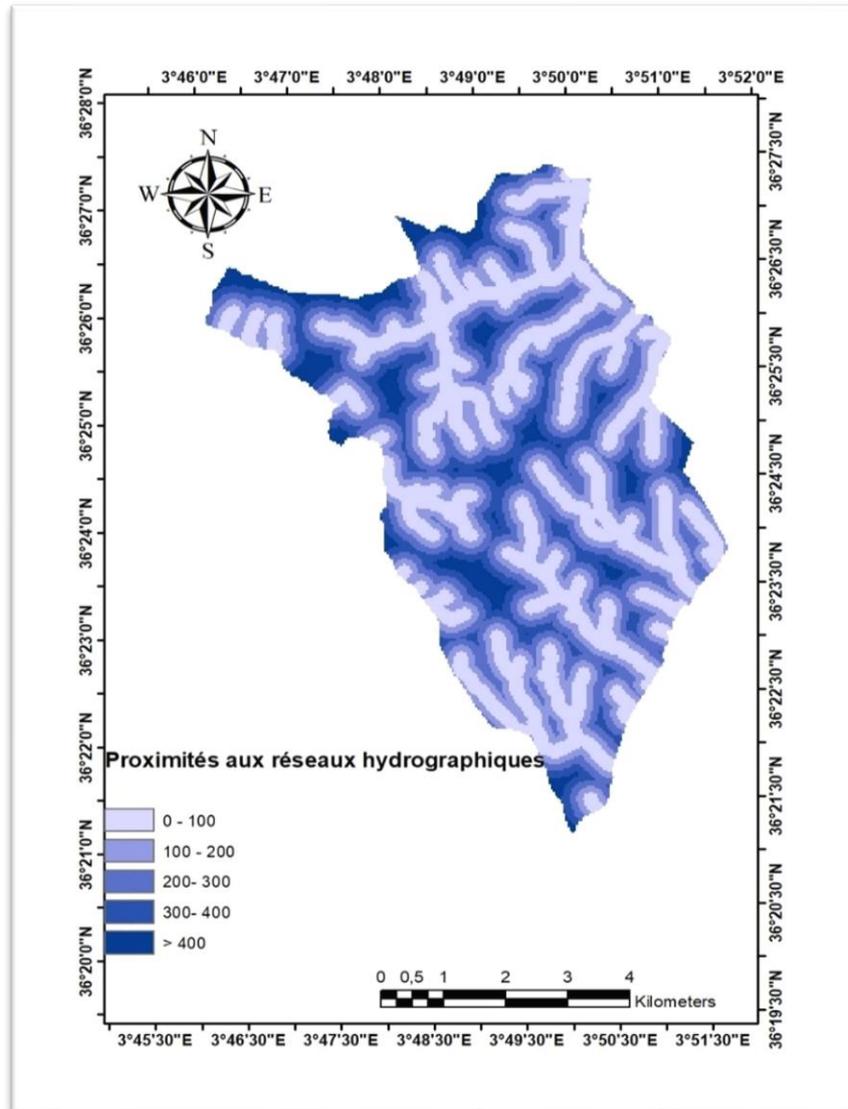


Fig. 27 Proximités aux réseaux hydrographiques.

Pour mesurer le paramètre de distance au cours d'eau, le réseau de cours d'eau a été extrait d'un MNT à partir d'Arc Hydro. Après l'extraction des flux, l'outil Distance euclidienne d'ArcGIS10.4, Cinq zones tampons différents sont créées dans la zone d'étude pour déterminer l'effet des cours d'eau sur ravines comprenant: 0–100 m, 100–200 m, 200–300 m, 300 à 400 m et > 400m. (Fig.27).

e. la courbure de plan :

La courbure du plan est un paramètre géométrique de la terre surface, il décrit le changement d'inclinaison de la pente ou apparence. La courbure du plan a été dérivée du MNT (12.5) et reclassés en cinq classes. (Très faible), de -3.80 à -0,94 , (faible), de -0,94 à -0,33 (Modéré), de -0,33 à 0,25, (élevé), 0,25 à 0,86 , (très élevé) 0,86 à 3,28 (Fig. 28).

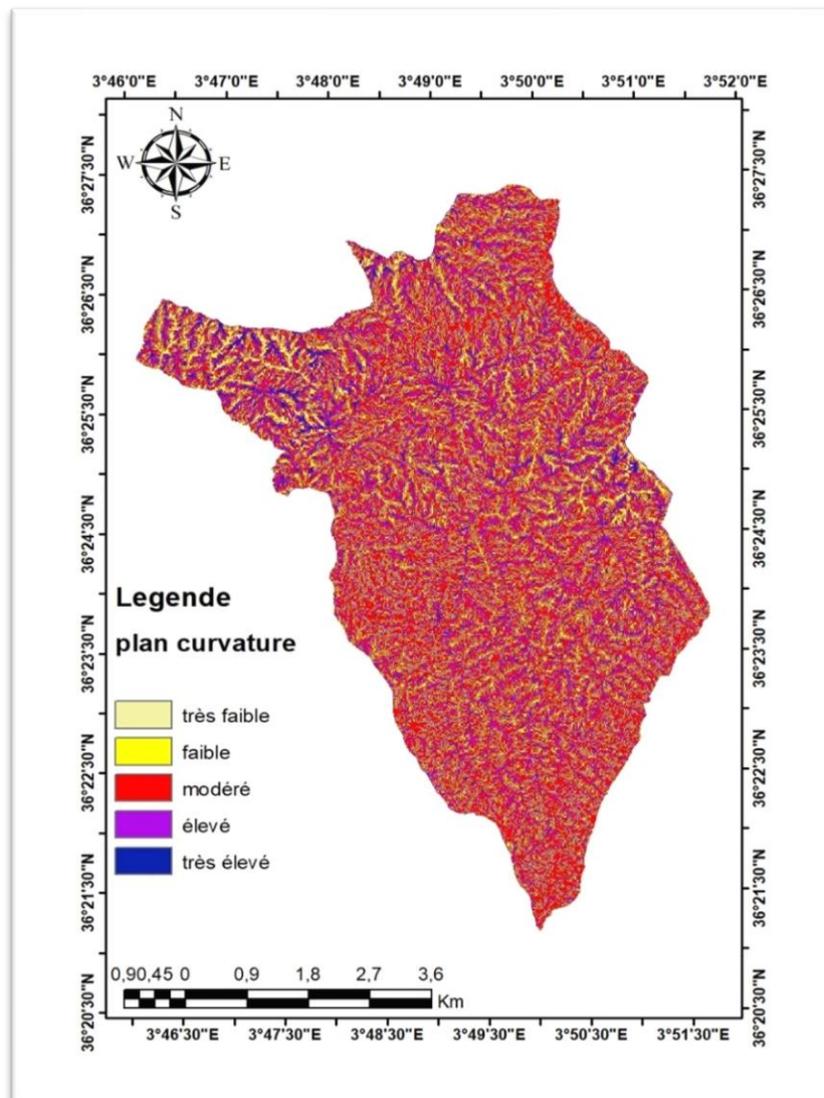


Fig. 28 la courbure de plan.

f. La courbure de profil :

La courbure dans le plan vertical parallèle à la direction de la pente est considérée comme la courbure du profil et il a été habituellement utilisé dans la cartographie de susceptibilité.

La courbures de profil et la courbures de plan sont utilisées pour les pentes et les glissements de terrain analysent (Ayalew et Yamagishi , 2004). (Ohlamacher, 2007) a présenté un compte rendu détaillé de la courbure du plan et son effet sur la stabilité des pentes dans l'écoulement de la terre et les glissements de terrain dominaient les régions. Courbure du profil a également été dérivé du MNT et reclassé en cinq classes (très faible) de -7,98 à -1,00, (Faible) de -1,00 à -0,35 (modéré) de -0,35 à 0,23 (élevé) 0.23 à 0,88 (très élevé) 0 ,88 à 0,70 (Fig. 29).

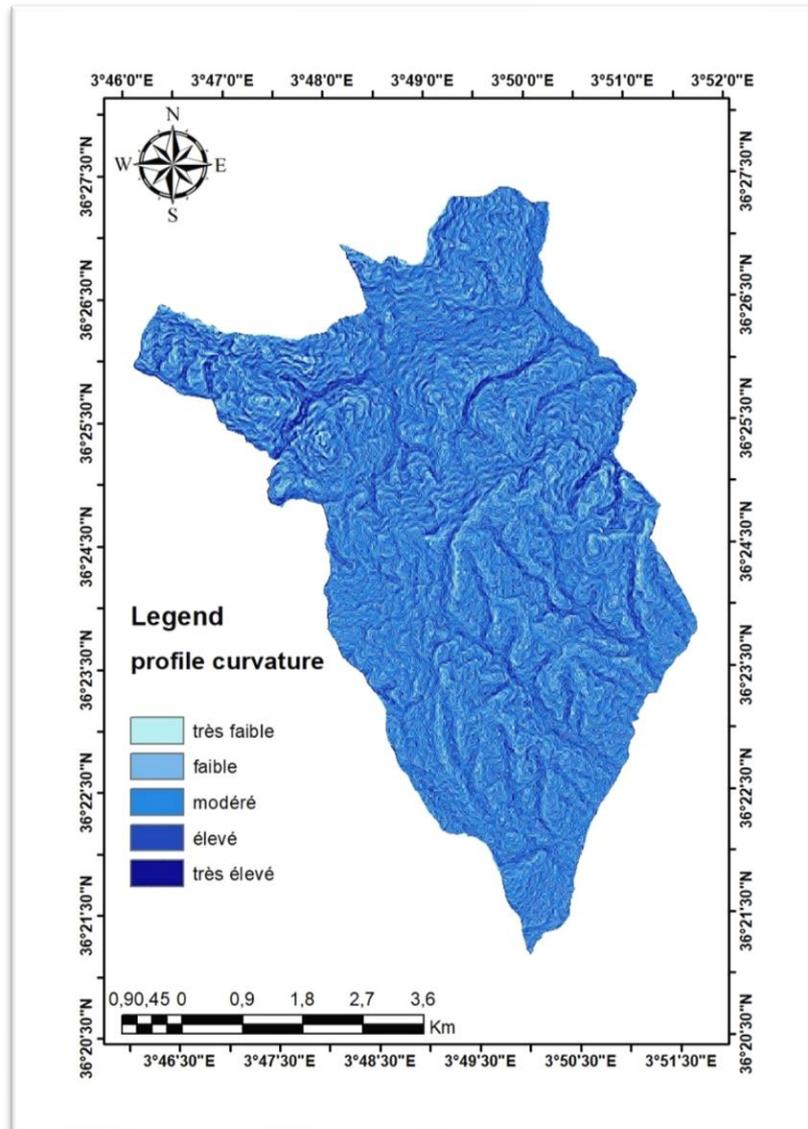


Fig. 29 La courbure de profil

g. Proximité aux routes :

