



Université Mohamed El Bachir EL Ibrahimi  
Bordj Bou Arréridj  
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

Approches basées-SIG de l'évaluation de la susceptibilité des terrains aux mouvements des pentes dans la chaîne des Bibans (cas de la commune de Khelil, Nord-est de BBA)

Réaliser par :

**Bakhouche Abderrahmane**

Devant le jury composé de :

Dr. Noui Ammar	MCB	UBBA	Président
Dr. Hadji Rihab	MCA	UFAS	Encadreur
Dr. Achour Yacine	MCA	UBBA	Examineur
Dr. Mazouz Badis	MCB	UBBA	Examineur

Promotion : 2019/2020



# Remerciement

Tous d'abord, je tiens à remercier Dieu clément miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce travail de mémoire.

Cette mémoire est l'aboutissement de six mois de recherches. Que par ce travail soit exprimée toute ma gratitude et ma reconnaissance envers toutes les personnes qui ont apporté soutien et conseil tout au long de cette mémoire.

Je tiens à remercier Dr. Hadji R. de l'université de Sétif qui a assuré l'encadrement de cette mémoire tout au long de ces mois. Leurs conseils, leur disponibilité et leur enthousiasme m'ont été précieux pour mener ce travail à bien.

Je tiens vivement à remercier Mme Boudjellal R. de l'université de Tébessa, qui m'a aidé aussi dans le travail de cette mémoire.

Je remercie plus sincèrement Dr. Noui A. qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Mes plus sincères remerciements vont également aux membres de jury Dr. Achour Y. et Dr. Oussama K. qui ont accepté de relire et commenter cette mémoire.

Mes remerciements vont également au corps administratif et les enseignants du département de Génie Civil de l'université de Bordj Bou Arréridj.

Je désire grandement remercier les enseignants qui m'ont enseigné durant mon parcours universitaire qui m'ont fait découvrir avec passion leur métier et m'ont ainsi servi de modèles. Je tiens à remercier tout particulièrement Dr. Achour Y., Dr. Tabet S., Dr. Noui A, Dr. Bouglada M. S., Dr. Hammadou A.

J'adresse un grand merci à qui je dédie cette mémoire, à mes parents, à mon soutien moral mes frères et ma sœur qui m'a vraiment aidé.

## **Résumé**

Ce travail porte sur l'analyse de la susceptibilité de glissement de terrain dans la commune de khelil à Bordj Bou Arréridj. En employant deux méthodes à savoir : l'Analyse Multicritère Hiérarchique et le rapport de fréquence, nous prétendons élaborer une cartographie de la susceptibilité de mouvement de pente qui constituera un outil important pour l'aménagement du territoire et la gestion des risques, permettant de définir des zones prioritaires pour des études détaillées.

Dans le cadre de créer une carte de susceptibilité on a inventorié des mouvements de pente, avec un total de 82 emplacements, ont été créée à partir des images satellitaires et un grand travail sur le terrain. L'utilisation des logiciels SIG permet de créer, d'enregistrer, de classer, d'interpréter et de présenter les données nécessaires à la réalisation des modèles, et on a introduit dix paramètres pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de pente (SMP) à savoir les paramètres disponibles de prédisposition du milieu géologique (lithologie, fracturation, gradient de pente, hypsométrie, exposition des versants, TWI, réseau hydrographique, précipitations, occupation des sols , et NDVI) ont été cartographiés dans le but de mieux comprendre leurs interrelations et leurs effets respectifs dans la genèse des mouvements de pente.

En fin, les résultats sont discutés et comparés afin d'évaluer la concordance entre ces méthodes.

### **Mots clé :**

Mouvement des pentes

Susceptibilité

Analyse hiérarchique (AHP)

Rapport de fréquence (FR)

ROC (receiver operating characteristic)

La commune de Khelil

## **Abstract**

This study aims to apply the analytic hierarchy process and frequency ratio to the study of susceptibility to landslide in the municipality of Khelil in Bordj Bou Arréridj. This method is an important tool to use in the planning and management of natural risks.

Within the framework of realization of the susceptibility map we have inventoried slope movements, which has a total of 82 single slope movement locations was created based on aerial photo interpretation and extensive field surveys. The use of GIS software makes it possible to create, record, classify, interpret and present the data they need to carry out both models, and we have introduced ten parameters for assessment slope movements susceptibility (SMS). And they are the contextual variables that characterize the geological environment (lithology, fracturing, slope gradient, elevation, aspect, TWI (Topographic wetness index) stream's net, precipitation, land-use and, NDVI) were mapped and classified in order to better understand their interrelationships and their respective effects in the onest of SM.

In the end, the results are discussed and compared in order to evaluate the agreement between these methods.