La construction de routes affecte la végétation et perturbe les structures du sol ce qui peut provoquer des glissements de terrain, aussi la distance aux routes est l'un des principaux facteurs anthropiques influençant les occurrences de glissements de terrain (Nourani et al. 2014 ; Yilmaz 2010). En effet, lors des travaux sur le terrain, des glissements de terrain dus aux travaux de construction de la route sont détectés dans cette présente étude. La carte finale a été divisée en cinq zones déférentes (Fig. 30) en utilisant la classification Natural breaks jenks (Conoscientiet al., 2014) dans Arc GIS 10.4: 0 à 300 m, 300–600 m, 600–900 m, 900–1200 m et > 1200 m.

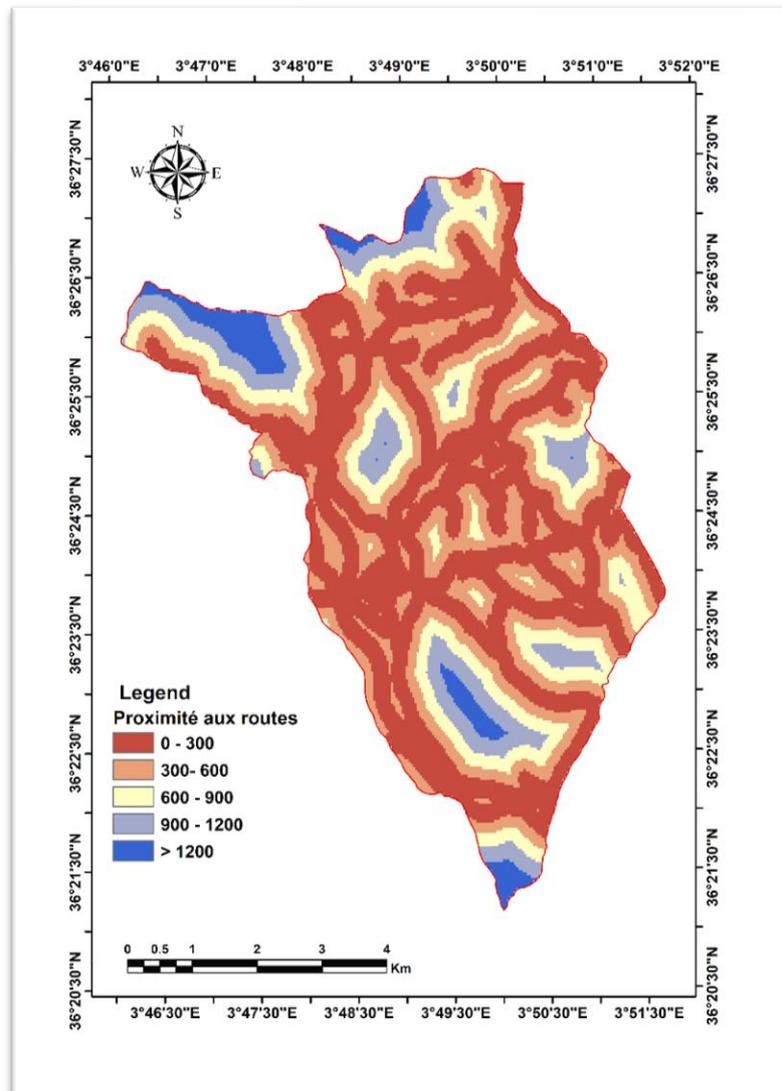


Fig. 30 Proximité aux routes.

4. Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons établi une base de données sur les facteurs prédisposant, ces données ont été obtenues, traitées et cartographiées à l'aide de l'Arc Gis 10.4 pour obtenir les cartes de ces sept paramètres de prédisposition :(la pente, l'exposition des versants, l'élévation, la proximité aux routes, la proximité aux réseaux hydrographiques, la courbure de plan, La courbure de profil). Afin de cartographier la susceptibilité au glissement de terrain dans notre zone d'étude (Ain Turk).

Chapitre IV

Modélisation de la susceptibilité aux glissements

via AHP

Introduction :

Le présent travail, y compris la cartographie d'inventaire, a été mené pour établir une carte de susceptibilité aux glissements de terrain en utilisant une approche spatiale multicritère basée sur le SIG. Sept facteurs liés aux glissements de terrain : (la pente, l'exposition des versants, l'élévation, la proximité aux routes, la proximité aux réseaux hydrographiques, la courbure de plan, La courbure de profil).

Le poids pour chaque facteur est attribué à l'aide du processus de hiérarchie analytique (AHP) en fonction de son influence sur l'occurrence du glissement de terrain

1. Analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain :

La méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytics Hiérarchie Process AHP) a été utilisée pour le LSA (Land slide Susceptibility Analysis)

1.1 Analyse Multicritère Hiérarchique AHP

Afin d'élaborer la carte de susceptibilité de glissements, nous avons suivi la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytics Hiérarchie Process). Cette méthode, créée par SAATY (1991), est une méthode d'analyse multicritères qui peuvent être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération. Elle a déjà été utilisée avec succès par exemple dans l'application à l'étude de la transformation potentielle de l'utilisation du sol (FIGUEIREDO, 2001) ou dans l'évaluation de la probabilité de l'érosion hydrique (CORREIA, 2007).

La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée, on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela, une échelle adéquate. SAATY (1991) propose d'utiliser l'échelle indiquée dans le. Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chacune et le vecteur propre lui correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant. La valeur propre est la mesure qui permettra d'évaluer la cohérence ou la qualité de la solution obtenue, représentant ainsi, un autre avantage de cette méthode.

Tab. 4 Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre.

Critères	C ₁	C ₂	C ₃	...	C _n	W _i
C ₁	1/ΣC ₁	W ₂₁ /ΣC ₂	W ₃₁ /ΣC ₃	...	W _{n1} /ΣC _n	ΣC ₁ /n
C ₂	w ₁₂ /ΣC ₁	1/ΣC ₂	W ₃₂ /ΣC ₃	...	W _{n2} /ΣC _n	ΣC ₂ /n
C ₃	W ₁₃ /ΣC ₁	W ₂₃ /ΣC ₂	1/ΣC ₃	...	W _{n3} /ΣC _n	ΣC ₃ /n
...
C _n	W _{1n} /ΣC ₁	W _{2n} /ΣC ₂	W _{3n} /ΣC ₃	...	1/ΣC _n	ΣC _n /n
	ΣC ₁	ΣC ₂	ΣC ₃	...	ΣC _n	

Quand w_{ij} représente le jugement quantitatif de la paire de caractéristiques C_i, C_j , il est défini par les règles suivantes :

- 1- Si $w_{ji} = \alpha$, alors $w_{ij}=1/\alpha$, $\alpha \neq 0$
- 2- Si C_i est considéré comme étant d'une importance relative égal a celle de C_j

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{ij} \right)^{1/n} \dots \text{Eq 1}$$

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

$$T = |W_1/\sum W_i \quad W_2/\sum W_i \quad \dots \quad W_n/\sum W_i| \dots \text{Eq 2}$$

Soit T le vecteur propre normalisé utilisé pour quantifier et évaluer l'importance de chaque critère.

Afin de tester la cohérence de la réponse qui indique si les données ont un rapport logique entre elles, SAATY (1977) propose de suivre le procédé suivant :

$$\lambda_{\text{máx}} = T \cdot W \dots \text{Eq 3}$$

où w est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons.

On calcule, alors, l'indice de cohérence (IC):

$$IC = \frac{(\lambda_{\text{max}} - n)}{(n-1)} \dots \text{Eq 4}$$

Le ratio de cohérence (RC) se calcule par l'équation :

$$RC = \frac{IC}{CA} \dots \text{Eq 5}$$

RC est le ratio entre IC et un indice de cohérence aléatoire (CA). L'indice CA, présenté dans le Tab.au 6, est issu d'un échantillon de 500 matrices réciproques positives géré de façon aléatoire, dont la taille atteint 11 par 11.

On considère comme acceptable un ratio de cohérence inférieur à 0,10.

Tab. 5 Échelle proposée par SAATY (1991).

Degrés d'importance de chaque caractéristique	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif.
3	Faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre.
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre.
7	Importance très forte ou attestée	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique.

9	Importance absolue	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre sont aussi Convaincantes que possible
2,4,6 ,8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire.

Tab. 6 Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
CA	0	0	0 ,58	0,90	1,12	1 ,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

2.2 Attribution de poids :

Les pondérations factorielles pour chaque critère ont été obtenues sur la base d'une matrice de comparaison par paires avec les scores donnés dans le Tab.au 7. Cette étape impliquait la conception d'une matrice de comparaison par paires, dans laquelle chaque facteur a reçu un poids basé sur son importance relative à chacun des autres facteurs.

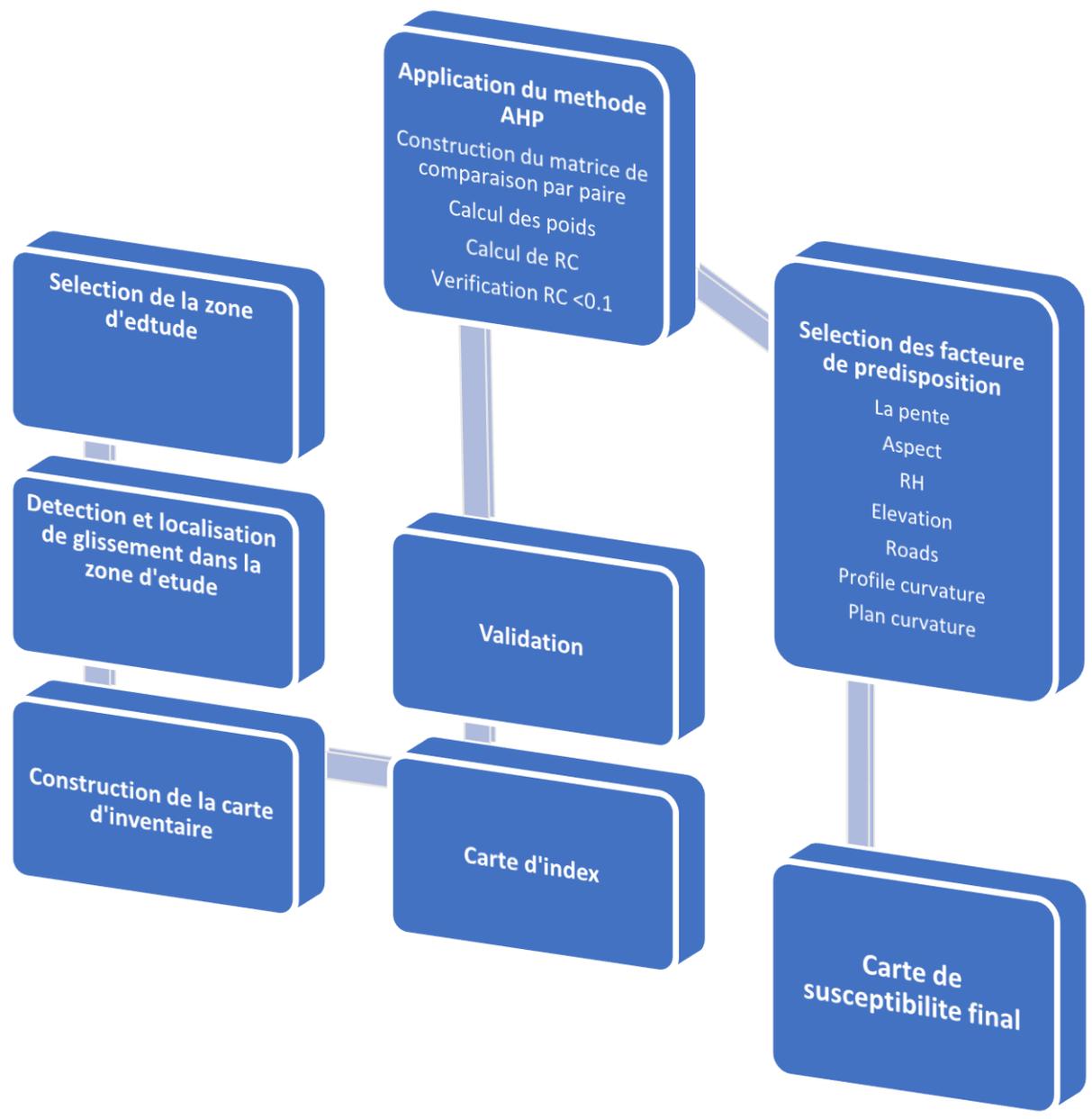


Fig. 31 Organigramme détaillé de la procédure de cartographie.

2. Résultats et discussion :

Les poids relatifs du facteur causal obtenus à partir d'une matrice de comparaison par paires. Ils indiquent que l'angle de pente est le plus importante avec une valeur de **0.3373**, suivi par l'élévation et l'aspect avec **0.2359** et **0.1467**, après la proximité aux réseaux hydrographique avec **0.1041**, alors que proximité aux routes, la courbure de plan et La courbure de profil sont moins importantes. Dans cette étude, le rapport de cohérence (RC) est **0.0662**.

Les poids des facteurs sont présenter dans le Tab. 7.

Tab. 7 Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés.

Facteurs qui influencent	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	poids	Eigenvalues	Eigenvector
[1] Pent	1	3	2	4	4	7	6	0.3373	7.5239	0.7266
[2] Aspect		1	1/2	3	1	5	4	0.1467	-0.1854	0.316
[3] Elevation			1	4	2	7	6	0.2359	-0.1854	0.508
[4] RH				1	3	3	2	0.1041	-0.0098	0.2242
[5] Roads					1	5	4	0.1061	-0.0098	0.2285
[6] Profile						1	1/2	0.0288	-0.0667	0.062
[7]Plan							1	0.0411	-0.0667	0.0886
Rapport de cohérence =0.0662										

Comme nous avons été calculé par analyse AHP, produisant un indice global de Susceptibilité aux glissements de terrain (OLSI) Overall Landslide Susceptibly Index

$$\text{OLSI} = 0.3373 \times \text{pent} + 0.1467 \times \text{aspect} + 0.2359 \times \text{elvation} + 0.1041 \times \text{RH} + 0.1061 \times \text{roads} + 0.0288 \times \text{profil} + 0.0411 \times \text{plan.} \dots \text{Eq 6.}$$

Tab. 8 Subdivision des différentes classes de risque d'érosion.

Classes	Surface	
	Km ²	%
Très faible	12.67	29.46
faible	4.26	9.92
Modérée	4.26	9.92
élevée	5.52	12.86
Très élevée	16.27	37.84
Totale	43	100

A partir de la méthode (AHP) nous avons obtenu une carte de susceptibilité de notre zone d'étude. Elle a été reclassée en cinq zones de susceptibilité relative : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée selon la méthode de classification des ruptures naturelles (Pourghasemi et al., 2012). Fig 27.

D'après la carte, on observe que la Susceptibilité est très élevée à l'extrême nord et nord-ouest de la zone d'étude (près de la zone de L'Akhalaria) et dans le centre de notre zone, aussi

Nous observons que **50 %** de notre zone d'étude est vulnérable aux glissements de terrain (la Susceptibilité est élever et très élever) et la Susceptibilité de **40%** de notre zone et faible ou très faible principalement situer au sud ,sud-est et nord-est .

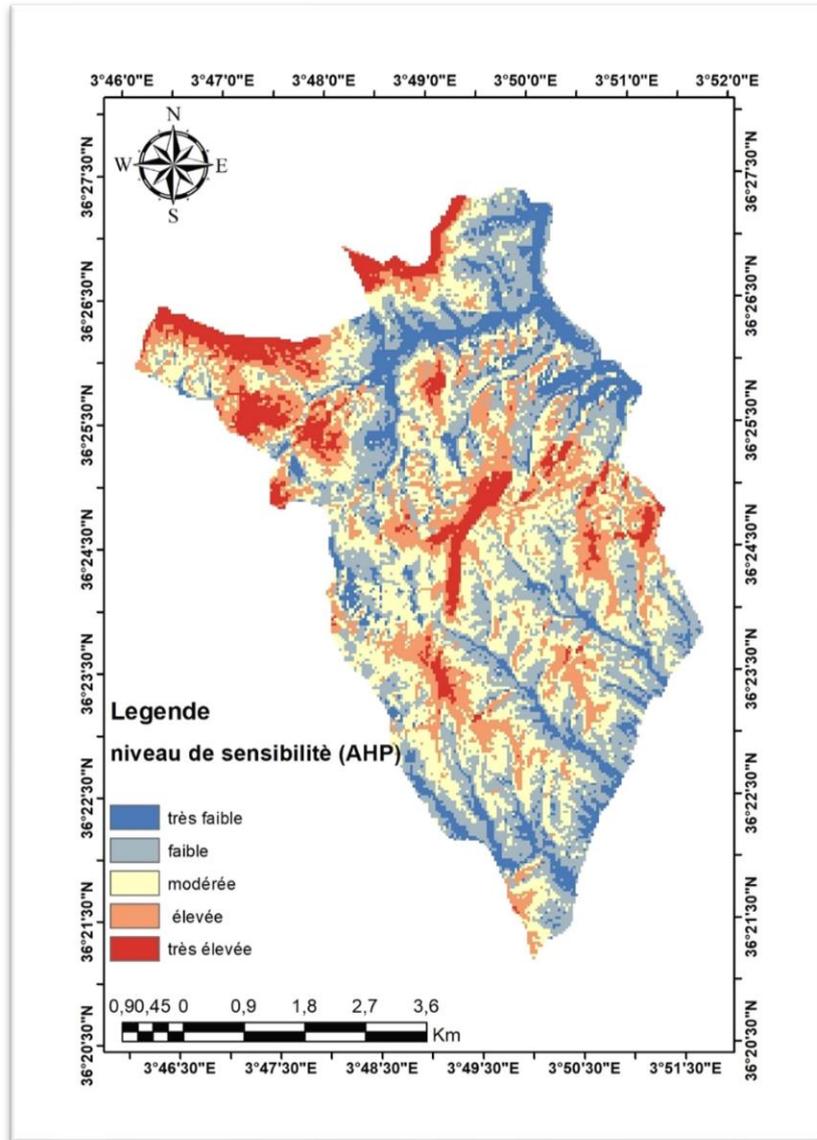


Fig. 32 Carte de susceptibilité de la zone d'étude.

4. Validation du modèle

Nous utilisons deux façons pour valider la carte de la susceptibilité : image satellitaire est la validation sur le terrain. Une sélection aléatoire de 10 glissements de terrain, qui représentent 70 % de tous les glissements de terrain, ont été utilisés pour produire des modèles de Susceptibilité aux glissements de terrain et 3 glissements de terrain (30 %) ont été utilisés pour valider les modèles.