### **Keywords:**

Slope movements

Analytic hierarchy process (AHP)

Frequency Ratio (FR)

ROC (receiver operating characteristic)

The commun of Khelil

## ملخص

تهدف هذه الدراسة الى تحليل قابلية التربة للانهيارات الأرضية في بلدية خليل ببرج بوعريريج باستخدام طريقتين: التحليل الهرمي متعدد المعايير (AHP) وتقرير التردد (FR)، ونحن نهدف إلى رسم خرائط قابلية التربة للانهيارات الأرضية التي ستكون أداة هامة لتخطيط في استخدام الأراضي وإدارة المخاطر، مما يسمح بتحديد المجالات ذات الأولوية للدراسات التفصيلية.

وكجزء من إنشاء خريطة القابلية للانهيارات الأرضية تم انشاء ما يسمى بخريطة الجرد لمواقع الانهيارات الأرضية والتي بلغ عددها في المنطقة 82 موقعا، تم إنشاؤها من تحليل صور الأقمار الصناعية والكثير من العمل الميداني. استخدام برمجيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) سمح لنا بإنشاء وتسجيل وتصنيف وتفسير وعرض البيانات اللازمة لتنفيذ نماذج قابلية التربة لانهيارات الارضية، وتم إدخال عشرة معلومات لتقييم قابلية التعرض لحركات المنحدرات، وهي المعلومات المتاحة في الموقع (الخصائص الصخرية، الصدوع، الميل، الارتفاعات، اتجاه المنحدرات، مؤشر الرطوبة الطبوغرافية (TWI)، مجاري المياه، تساقطات الأمطار، استخدام الأراضي ومؤشر الغطاء النباتي (NDVI)) من أجل فهم العلاقات المتبادلة والآثار الخاصة بكل منهما في نشأة لانهيارات الأرضية.

وفي النهاية، تجري مناقشة النتائج ومقارنتها لتقييم الاتساق بين هذه الطرق.

### الكلمات المفتاحية:

القابلية

الانهيارات الأرضية

التحليل الهرمي (AHP)

تقرير التردد (FR)

المنحنى المميز لأداء المستقبل (ROC)

بلدية خليل

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
Sommaire	
Acronymes	
Liste des figure	
Listes des tableaux	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 – Généralité et description de la zone d'étude.</b>	
1. Introduction .....	6
2. Situation géographique .....	6
3. La géologie de la zone d'étude .....	7
3.1. Cadre géologie régionale .....	7
3.2. La géologie locale .....	12
3.2.1. Lithologie .....	12
3.2.2. Les failles .....	14
4. Séismicité .....	15
4.1. Aperçue sur la séismicité de l'Algérie .....	16
4.2. Zonage sismique de notre zone d'étude .....	17
4.2.1. Zonage sismique de hamadache (1998) et aoudia et al (2000) .....	18
4.2.2. Zonage sismique (d'après CGS 2003) .....	22
5. Conclusion .....	23
<b>Chapitre 2- Etude Hydroclimatologique</b>	
1. Introduction .....	25
2. perçue sur climats de l'Algérie .....	25
3. Précipitation .....	26
3.1. Analyse des données de précipitations Caractéristiques temporelles des précipitations .....	27

3.2.	Rôles des pluies .....	28
4.	La température .....	29
5.	Les indices climatiques .....	30
a)	Indice d'aridité E. de Marton .....	30
b)	Le quotient pluviométrique d'Emberger .....	30
c)	Le mois sec .....	31
6.	Réalisation de la carte des précipitations .....	32
6.1.	Carte de la zone d'étude .....	35
7.	Réseau hydrographique .....	36
7.1.	Dynamique des eaux et dégradation des sols .....	36
8.	Conclusion .....	37

### **Chapitre 3- Généralité sur les mouvements de pente dans la zone d'étude**

1.	Typologie des mouvements de pente .....	39
2.	Classification .....	39
2.1	Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs .....	48
2.2	Les glissements .....	49
2.3	Les écoulements, ou coulées de masses .....	50
2.4	Sapement des berges .....	51
2.5	Ravinement .....	52
3.	Inventaire des mouvements de terrain de khelil .....	53
3.1	Données de base et cadre théorique de l'inventaire cartographique des MP .....	53
3.2	Qualité de la carte d'inventaire des MP .....	54
3.3	Synthés .....	55
4.	Conclusion .....	56