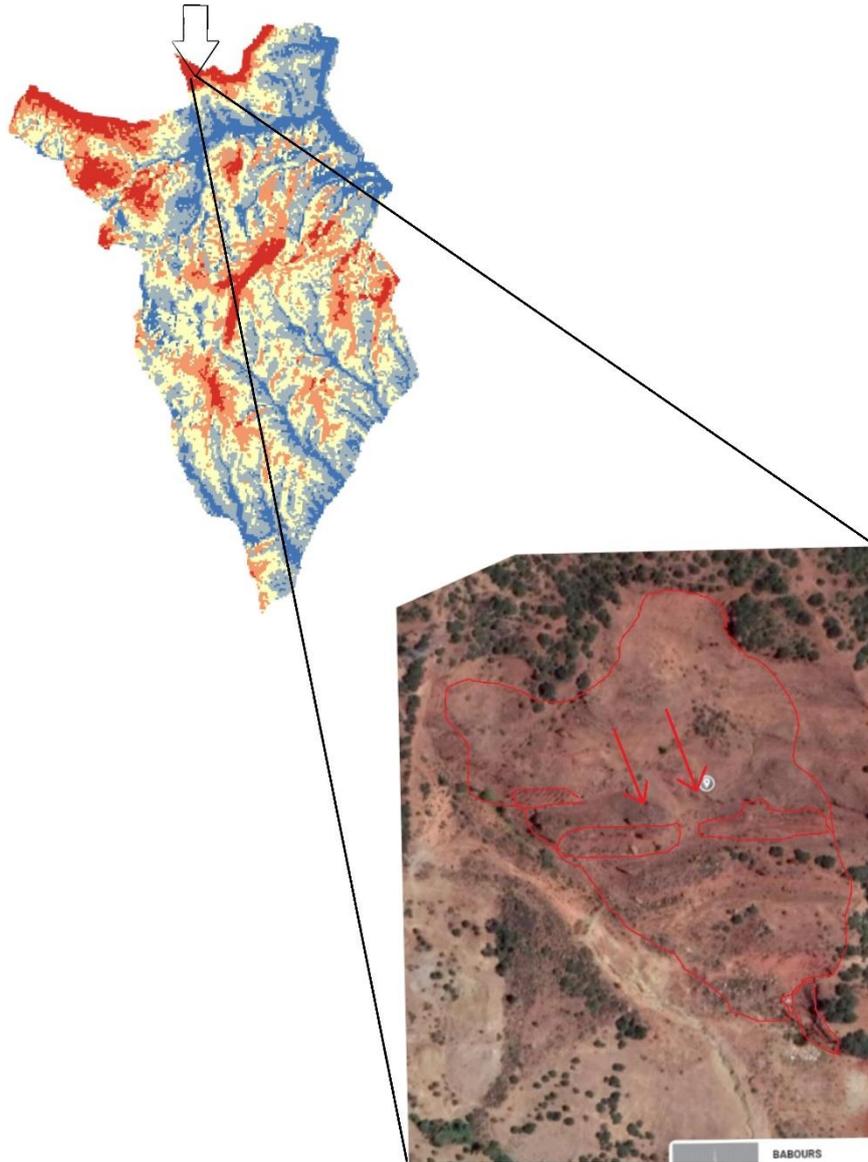


Figure 33 Glissement de terrain dans la partie de susceptibilité très élevée de la zone d'étude.

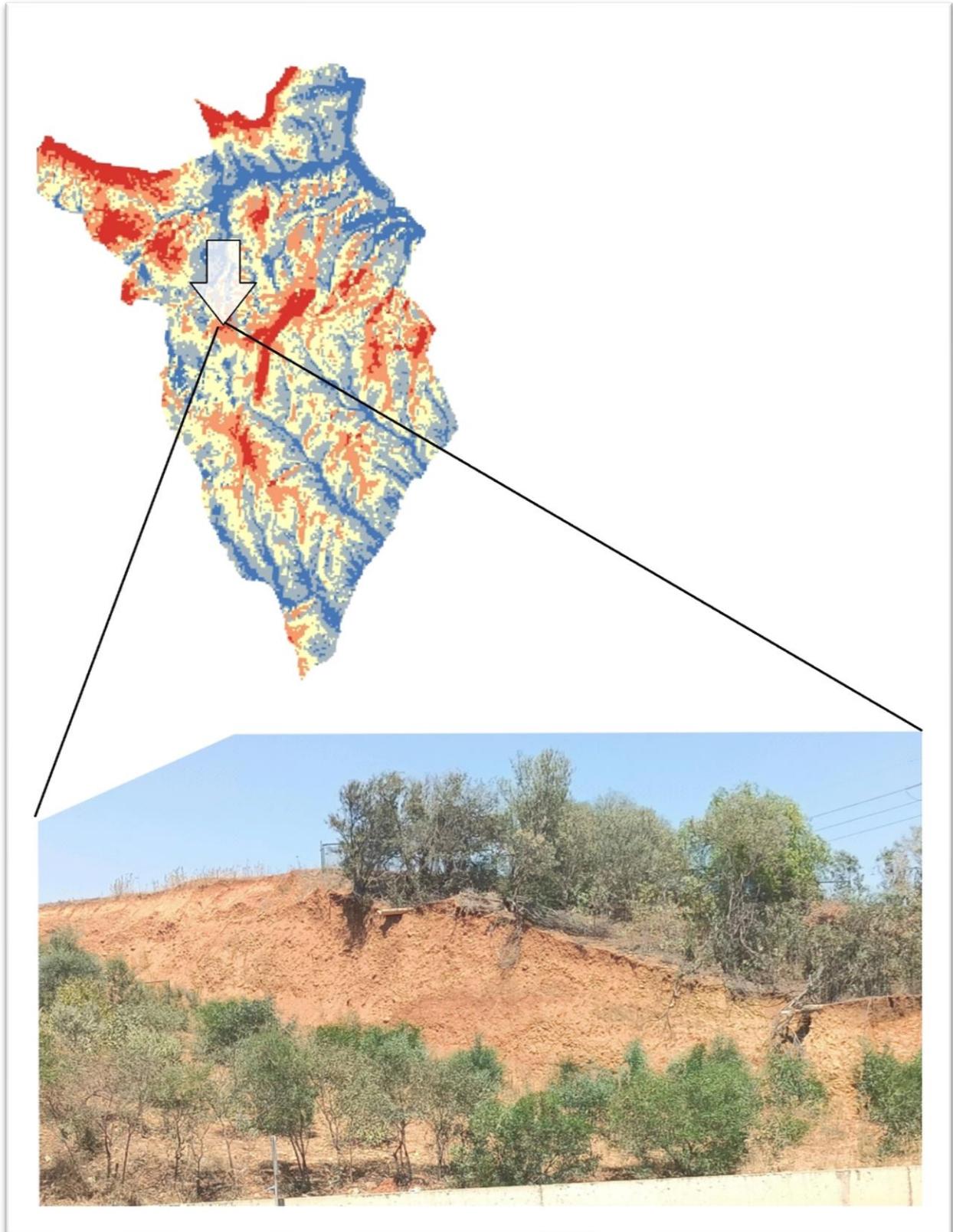


Figure 34 Glissement de terrain dans la partie de susceptibilité très élevée de la zone d'étude.

Conclusion :

Les systèmes d'informations géographiques se positionnent aujourd'hui comme d'excellents outils dans le diagnostic territorial pour la prise de décision efficace. Couplés à l'analyse multicritère hiérarchique (AHP), le SIG permet de modéliser des aléas et d'évaluer les potentiels risques sur le plan humain, social, économique et environnemental. Nous préconisons l'analyse de la relation entre les différents facteurs de prédisposition du phénomène étudié afin de réduire la subjectivité et l'incertitude occasionnées par les méthodes dites expertes. D'un point de vue technique, la précision des modèles de carte de susceptibilité est très dépendante des données d'entrée du modèle, des outils et des échelles de l'analyse spatiale.

Pour la présente étude, nous nous sommes basées sur des données gratuites généralement de faible résolution, ce qui augmente l'incertitude des résultats et par conséquent diminue la fiabilité d'évaluation des potentiels dégâts à l'échelle de la parcelle. Néanmoins, les descentes de terrain et le glissement de Gouache ont permis d'observer que la carte de susceptibilité réalisée présente une cohérence acceptable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Ont été présentés la définition des glissements, leurs classifications, morphologie, et la cinématique des mouvements de masse. Nous allons aussi exposer les différentes Techniques de Susceptibilité aux glissements de terrain à la fois quantitatif et qualitatif et de zonage des dangers.

Et après nous présentons notre zone d'étude géologiquement et géo morphologiquement de Bouira exactement à Ain Turk, nous choisissons la méthode L'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) pour notre modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain et nous sommes basé sur le côté de l'autoroute Est Ouest A partir d'une procédure en trois étapes dans le but de d'analyser la susceptibilité aux glissements LSA (Landslide Susceptibility Analysis).

D'abord On a organisé une sortie sur le terrain visant à localiser les glissements de terrain dans notre zone d'étude pour construction de la carte d'inventaire. Puis nous avons sélectionné les facteurs de conditionnement des glissements de terrain, un total de sept facteurs de prédisposition potentiels a été pris en compte dans cette étude. Il s'agit de : (la pente, l'exposition des versants, l'élévation, la proximité aux routes, la proximité aux réseaux hydrographiques, la courbure de plan, La courbure de profil). Enfin nous établissons une carte de susceptibilité aux glissements de terrain en utilisant une approche spatiale multicritères basée sur le SIG ,la précision des modèles de carte de susceptibilité est très dépendante des données d'entrée du modèle, des outils et des échelles de l'analyse spatiale.

Perspectives

- Pour une bonne étude, il est nécessaire de s'appuyer sur une bonne qualité de données à haute résolution, ce qui augmente la certitude des résultats et augmente ainsi la fiabilité de l'évaluation.
- La sélection des facteurs de contrôle affecter la précision et la qualité du processus de modélisation.

Références Bibliographiques

A

Abija FA, Nwosu JI, Ifedotun AI, Osadebe CC (2020) Landslide susceptibility assessment of Calabar, Nigeria using geotechnical, remote sensing and multi-criteria decision analysis: implications for urban planning and development. *SDRP J Earth Sci Environ Stud* 4(6):774–88

AGS (Australian Geomechanics Society) (2000) Landslide risk management concepts and guidelines. Australian Geomechanics Society, Sub-Committee on Landslide Risk Management, Australian Geomechanics, vol 35, pp 49–92

Ahmed B (2015) Landslide susceptibility mapping using multi-criteria evaluation techniques in Chittagong metropolitan area, Bangladesh. *Landslides* 12(6):1077–95

Ahmed MF, Rogers JD, Ismail EH (2014) A regional level preliminary landslide susceptibility study of the upper Indus river basin. *Eur J Remote Sensing* 47(1):343–73

Akgun A, Sezer EA, Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Pradhan B (2012) An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Comput Geosci* 38(1):23–34

Aleotti P, Chowdhury R (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ* 58(1):21–44

Anbalagan R (1992) Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Eng Geol* 32(4):269–77

Anbalagan R, Kumar R, Lakshmanan K, Parida S, Neethu S (2015) Landslide hazard zonation mapping using frequency ratio and fuzzy logic approach, a case study of Lachung Valley, Sikkim. *Geoenviron Disasters* 2(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-014-0009-y>

Angeli MG, Pasuto A, Silvano S (2000) A critical review of landslide monitoring experiences. *Eng Geol* 55:133–147

Atkinson PM, Massari R (1998) Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the central Apennines, Italy. *Comput Geosci* 24(4):373–385

Ayalew L, Yamagishi H (2005) The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* 65:15–31

Ayalew L, Yamagishi H, Ugawa N (2004) Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata prefecture, Japan. *Landslides* 1:73–81

Ayele S, Raghuvanshi TK, Kala PM (2014) Application of remote sensing and GIS for landslide disaster management—a case from Abay gorge, Gohatsion–Dejen section, Ethiopia. In: Singh M, Singh RB, Hassan MI (eds) *Landscape ecology and water management, proceedings of international geographical union (IGU) Rohtak conference. Advances in Geographical and Environmental Science* Springer, Japan, pp 15–32

Chapter

Ayenew T, Barbieri G (2005) Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia. *Eng Geol* 77:1–15

B

Berlin, S. (s.d.). *Stability analysis of slopes using the finite element method and limiting equilibrium approach*. Heidelberg.

B, B. (1978). *Les tremblements de terre*. Editions pour la Science.

Bachri S, Shresta RP (2010) Landslide hazard assessment using analytic hierarchy processing (AHP) and geographic information system in Kaligesing mountain area of Central Java Province Indonesia. In: *Proceeding 5th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery*, pp 107–12

Balasubramani K, Kumaraswamy K (2013) Application of geospatial technology and information value technique in landslide Hazard zonation mapping: a case study of Giri Valley, Himachal Pradesh. *Disaster Adv* 6(1):38–47

Ballabio C, Sterlacchini S (2012) Support vector Machines for Landslide Susceptibility Mapping: the Staffora River basin case study, Italy. *Math Geosci* 44(1):47–70

Basma AA, Kallas N (2004) Modeling soil alapse by artificial neural networks. *Geotech Geol Eng* 22:427–38

Baum RL, Savage WZ, Godt JW (2002) TRIGRS; a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. Open-file report 02-424

Bera A, Mukhopadhyay BP, Das D (2019) Landslide hazard zonation mapping using multi-criteria analysis with the help of GIS techniques: a case study from eastern Himalayas, Namchi, South Sikkim. *Nat Hazards* 96(2):935–959

Bisson M, Spinetti C, Sulpizio R (2014) Volcaniclastic flow hazard zonation in the sub-Apennine Vesuvian area using GIS and remote sensing. *Geosphere* 10(6):1419–31

Bommer JJ, Rodri'guez CE (2002) Earthquake-induced landslides in Central America. *Eng Geol* 63:189–220

Bonham-Carter GF (1994) Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS. *Computer methamphetamine geos*, vol. 13. Pergamon, New York, p 398

Brenning A (2005) Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5(6):853–62

C

Cordary, D. (octobre 1994). Mécanique des sols Glissement de Terrain Peguillan Bertrand.

de Groupe d'étude des talus. (observés entre 1963-1967 (Broché)). Les Glissements de talus routiers étude de désordres.

Carrara A, Cardinali M, Detti R, Guzzetti F, Pasqui V, Reichenbach P (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf Process Land* 16(5):427–45

Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. *ITC J* 2:172–83

Carrara A, Cardinali M, Guzzetti F, Reichenbach P (1995) GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara A, Guzzetti F (eds) *Geographical Information System in Assessing Natural Hazard*. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp 135–75

Chapter

Casagli N, Catani F, Puglisi C, Delmonaco G, Ermini L, Margottini C (2004) An inventory-based approach to landslide susceptibility assessment and its application to the Virginio River Basin, Italy. *Environ Eng Geosci* 3:203–16

CEOS (2001) The use of earth observing satellites for hazard support: assessment and scenarios. CEOS report. NOAA, USA http://ceos.esa.int/plenary16/papers/plenary16_doc14_dmsg_final/final_report/DMSG_final.html, Last accessed 19 July 2014

Chacón J, Irigaray C, Fernandez T, El Hamdouni R (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ* 65(4):341–411

Chelli A, Segadelli S, Vescovi P, Tellini C (2015) Large-scale geomorphological mapping as a tool to detect structural features: the case of Mt. Prinzera ophiolite rock mass (northern Apennines, Italy). *J Maps* 12(5):770–776

Chen Z, Wang J (2007) Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada. *Nat Hazards* 42(1):75–89

Chimidi G, Raghuvanshi TK, Suryabhagavan KV (2017) Landslide hazard evaluation and zonation in and around Gimbi town, western Ethiopia – a GIS-based statistical approach. *Appl Geomat (Springer)* 9(4):219–236

Chowdhury M, Sadek AW (2012) Advantages and limitations of artificial intelligence. *Artificial intelligence applications to critical transportation issues*, 6, transportation research circular E-C168

Chung CF, Fabbri AG (1995) Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara A, Guzzetti FŽ (eds) *Geographical Information Systems in assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp 107–142

Chapter

Corominas J, van Westen CJ, Frattini P, Cascini L, Malet JP, Fotopoulou S, Catani F, van den Eeckhaut M, Mavrouli OC, Agliardi F, Pitilakis K, Winter MG, Pastor M, Ferlisi S, Tofani V, Hervás J, Smith JT (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk: *bull Eng. Geol Environ* 73(2):209–63

Cortes C, Vapnik V (1995) Support-vector networks. *Mach Learn* 20(3):273–97

Crozier MJ, Glade T (2005) Landslide hazard and risk: issues, concepts, and approach. In: Glade T, Anderson M, Crozier M (eds) *Landslide Hazard and risk*. Wiley, Chichester, pp 1–40

Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AT, Schuster RL (eds) *Landslides—investigation and mitigation*. Transportation Research Board special report no, vol 247. National Academy Press, Washington, DC, pp 36–75

D

DURVILLE J.L., S. G. (1996). *Stabilité des pentes : Glissements en terrain meubles. Techniques de l'ingénieur.*

. Dahal RK, Hasegawa S, Masuda T, Yamanaka M (2006) Roadside slope failures in Nepal during torrential rainfall and their mitigation. *Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, pp 503–14

Dai FC, Lee CF (2001) Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. *Can Geotech J* 38:911–23

Dai FC, Lee CF (2002) Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42:213–28

Dai FC, Lee CF, Li J, Xu ZW (2001) Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ Geol* 40:381–91

Dai FC, Lee CF, Ngai YY (2002) Landslide risk assessment and management: an overview. *Eng Geol* 64:65–87

. Delmonaco G, Margottini C, Spizzichino D (2013) Rock-Fall Hazard assessment in the Siq of Petra, Jordan. In: *Landslide Science and Practice*, pp 441–49

Chapter

Dietrich EW, Reiss R, Hsu M-L, Montgomery DR (1995) A process-based model for alluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *Hydrological Process* 9:383–400

Đurić U, Marjanović M, Radić Z, Abolmasov B (2019) Machine learning based landslide assessment of the Belgrade metropolitan area: pixel resolution effects and a cross-scaling concept. *Eng Geol* 256:23–38

E

Ercanoglu M (2005) Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (West Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 5(6):979–92

Erener A, Duzgun H (2012) Landslide susceptibility assessment: what are the effects of mapping unit and mapping method? *Environ Earth Sci* 66(3):859–77

Erener A, Mutlu A, Sebnem Düzgün H (2016) A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM). *Eng Geol* 203:45–55

Ermias B, Raghuvanshi TK, Abebe B (2017) Landslide Hazard zonation (LHZ) around Alemketema town, north Showa zone, Central Ethiopia - a GIS based expert evaluation approach. *Int Jr Earth Sci Engg* 10(1):33–44

F

Florentin, M. F. (s.d.). Étude des glissements des talus argileux.

Fall M, Azzam R, Noubactep C (2006) A multi-method approach to study the stability of natural slopes and landslide susceptibility mapping. *Eng Geol* 82:241–63

Feizizadeh B, Blaschke T (2012). Comparing GIS-Multicriteria Decision Analysis for landslide susceptibility mapping for the lake basin, Iran. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. <https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6352388>

Feizizadeh B, Jankowski P, Blaschke T (2014) A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Comput Geosci* 64:81–95

Felicísimo ÁM, Cuartero A, Remondo J, Quirós E (2012) Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study. *Landslides* 10(2):175–89

Fell R, Corominas J, Bonnard C, Cascini L, Leroi E, Savage WZ (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, on behalf of the JTC-1 joint technical committee on Landslides and engineered slopes. *Eng Geol* 102:85–98

Fell R, Whitt G, Miner A, Flentje PN (2007) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Aust Geomechanics J* 42(1):13–36

G

G., P. (1974). *Stabilité des pentes*. Techniques de l'ingénieur.