### **Chapitre 4 – Préparation des variables prédictives pour la cartographie de la susceptibilité.**

1.	Introduction .....	58
2.	Echelles d'analyse .....	59
3.	Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité .....	60
4.	Etapes de la modélisation de la susceptibilité sous SIG .....	62
5.	Préparation des variable prédictive et leur analyse .....	63
5.1	Les variables géométriques ou topographiques : gradient de pente, altitude et expositions, TWI (Facteur d'humidité topographique) .....	63
1)	Expositions .....	64
2)	Altitude et hypsométrie .....	66
3)	Gradient de pente .....	68
4)	Facteur d'humidité topographique .....	70
5.2	Lithologie .....	72

5.3	Densité des failles .....	75
5.4	Densité de réseaux hydrographique .....	77
5.5	Végétation .....	79
5.6	Occupation de sols .....	82
6.	Conclusions .....	83

**Chapitre 5- Méthodologie d'évaluation et de cartographie de la susceptibilité aux  
mouvement de pente**

1.	Introduction .....	85
2.	Application de la méthode rapport de fréquence ( Frequency Ratio ) .....	85
a)	Résultats et discussions .....	86
b)	Evaluation de la robustesse du modèle .....	89
3.	Application de la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytic Hierarchy Process, AHP) .....	90
a)	Résultats et discussions .....	93
b)	Evaluation de la robustesse du modèle .....	95
4.	Comparaison entre les deux approches cartographiques .....	96
5.	Conclusion .....	97
	<b>Conclusion générale</b> .....	98

**Référence bibliographique**

**Annexe**

## **Acronymes**

**ONS** : Offices National des statistiques

**ANRH** : Agences National des Ressources Hydrauliques

**CRAAG** : Centre de Recherche en Astronomie , Astrophysique et Géophysique

**USGS**: United States Geological Survey

**ESRI**: Environmental Systems Research Institute

**ASTER**: Advanced Spacebone Thermal Emission and Reflection Radiometer

**SIG**: Système d'Information Géographique

**MNT**: Modèle Numérique de Terrain = **DEM**: Digital Elevation Model

**IDW**: Inverse Distance Weighting

**AHP**: Analytic Hierarchy Process

**FR** : Frequency ratio (Rapport de fréquence)

**CI**: Indice de Cohérence **CR**: Ratio de Cohérence

**ROC**: Receiver Operating Characteristic

**AUC**: Area Under the Curve

## Liste des Figures

<b>Figure 1-</b>	Présentation de la zone d'étude .....	6
<b>Figure 2-</b>	Carte schématique de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale ( <a href="#">Chalouan et al., 2008</a> ). .....	7
<b>Figure 3-</b>	Schémas structural simplifié montrant la position de la zone d'étude : extrait de la Carte géologique de Boussellem à 1/50 000 ( <a href="#">Vila, 1977</a> ). Modifié .....	11
<b>Figure 4-</b>	carte lithologique simplifiée de la commune de khelil digitalisé à partir de la Carte géologique de Boussellem à 1/50 000 .....	12
<b>Figure 5-</b>	Carte synthétique de la fracturation de là de la zone d'étude. ....	15
<b>Figure 6-</b>	Schéma tectonique de la Méditerranée occidentale, d'après <a href="#">scalera (2005)</a> (BRGM zonage sismique de la Méditerranée occidentale) .....	16
<b>Figure 7-</b>	Synthèse cinématique en Europe-Méditerranée occidentale et centrale (d'après <a href="#">Nocquet,2002</a> ). .....	16
<b>Figure 8-</b>	Carte de séismicité de l'Algérie période 2002/2006 .....	17
<b>Figure 9-</b>	Zonage sismique du Nord de l'Algérie proposé par <a href="#">Hamadach (1998)</a> et caractéristiques sismiques des zones,.....	19
<b>Figure 10-</b>	Zonage sismotectonique du Nord de l'Algérie, d'après <a href="#">Aoudia et al (2000)</a> .....	20
<b>Figure 11-</b>	Carte des zones sismiques de l'Algérie ( <a href="#">RPA 99 Version 2003</a> ). ....	22
<b>Figure 12-</b>	Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (établie d'après <a href="#">Côte M., 1998a</a> ) .....	25
<b>Figure 13-</b>	Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989) .....	25
<b>Figure 14-</b>	Variations des précipitations moyennes mensuelles (1990-2017) .....	27
<b>Figure 15-</b>	variations interannuelles des hauteurs des précipitations (1990-2017) .....	28
<b>Figure 16-</b>	effet de précipitation sur terrain (badlands).....	29
<b>Figure 17-</b>	variations des températures moyennes mensuelles (1990-2017) .....	29
<b>Figure 18-</b>	Climatogramme d'Emberger. ....	30
<b>Figure 19-</b>	Diagramme ombrothermique de la zone d'étude. ....	31
<b>Figure 20-</b>	Précipitations moyennes inter-annuelles (1985-2017) intégrées dans l'interpolation. ....	32
<b>Figure 21-</b>	Carte de précipitation du bassin versant Soummam. ....	34