Garrett J (1994) Where and why artificial neural networks are applicable in civil engineering. *J Comput Civ Eng* 8:129–30

GEO-SLOPE (2011) SLOPE/W. GEO-SLOPE International, Calgary <http://www.geo-slope.com>

Girma F, Raghuvanshi TK, Ayenew T, Hailemariam T (2015) Landslide hazard zonation in Ada Berga district, Central Ethiopia – a GIS based statistical approach. *J Geom* 9(i):25–38

Gitirana G Jr, Santos MA, Fredlund MD (2008) Three-dimensional slope stability model using finite element stress analysis. *GeoCongress 2008*. Available at. [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)24](https://doi.org/10.1061/40971(310)24)

Goetz JN, Brenning A, Petschko H, Leopold P (2015) Evaluating machine learning and statistical prediction techniques for landslide susceptibility modeling. *Comput Geosci* 81:1–11

Gómez H, Kavzoglu T (2005) Assessment of shallow landslide susceptibility using artificial neural networks in Jabonosa River basin, Venezuela. *Eng Geol* 78(1–2):11–27

Goodman RE (1989) Introduction to rock mechanics, University of California at Berkeley, pp. 562

Gorsevski PV, Gessler PE, Foltz RB (2000) Spatial Prediction of Landslide Hazard Using Logistic Regression and GIS. In: Proceeding 4th International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling (GIS/EM4): Problems, Prospects and Research Needs, Banff, Alberta, Canada. *J Environ Manage* 57(4):296 [https://doi.org/10.1016/s0301-4797\(99\)90317-1](https://doi.org/10.1016/s0301-4797(99)90317-1)

Gorsevski PV, Gessler PE, Foltz RB, Elliot WJ (2006a) Spatial prediction of landslide Hazard using logistic regression and ROC analysis. *Trans GIS* 10(3):395–415

Gorsevski PV, Gessler PE, Jankowski P (2003) Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *J Geographical Syst* 5:223–51

Gorsevski PV, Jankowski P (2010) An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. *Comput Geosci* 36(8):1005–20

Gorsevski PV, Jankowski P, Gessler PE (2006b) An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control Cybern* 35(1):121–46

Guzzetti F, Cardinali M, Reichenbach P, Carrara A (2000) Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River basin, Central Italy. *Environ Manag* 25(3):247–363

CAS

Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31:181–216

Guzzetti F, Galli M, Reichenbach P, Ardizzone F, Cardinali M (2006) Landslide hazard assessment in the Alazzone area, Umbria, Central Italy. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 6:115–31

Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, Fiorucci F, Santangelo M, Chang KT (2012) Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Sci Rev* 112(1):42–66

Guzzetti F, Reichenbach P, Cardinali M, Galli M, Ardizzone F (2005b) Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology* 72(1–4):272–99

Guzzetti F, Stark CP, Salvati P (2005a) Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environ Manag* 36(1):15–36

H

HUYNH, D. V. (2005). Modélisation des glissements comme un problème de bifurcation. Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble.

Hack HRGK (1998) Slope stability probability classification, vol. 43. ITC Delft Publication, Netherlands, Enschede, p 273

Hamza T, Raghuvanshi TK (2017) GIS based Landslide Hazard Evaluation and Zonation - A case from Jeldu District, Central Ethiopia. *J King Saud Univ Sci* 29(2):151–65

Han L, Zhang J, Zhang Y, Lang Q (2019) Applying a series and parallel model and a Bayesian networks model to produce disaster chain susceptibility maps in the Changbai Mountain area, China. *Water* 11(10):2144

Haykin S (1999) *Neural networks: a Comprehensive Foundation*, second edition. Prentice Hall, New Jersey, p 818

He S, Pan P, Dai L, Wang H, Liu J (2012) Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. *Geomorph* 171–172:30–41. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.024>

Hoek E, Bray JW (1981) *Rock slope engineering (Revised Third Edition)*. Institute of Mining and Metallurgy, London, p 358

Huabin W, Gangjun L, Gonghui W (2005) GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Prog Phys Geogr* 29(4):548–67

Hungr O, Rawlings G (1995) Assessment of terrain hazards for planning purposes: Cheekye Fan, British Columbia. *Proceedings of 48. Canadian Geotechnical Conference, Vancouver*, pp 25–27 September 1995, 1: 509–17

Hutchinson JN (1995) Landslide hazard assessment: keynote paper. In: Bell DH (ed) *Landslides, A.A, Proceedings of the Sixth International Symposium on Landslides*. Balkema, Rotterdam, pp 1805–41

I

IAEG, Commission on Landslides (1990) Suggested nomenclature for landslides. *Bull. Int. Assoc. Eng Geol* 41:13–16

Ibsen M-L, Brunsden D (1996) The nature, use and problems of historical archives for the temporal occurrence of landslides, with specific reference to the south coast of Britain, Ventnor, Isle of Wight. *Geomorphology* 15(3–4):241–258

Intarawichian N, Dasananda S (2010) Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chem watershed, northern Thailand. *Suranaree J Sci Technol* 17(3):277–92

J

Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, Derron MH, Loye A, Metzger R, Pedrazzini A (2012) Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Nat Hazards* 61(1):5–28

Jade S, Sarkar S (1993) Statistical models for slope instability classification. *Eng Geol* 36(1–2):91–98

Jongmans D, Garambois S (2007) Geophysical investigation of landslides: a review. *Bull Soc Geol Fr* 178:101–12

K

Kanungo DP, Arora MK, Sarkar S, Gupta RP (2006) A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Eng Geol* 85:347–66

Kanungo DP, Arora MK, Sarkar S, Gupta RP (2009) Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping: a review. *J South Asia Disaster Stud* 2:81–105

Karaman K, Ercikdi B, Kesimal A (2013) The assessment of slope stability and rock excavatability in a limestone quarry. *Earth Sci Res SJ* 17(2):169–81

Kavzoglu T, Colkesen I (2009) A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 11(5):352–59

Kavzoglu T, Colkesen I, Sahin EK (2018) Machine learning techniques in landslide susceptibility mapping: a survey and a case study. *Adv Nat Technol Hazards Res* 283–301. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77377-3_13

Kavzoglu T, Kutlug Sahin E, Colkesen I (2014) An assessment of multivariate and bivariate approaches in landslide susceptibility mapping: a case study of Duzkoy district. *Nat Hazards* 76(1):471–96

Kavzoglu T, Sahin EK, Colkesen I (2013) Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11(3):425–39

Keefer DV (2000) Statistical analysis of an earthquake-induced landslide distribution—the 1989 Loma Prieta, California event. *Eng Geol* 58:231–249

Kulatilake PHSW, Wang L, Tang H, Liang Y (2011) Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses. *Comput Geotech* 38:846–60

Kuriakose SL (2010) Physically-based dynamic modelling of the effect of land use changes on shallow landslide initiation in the Western Ghats of Kerala, India. Ph.D. thesis. University of Utrecht, Utrecht ISBN 978–90–6164-298-5

L

Lan HX, Zhou CH, Wang LJ, Zhang HY, Li RH (2004) Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. *Eng Geol* 76:109–28

Lari S, Frattini P, Crosta GB (2014) A probabilistic approach for landslide hazard analysis. *Eng Geology* 182:3–14

Lee CT (2015) Review and perspectives on methodology for landslide hazard analysis: 10th Asian regional conference of IAEG (2015)

Lee CT, Huang CC, Lee JF, Pan KL, Lin ML, Dong JJ (2008) Statistical approach to storm event-induced landslides susceptibility. *Nat Hazard Earth Syst Sci* 8(4):941–60

Lee S (2005) Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sens* 26(7):1477–91

Lee S (2007) Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environ Geol* 50:847–55

Lee S, Min K (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin. *Korean Environ Geol* 40:1095–113. <https://doi.org/10.1007/s002540100310>

Lee S, Ryu JH, Min KD, Won JS (2003) Landslide susceptibility analysis using GIS and artificial neural network. *Earth Surf Process Landforms* 27:1361–76

Lee S, Ryu JH, Won JS, Park HJ (2004) Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Eng Geol* 71(3–4):289–302

Leroi E (1997) Landslide risk mapping: problems, limitation and developments. In: Cruden F (ed) *Landslide Risk Assessment*. Balkema, Rotterdam, pp 239–250

Lin ML, Tung CC (2003) A GIS-based potential analysis of the Landslides induced by the chi-chi earthquake. *Eng Geol* 71:63–77

Lipmann RP (1987) An introduction to computing with neural nets. *IEEE Assp magazine* 4:4–22

Liu Y-C, Chen C-S (2007) A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Eng Geol* 89(1–2):129–43

M

M., A.-I. (2001). Etude du glissement du talus de la gare Aomar P.F.E. sous . wilaya de Bouira: la direction de M. KHEMISSA.

Malamud BD, Turcotte DL, Guzzetti F, Reichenbach P (2004) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth SurfProcess Landforms* 29:687–711

Mandaglio MC, Moraci N, Rosone M, AiròFarulla C (2016) Experimental study of a naturally weathered stiff clay. *Can Geotech J* 53(12):2047–57

Menard S (1995) *Applied logistic regression analysis*. Sage University paper series on quantitative applications in social sciences, 106. Thousand Oaks, California, p 98

Mengistu F, Suryabhadgavan KV, Raghuvanshi TK, Lewi E (2019) Landslide Hazard zonation and slope instability assessment using optical and InSAR data: a case study from Gidole town and its surrounding areas, southern Ethiopia. *Remote Sensing of Land* 3(1):1–14

Meten M, Bhandary NP, Yatabe R (2015) Application of GIS-based fuzzy logic and rock engineering system (RES) approaches for landslide susceptibility mapping in Selelkula area of the lower Jema River gorge, Central Ethiopia. *Environ Earth Sci* 74(4):3395–3416

Metternicht G, Hurni L, Gogu R (2005) Remote sensing of landslides: an analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sens Environ* 98(2–3):284–303

Michoud C, Derron MH, Hortin P, Jaboyedoff M, Baillifard FJ, Loye A, Nicolet P, Pedrazzini A, Queyrel A (2012) Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:615–29

Mohammady M, Pourghasemi HR, Pradhan B (2012) Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: a comparison between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models. *J Asian Earth Sci* 61:221–36

Moung-Jin L, Won-Kyong S, Joong-Sun W, Inhye P, Saro L (2014) Spatial and temporal change in landslide hazard by future climate change scenarios using probabilistic-based frequency ratio model. *Geocarto Int* 29(6):639–62

N

Nandi A, Shakoor A (2009) A GIS based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Eng Geol* 110:11–20

Neaupane K, Achet S (2004) Use of backpropagation neural network for landslide monitoring: a case study in the higher Himalaya. *Eng Geol* 74(3–4):213–26

Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Sonmez H (2008) An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation

of landslide susceptibility maps. *Eng Geol* 97(3-4):171–91.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.004>

Nossin JJ (1989) Aerospace survey of natural hazards. *ITC journal*, 3-4: 183-88. On rock slope stability assessment. *Eng Geo* 89:129–43

P

Pachauri AK, Pant M (1992) Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Eng Geol* 32:81–100

Pack RT, Tarboton DG, Goodwin CN (1998) The Sinmap approach to terrain stability mapping. In: *Proceedings 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver*, A A Balkema. *Eng Geol Nat Hazards* 2;1157–66

Pan X, Nakamura H, Nozaki T, Huang X (2008) A GIS-based landslide hazard assessment by multivariate analysis *Landslides*. *J Jpn Landslide Soc* 45(3):187–95

Paola JD, Schowengerdt RA (1995) A review and analysis of backpropagation neural networks for classification of remotely-sensed multi-spectral imagery. *Int J Remote Sens* 16(16):3033–58

Pardeshi SD, Autade SE, Pardeshi SS (2013) Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *Springer Plus* 2:1–11

Parise M, Jibson RW (2000) A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake. *Eng Geol* 58:251–70

Pawley S, Hartman G, Chao D (2017) Landslide susceptibility modelling of Alberta, Canada: comparative results from multiple statistical and machine-learning prediction method. <https://doi.org/10.1130/abs/2017am-304456>

Book

Pradhan B, Lee S (2009) Landslide risk analysis using artificial neural network model focussing on different training sites. *Int J PhysSci* 4:001–015

Pradhan B, Lee S (2010) Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environ Modell Softw* 25:747–59

R

Raghuvanshi TK (2019) Governing factors influence on rock slope stability – Statistical analysis for plane mode of failure. *J King Saud Univ - Sci* 31(4):1254–63. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.01.002>

Raghuvanshi TK, Ibrahim J, Ayalew D (2014a) Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme—an approach for landslide hazard zonation. *J Afr Earth Sci* 99:595–612

Raghuvanshi TK, Kala PM, Singh M (2014b) Landslide Disaster Management and Reduction- An approach through Remote Sensing and GIS. In: Singh M, Singh RB, Hassan MI (eds) *Landscape Ecology and Water Management, Proceedings of International Geographical Union (IGU) Rohtak Conference, Vol-2, Advances in Geographical and Environmental Sciences*. Springer, Japan, pp 33–40

Raghuvanshi TK, Negassa L, Kala PM (2015) GIS based grid overlay method versus modeling approach – a comparative study for landslide Hazard zonation (LHZ) in Meta Robi District of west Showa zone in Ethiopia. *Egypt J Remote Sens Space Sci* 18:235–50

Razifard M, Shoaie G, Zare M (2018) Application of fuzzy logic in the preparation of hazard maps of landslides triggered by the twin Ahar-Varzeghan earthquakes (2012). *Bull Eng Geol Environ* 78(1):223–45

Reichenbach P, Rossi M, Malamud BD, Mihir M, Guzzetti F (2018) A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Ear Sci Revs* 180:60–91

Ripley B (1996) *Pattern recognition and neural networks*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, p 354

Book

Romana M (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope, *International Symposium on Role Rock Mechanics Zacatecas*, pp 49–53

. Ross TJ (2010) Fuzzy Logic with Engineering Applications. Available at:
<https://doi.org/10.1002/9781119994374>

Book

. Ruff M, Czurda K (2008) Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the eastern Alps (Vorarlberg, Austria). *Geomorphology* 94(3–4):314–324

S

. Saaty T (2008) Decision making with the analytical hierarchy process. *Int J Services Sci* 1(1):83–98

. Saaty TL, Vargas LG (2006) Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, Opportunities, Costs and Risks. Springer, New York

Soeters et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdury, 1999 ; Ardizzone et al., 2002 ; Dai et Lee, 2008 ; Van Westen et al., 2008

Safaei M, Omar H, Huat BK, Yousof ZBM, Ghiasi V (2011) Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantage and limitation. *Electron J Geotech Eng* 16:1619–50

. Sarkar S, Kanungo DP, Mehrotra GS (1995) Landslide hazard zonation: a case study in Garhwal Himalaya, India. *Moun Res Dev* 15(4):301–309

. Schicker R, Moon V (2012) Comparison of bivariate and multivariate statistical approaches in landslide susceptibility mapping at a regional scale. *Geomorphology* 161:40–57

. Selby MJ (1980) A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Z Geomorphol* 24:31–51

Sharma S, Raghuvanshi T, Anbalagan R (1995) Plane failure analysis of rock slopes. *Geot Geol Eng* 13:105–11

- . Simoni S, Zanotti F, Bertoldi G, Rigon R (2008) Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. *Hydrol Process* 22(4):532–45
- . Soeters R, Van Westen CJ (1996) Slope instability recognition analysis and zonation. In: Turner KT, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*. Transportation Research Board National Research Council, Special Report No 247, Washington, DC, pp 129–77
- . Sreedevi N, Yarrakula K (2016) Different techniques for landslide zonation mapping and landslide assessment: a review. *Indian J Sci Technol* 9(47)
<https://doi.org/10.17485/ijst/2015/v8i1/106518>
- . Stead D, Eberhardt E, Coggan JS (2006) Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. *Eng Geol* 83(1–3):217–35
- . Steger S, Brenning A, Bell R, Glade T (2016) The propagation of inventory-based positional errors into statistical landslide susceptibility models. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 16(12):2729–45
- . Straub D, Schubert M (2008) Modeling and managing uncertainties in rock-fall hazards. *Georisk* 2(1):1–15
- . Süzen ML, Doyuran V (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Eng Geol* 71:303–21
- . Swets J (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240(4857):1285–93

CAS

T

- . Tang H, Yong R, Ez Eldin MAM (2016) Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. *Bull Eng Geol Environ*. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0876-4>

. Thiebes B, Glade T, Bell R (2012) Landslide analysis and integrative early warning-local and regional case studies. In: Eberhardt E (ed) Landslides and engineered slopes: protecting society through improved understanding. Taylor & Francis Group, London, pp 1915–21

. Tien Bui D, Tuan TA, Klempe H, Pradhan B, Revhaug I (2015) Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides* 13(2):361–78

. Turner AK, Schuster RL (1996) Landslides: investigation and mitigation, Transportation Research Board Special Report 247. National Research Council, Washington, D.C, p 673

Turrini CT, Visintainer P (1998) Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy. *Eng Geol* 50:255–65

V

. Van Den Eeckhaut M, Vanwalleghem T, Poesen J, Govers G, Verstraeten G, Vandekerckhove L (2006) Prediction of landslide susceptibility using rare events logistic regression: a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium). *Geomorphology* 76(3–4):392–410

. Van Westen CJ (1993) Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. ITC Publication, vol. 15. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, p 245

. Van Westen CJ (1994) In: Price MF, Heywood DJ (eds) GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. Taylor and Francis, London, pp 135–65

. Van Westen CJ, Rengers N, Soeters R (2003) Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Nat Hazards* 30:399–419

. Van Westen CJ, Rengers N, Terlien MTJ, Soeters R (1997) Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geol Rundsch* 86(2):404–14

. Van Westen CJ, van Asch TWJ, Soeters R (2005) Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bull Eng Geol Environ* 65(2):167–184

. Van Western CJ (2002) Use of Weights of Evidence Modeling for Landslide Susceptibility Mapping, p 21

. Vapnik VN (1999) *The nature of statistical learning theory*, 2nd edn. Springer, New York

. Varnes D, IAEG (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. U N Sci Cult Organ, Paris, pp 1–6

. Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*, Transportation Research Board special report 247. National Academy Press, National Research Council, Washington, D.C

. Verstappen HT (1983) *Applied geomorphology: Geomorphological survey for environmental development*, vol xi. Elsevier Scientific Publishing Co, Amsterdam, p 437

W

. Wang X, Niu R (2009) Spatial forecast of landslides in three gorges based on spatial data mining. *Sensors* 9:2035–61

. Wu LZ, Huang RQ, Xu Q, Zhang LM, Li HL (2015) Analysis of physical testing of rainfall-induced soil slope failures. *Environ Earth Sci* 73(12):8519–31

Y

. Yagi H (2003) Development of assessment method for landslide hazardness by AHP. In: *Abstract volume of the 42nd annual meeting of the Japan Landslide Society*, pp 209–12

. Yalcin A (2008) GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. *Catena* 72:1–12

. Yesilnacar E, Topal T (2005) Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a moderate scale study, Hendek region (Turkey). *Eng Geol* 79:251–66

. Yin KL, Yan TZ (1988) Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. 5th international symposium on Landslides. *Lausanne* 2:1269–72

Z

. Zadeh LA (1978) Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility. *Fuzzy Sets Syst* 1:3–28

. ZainAlabideen K, Helal M (2016) Determination of the safe orientation and dip of a rock slope in an open pit mine in Syria using kinematic analysis. *Al-Nahrain Univ Alege Eng J* 91(1):33–45

. Zell A, Mache N, Hüttel M, Vogt M (1993) Simulation Neuronaler Netze auf Massiv Parallelen Rechnern. *Informatik aktuell* 495–502. https://doi.org/10.1007/978-3-642-78486-6_88

Chapter

. Zêzere JL et al (2004) Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazards and Earth System Science* 4(1):133–46

. Zhou C, Lee C, Li J, Xu Z (2002) On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 43:197–207