<b>Figure 22-</b>	Carte de précipitation de la zone d'étude. ....	35
<b>Figure 23-</b>	Réseaux hydrographique de la zone d'étude .....	36
<b>Figure 24-</b>	répartition des phénomènes hydrogravitaires et domaines de comportement, d'après <a href="#">Meunier, 1991</a> ; modifié par <a href="#">Malet, 2003</a> .....	46
<b>Figure 25-</b>	Exemple de chutes de pierre et de blocs dans le sud de la zone. ....	48
<b>Figure 26-</b>	Exemples de glissements provoqué par le séismes 2003 dans la zone d'étude.....	50
<b>Figure 27-</b>	Exemple de coulée de masse dans la zone d'étude. ....	51
<b>Figure 28-</b>	Exemple de sapement des berges conditionne un mouvement de pente sur la zone d'étude.....	52
<b>Figure 29-</b>	Exemple de ravinement sur le terrain. ....	53
<b>Figure 30-</b>	Cartes d'inventaire des mouvements de pente de la zone d'étude.....	54
<b>Figure 31-</b>	Histogramme comparatif du nombre de mouvement de pente identifiés par photo- interprétation et sur le terrain. ....	55
<b>Figure 32-</b>	Méthodes pour évaluer la susceptibilité et l'aléa glissement de terrain (d'après <a href="#">Soeters et van Westen ,1996</a> ; <a href="#">van Westen et al., 2006</a> ; <a href="#">fell et al., 2008</a> ; <a href="#">Corominas et al,2014</a> ).....	62
<b>Figure 33-</b>	Carte des expositions de la zone d'étude. ....	65
<b>Figure 34-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'exposition de pentes et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.....	66
<b>Figure 35-</b>	Carte hypsométrique de la zone d'étude.....	67
<b>Figure 36-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'élévation et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes. ....	68
<b>Figure 37-</b>	Carte du gradient de pente de là de la zone d'étude.....	69
<b>Figure 38-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes. ....	70
<b>Figure 39-</b>	facteur d'humidité topographique de la zone d'étude.....	71
<b>Figure 40-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes. ....	71
<b>Figure 41-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de lithologie et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes. ....	73
<b>Figure 42-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes des unités géotechnique de la zone d'étude et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.....	74

<b>Figure 43-</b>	Cartes de densité de la fracturation de la zone d'étude.....	76
<b>Figure 44-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de densité des failles et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.....	77
<b>Figure 45-</b>	Densité de réseaux hydrographique de la zone d'étude .....	78
<b>Figure 46-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de densité de réseaux hydrographique et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes .....	79
<b>Figure 47-</b>	Indice NDVI de la zone d'étude. ....	81
<b>Figure 48-</b>	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'indice NDVI et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.....	81
<b>Figure 49-</b>	Carte d'occupation des sols de la zone d'étude.....	82
<b>Figure 50-</b>	Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par FR.....	89
<b>Figure 51-</b>	Taux de réussite du modèle construit par FR.....	90
<b>Figure 52-</b>	Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par AHP.....	95
<b>Figure 53-</b>	Taux de réussite du modèle construit par AHP. ....	96
<b>Figure 54-</b>	Comparaison statistique entre les courbes de réussites calculées à partir des deux approches.....	96

## Listes des tableaux

<b>Tableau 1-</b>	légende (lithologie, âge) de la zone d'étude.....	13
<b>Tableau 2-</b>	tableau Zonage sismique du Nord de l'Algerie proposé par <a href="#">Hamadach (1998)</a> .....	19
<b>Tableau 3-</b>	Tableau du Zonage sismotectonique du Nord de l'Algérie, d'après <a href="#">Aoudia et al (2000)</a> . .....	21
<b>Tableau 4-</b>	Précipitations moyennes inter-annuelle intégrées dans l'interpolation, et leur positionnement géographique. ....	33
<b>Tableau 5-</b>	Classification des mouvements de terrain, <a href="#">K. TERZAGHI (1925)</a> .....	42
<b>Tableau 6-</b>	Classification Varne 1987. ....	44
<b>Tableau 7-</b>	Classification des MP selon des critères cinématiques, d'après <a href="#">Varnes, 1978</a> et <a href="#">Crozier, 1986</a> . E.R. : extrêmement rapide, T.R. : très rapide, R. : rapide, M. : modéré, L. : lent, T.L. : très lent, E.L. : extrêmement lent, adaptée par <a href="#">Campina, 2005</a> .....	45
<b>Tableau 8-</b>	Classification des mouvements de terrain selon des critères morphologiques et géométriques, d'après <a href="#">Varnes, 1978</a> , adaptée par <a href="#">Campina, 2005</a> . ....	46
<b>Tableau 9-</b>	Les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvement de versant (d'après, <a href="#">Maquaire, 2002</a> ; <a href="#">Van Westen et al, 2008</a> ). ....	60
<b>Tableau 10-</b>	Formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude .....	72
<b>Tableau 11-</b>	Légende géologique. ....	74
<b>Tableau 12-</b>	les poids des différents facteurs de prédisposition par la méthode (FR) .....	86
<b>Tableau 13-</b>	Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre .....	91
<b>Tableau 14-</b>	Echelle proposée par <a href="#">Saaty (1991)</a> .....	92
<b>Tableau 15-</b>	Valeurs de CA en fonction de l'ordre de la matrice .....	93
<b>Tableau 16-</b>	Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés.....	93

## INTRODUCTION GENERALE

La recherche menée par notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude des risques naturels à l'échelle du Nord-est Algérie. Il s'agit du champ scientifique de **la géomorphologie dynamique et quantitative** portant sur la définition, et la compréhension de la composante spatiale de **l'aléa géologique** qui est **la susceptibilité mouvement de pente** ou appelé également susceptibilité gravitaire. Il peut s'agir de phénomènes ponctuels, superficiels, profonds, limités dans le temps et dans l'espace, mais aussi de mouvements de grande ampleur affectant l'ensemble d'un versant (Malet, 2003). Ces mouvements de versants, le plus souvent gravitaires, constituent une famille très diversifiée et conduisent le plus souvent à l'interruption, l'endommagement ou la destruction des infrastructures et des biens causant un important préjudice socio-économique.

Les glissements de terrain font partie des **processus géomorphologiques** les plus répandus sur terre (Veyret, 2003; Shroder, 2011). Chaque année, ce phénomène engendre de nombreux dommages qui fragilisent considérablement les sociétés en nord algérienne (Hadjji et al. 2014; Hadji et al. 2016; Hadji et al. 2017a; Achour et al. 2018). Il est à l'origine de la destruction de nombreuses infrastructures routières (Achour et al. 2017; Dahoua et al. 2017a; 2017b), de bâtiments et dans certains cas, cause même, la perte de vies humaines (Hadjji et al. 2017b) même si elles sont rares.

### Intérêt scientifique

Evaluer la susceptibilité aux mouvements de pente présente un double intérêt, aussi bien scientifique que sociétal. D'un point de vue scientifique, comprendre les couplages entre ces différents processus participe à améliorer notre vision sur le comportement, l'occurrence et l'impact des mouvements de pente et donc une bonne maîtrise de leur prévention et prévision ainsi qu'une mitigation de leurs effets. Comment fonctionnent-ils ? Comment est-ce qu'ils évoluent ? Quels sont les mécanismes et facteurs contrôlant leur genèse ? Quelle est leur distribution spatiale et temporelle (si c'est possible) ? **L'analyse des 'mouvements de terrain' est une démarche résolument intégratrice, transdisciplinaire, et appliquée sur des bases naturelles.** « Cette science 'mouvement de terrain' est une science jeune pour laquelle beaucoup de connaissances sont encore à acquérir » (Hervas, 2003 ; in Malet, 2003).

## **Intérêt sociétal**

Pour notre société, **Les mouvements de pente** est un terme générique mais qui englobe en réalité plusieurs phénomènes (Cf. Chapitre 3, typologie). Le plus souvent, ils sont déclenchés par des précipitations intenses suite à un ébranlement sismique ou à l'action de l'homme comme dans le cas d'entaille des versants pour les routes. Les secteurs les plus susceptibles peuvent se caler mais sans se restreindre à celles-ci, sur les zones soumises à de grands aléas climatiques ou sismiques, mais aussi des activités anthropiques (Alexander, 1993 ; Ledoux, 1995 ; Hervas, 2003 ; Sossey Alaoui, 2005). Les questions scientifiques posées plus haut rejoignent un problème crucial de notre société : quels sont les endroits et les secteurs susceptibles d'être réaffectés par des mouvements de pente très dévastateurs et dommageables d'un point de vue socio-économique ? L'identification de ces secteurs est fondamentale pour les populations vivant au pied des Jbels et des versants fortement fracturés et de ce fait, se trouvent plus exposés à des mouvements de pente de type "écroulement, éboulement et chutes de pierres et de blocs". Il ne faut oublier cependant pas, que les décideurs souhaiteraient avoir des documents de bases bien adaptés et qui les aideront dans l'orientation de l'implantation des sites d'aménagement, les nouvelles extensions urbaines, les ponts les chaussées et les tracés de nouvelles routes. Pour mieux répondre à toutes ces questions, nous modélisons la susceptibilité aux mouvements de pente, au niveau de la zone de khelil par en utilisant les approches basées-SIG et en déduire les éventuels impacts sur l'aménagement et l'urbanisme.