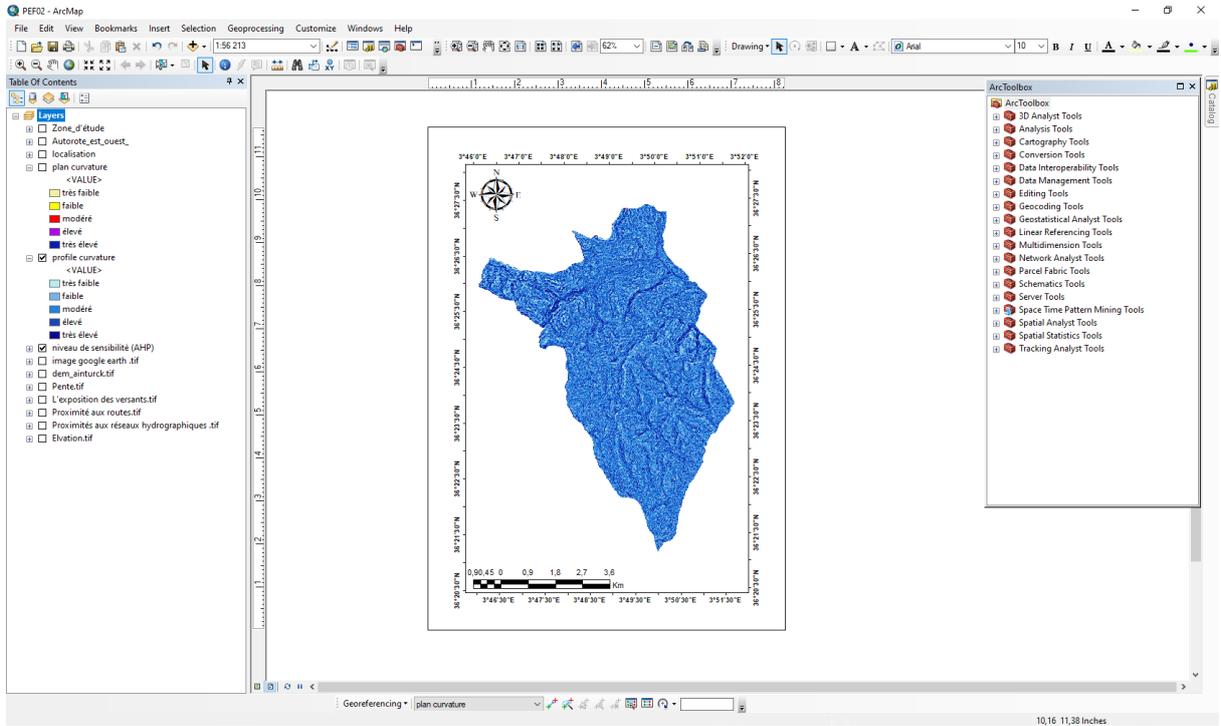
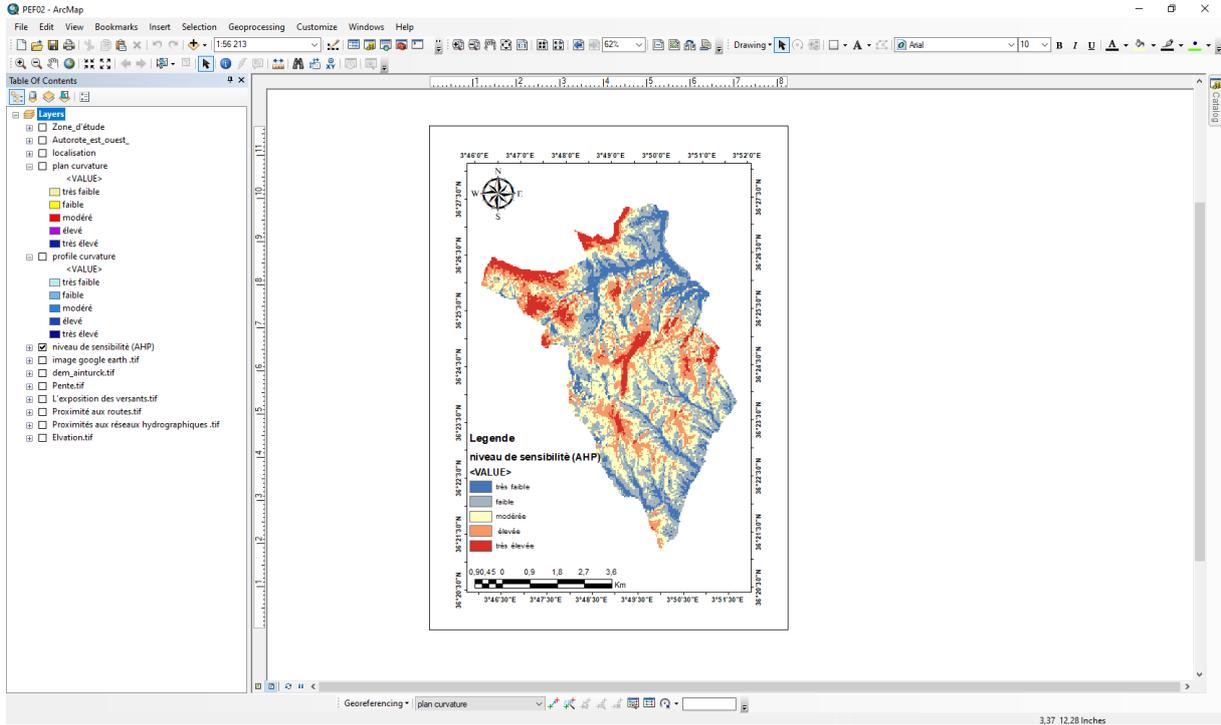
Annexes

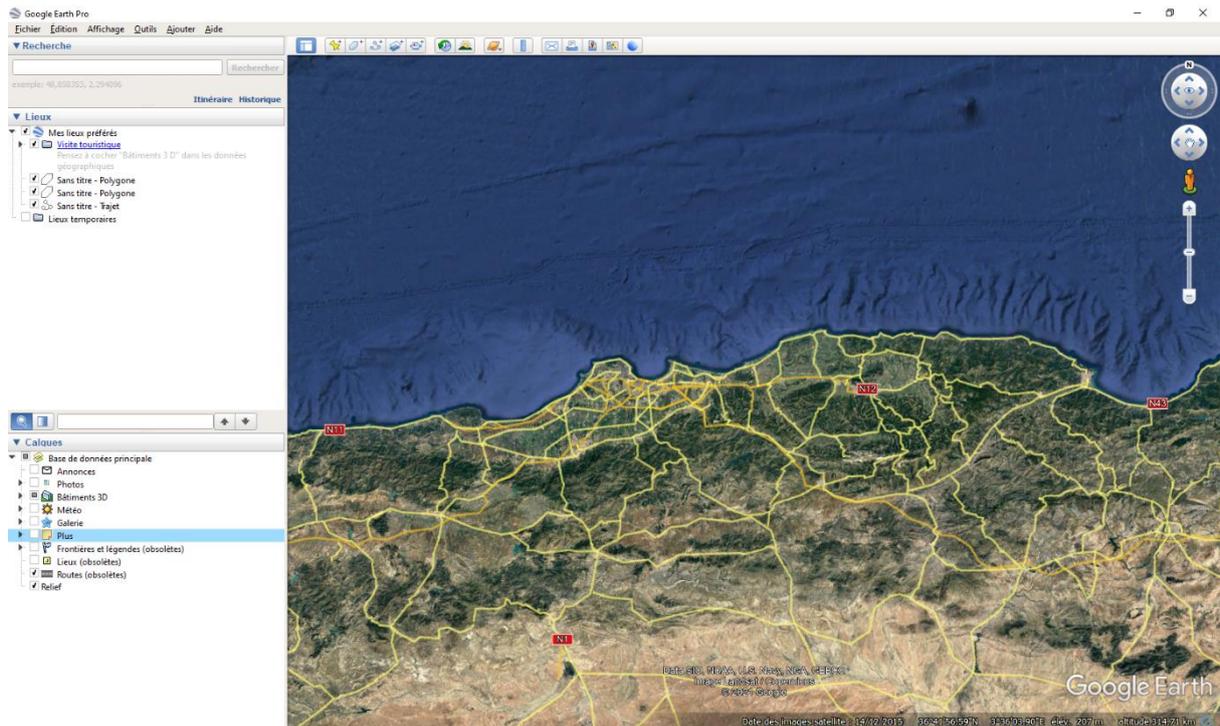
Photographies





Logicielles





Equations

$$w_i = \left(\prod_{j=1}^n w_{ij} \right)^{1/n}$$

$$T = |W_1 / \sum w_i \quad W_2 / \sum w_i \quad \dots \quad W_n / \sum I|$$

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

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n-1)}$$

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

Glossaire

- **Susceptibilité** C'est la possibilité que l'érosion se produise dans une zone particulière sur la base de conditions environnementales locales (Theriy et al., 2004).
- **The Jenks Natural Breaks Classification** (or Optimization) system is a data classification method designed to optimize the arrangement of a set of values into "natural" classes. A Natural class is the most optimal class range found "naturally" in a data set. A class range is composed of items with similar characteristics that form a "natural" group within a data set. This classification method seeks to minimize the average deviation from the class mean while maximizing the deviation from the means of the other groups. The method reduces the variance within classes and maximizes the variance between classes. It is also known as the goodness of variance fit (GVF), which equals the subtraction of SDCM (sum of squared deviations for class means) from SDAM (sum of squared deviations for array mean).
- **Risque Majeur** C'est la conséquence d'un aléa d'origine naturelle ou anthropique, dont les effets peuvent mettre en jeu un grand nombre de personnes, occasionner des dégâts importants et dépasser les capacités de réaction des instances directement concernées
- **Vulnérabilité** Elle se définit par le niveau d'endommagement potentiel d'un élément exposé donné soumis à l'action d'un phénomène pressenti ou déclaré, d'intensité donnée (Leone F., 2007).