## **Problématique et objectifs de la mémoire**

Les mouvements de pente gravitaires (mass movements) font partie des risques naturels auxquels l'Algérie se trouve confronté, notamment dans les régions Nord. Ceux-ci sont d'autant plus importants au niveau des zones faisant partie d'importants couloirs de failles, où la réactivation récente de celles-ci peut largement contribuer au déclenchement des mouvements de pente. Les conséquences d'un tel type de phénomènes peuvent être multiples : ensevelissement et destruction d'habitations, de ponts et de routes, ainsi que des pertes de vies humaines même si elles sont rares.

Le 07/08/2020 un séisme a été enregistré à Mila de magnitude  $M_w=4.9$  qui a pour conséquences des dégâts matériels suite à des glissements et écroulements causés par ce séisme (journal el waten) ; le 29/12/2019 un énorme glissement de terrain déclenché par une crue dans la willaya de Bouira plus exactement dans les communes à savoir : Saharidj , Aghbalou

et la RN 15 à Selloum qui a provoqué une déstructuration d'un quartiers entiers avec déférents réseaux (AEP, électricité , routes, ...etc. )(Journal Al Khaber ) ;le 12/11/2019 un glissement de terrain dans la région de Mehir à Bordj Bou Arréridj au niveau du chemin communal 41 qui a été engendré par des pluies intenses faisant des dommages à déférents réseaux (AEP , électricité , routes ) (Journal Annasr) ; le 14/10/2019 un glissement de terrain à Boumerdès provoqué par des pluies torrentiels qui a produit une panique au sein d'une cinquantaine de famille qui a mets leur vie en danger avec des dégâts matériels enregistrés (Journal El Waten);le 24/03/2018 une glissement de terrain à Mila qui a été la conséquence d'une succession d'intempérie qui en provoquant des dégâts matériels dans un collège et d'autres dégâts estimés par une expertise de valeur de 44 000 000, 00 DA (Journal El Waten) ;le 01/03/2015 un glissement de terrain avec écoulement à Bordj Bou Arréridj est plus exactement à Ben Daoud (Kassabia) a été provoqué par des précipitations intenses qui a engendré des dégâts matériels à savoir : déstructuration d'un quinzaine de maisons et fissuration d'une quarantaine d'autres maisons et des dommages ont été enregistrées dans déférents réseaux (Journal Annasr) ; le 24/05/2009 des glissements successives ont été enregistrées dans la région d'El Ach et Ghafsiten dans la willaya de BBA qui a été engendrées par des pluies intenses provoquants des fissurations d'une trentaine de maisons (Journal Annasr).

De ce fait, ces aléas engendrent des pertes très coûteuses pour l'économie nationale et son développement.

Et c'est pourquoi, le but de ce travail a été d'analyser la susceptibilité aux mouvements de terrain en se basant sur des approches basées-SIG. Ces approches sont focalisées sur le couplage entre modèles statistiques et probabilistes, ce, par l'intermédiaire de différentes fonctionnalités des Systèmes d'Information Géographique, et en particulier les modules d'analyse spatiale.

## **Organisation de la mémoire**

En plus d'une introduction et une conclusion notre mémoire est constituée de cinq chapitres.

**Le premier chapitre :** a été consacré à la description du cadre géographique, géomorphologique, et géologique, et sismique dela zone d'étude.

**Le deuxième chapitre :** concerne l'étude hydroclimatologique de la zone d'étude

**Le troisième chapitre** : dresse un état d'art sur les méthodes de classification des mouvements de terrain. Cela a permis de définir une typologie générale des mouvements de terrain rencontrés dans la zone d'étude. Ensuite, après avoir exposé la méthodologie et les différentes techniques utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain de notre secteur et leur caractérisation.

**Le quatrième chapitre** : c'est une généralité sur les méthodes de cartographies et préparation des données de prédisposition pour l'application de notre approche basée-SIG.

**Le cinquième chapitre** : concerne l'application de notre approche basée-SIG pour l'évaluation de la susceptibilité de la zone d'étude aux glissements de terrain.

## **CHAPITRE I : GENERALITE ET DESCRIPTION DE LA ZONE D'ETUDE**

---

### **Résumé du chapitre**

Ce chapitre se consacre à la description du cadre géographique, géomorphologique, et géologique et sismique du secteur d'étude. Dans ce sens, une synthèse du cadre lithologique et tectonique (failles) des différentes unités du secteur a été effectuée, sans oublier sa position dans la chaîne bibanique.

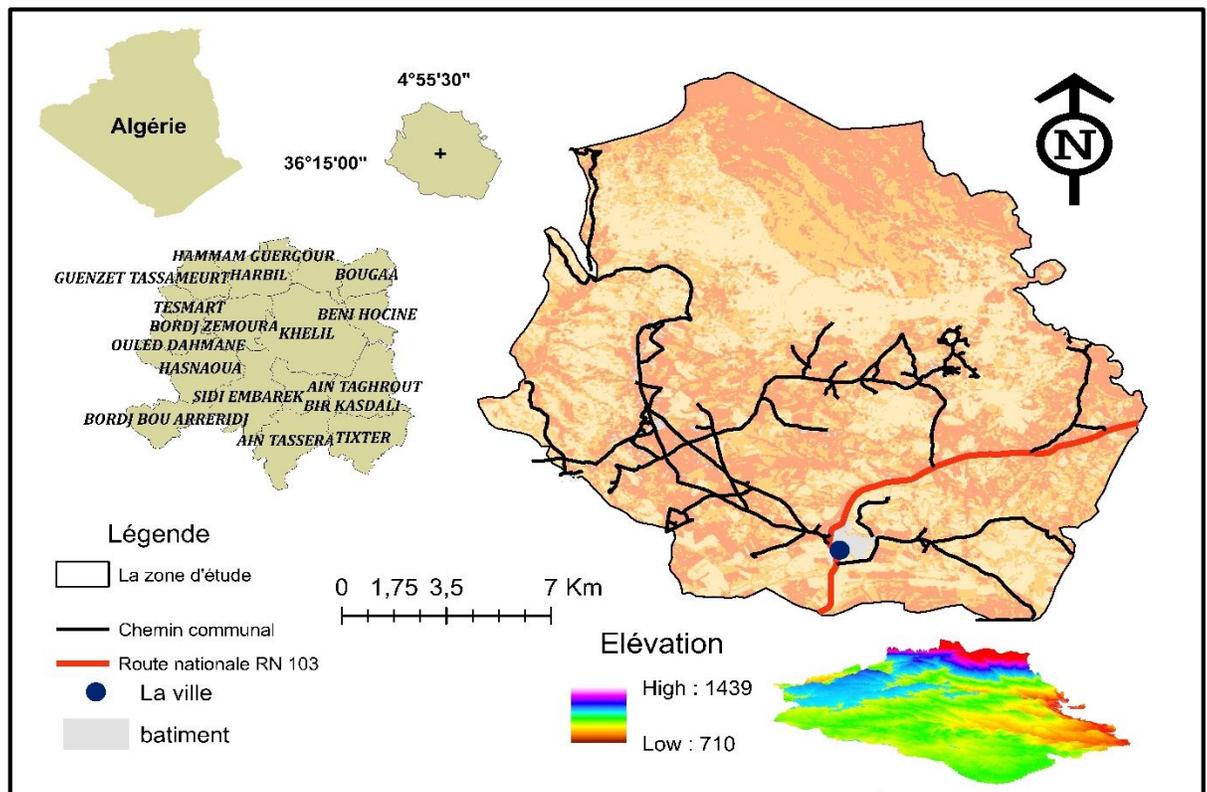
## 1. Introduction

Depuis le dix-septième siècle plusieurs chercheurs tel que Collin, Petterson, Fellenus, Bishop, Morgenstern, etc. se sont intéressé aux mouvements de pente notamment leurs morphologies, facteurs d'instabilité et causes, calcul et analyse de la stabilité des pentes. Ceci après les problèmes rencontrés fréquemment dans la construction des ouvrages, aménagement du territoire et urbanisation de nouveaux terrains. Par la suite, ce chapitre met les facteurs déterminants dans la genèse de ces événements.

## 2. Situation géographique

La commune de Khelil se situé au nord-est de la wilaya de Bordj-Bou-Argeridj NE Algérie ; à 25 km du chef lieux de la wilaya. La zone est cadrée par les coordonnées géographiques suivants : latitude  $36^{\circ} 19' 30''$  N,  $36^{\circ} 9' 0''$  N et de longitude  $4^{\circ} 54' 0''$  E ,  $5^{\circ} 7' 30''$  E (UTM 31N, WGS 1984).

La commune s'étend sur une superficie de 222.754 Km<sup>2</sup> et à une altitude entre 710 et 1439 mètres est peuplé selon le recensement 2008 de l'ONS de 26 037 habitants. Sa situation géographique appartient à une zone confrontée au risque mouvement des pentes.



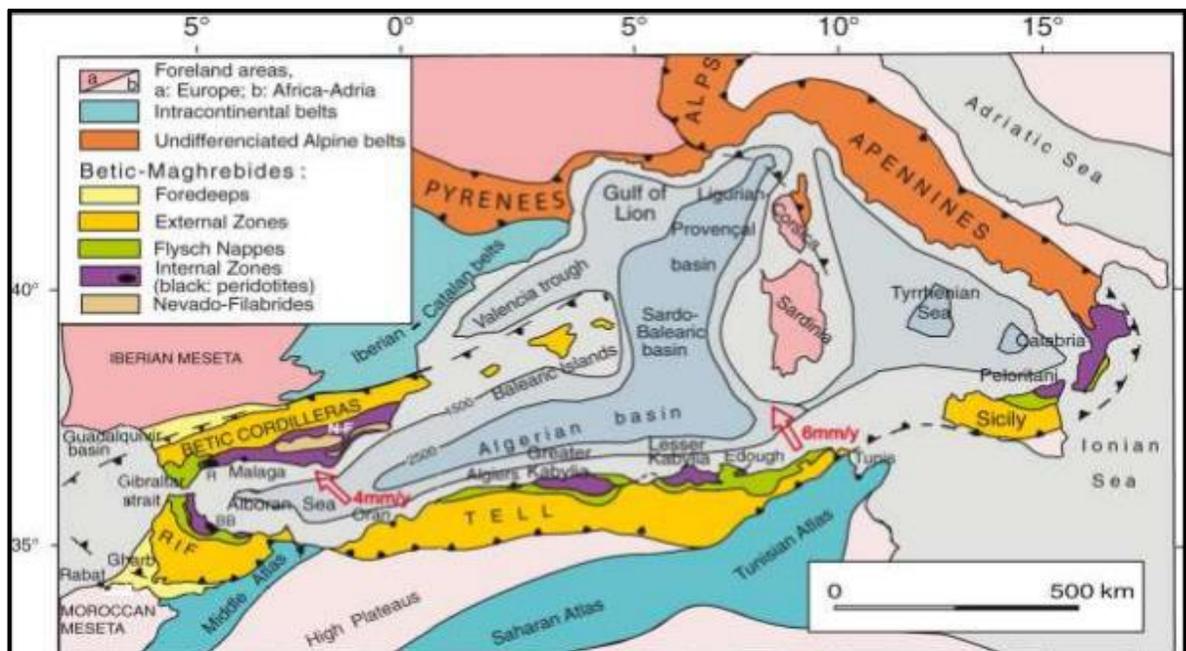
### 3. La géologie de la zone d'étude

Le faciès lithologique joue un rôle majeur dans l'équilibre des versants autant que naturelle (propriétés géotechniques des matériaux), ou structurale (disposition et pendage des couches géologiques). La géologie de notre secteur d'étude est d'une importance capitale dans l'occurrence et la distribution spatiale des mouvements de pente. La plupart des phénomènes inventoriés s'avèrent être liés à la présence d'argiles, marnes, flyschs, et schistes, à des caractéristiques mécaniques médiocres des argiles (riches en smectite); dissolution du gypse, à une infiltration des eaux essentiellement au niveau des alternances calcaires-argiles et argile-marnes sensibles aux variations de la teneur en eau.

#### 3.1 Cadre géologie régionale

La chaîne Alpine d'Algérie s'articule sur le Rif et constitue la chaîne tello rifaine (Wildi, 1983) qui représente le segment occidental de la chaîne des Maghrébide (Durand-Delga, 1980). L'édifice de cette chaîne résulte de la structuration de bassin magrébin et de ces marges, bassin qui se situe entre les marges continentales africaines et européennes.

La chaîne Alpine d'Algérie se caractérise par des structures en nappe à vergence Sud et une unité orogénique du Nord vers le sud on a :



**Figure 2 :** Carte schématique de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (Chalouan et al., 2008).

○ **Domaine interne**

Est caractérisé par la dominance des affleurements de socle métamorphique de nature variée, comprenant localement des formations catazonales et des péridotites.

○ **Domaine de flyschs**

Il se caractérise par des formations de plaines abyssales mises en place par des courants de turbidité. Ces formations ont été subdivisées en trois groupes :

-Les flyschs de Guerrouche ou les flyschsMaurétaniens (proposé par [Gelard, 1969](#)) ;

-Les flyschschisto-quartzux ou albo-aptien (de [Glangeaud, 1932](#)) ;

-Les flyschsNumudien.

○ **Domaine externe**

Les zones externes qui résultent du décollement et du clivage de **la couverture sédimentaire** déposée sur la marge Nord de la plaque africaine ([Chouabi, 1987](#)), forment un empilement complexe de nappes à **matériel marneux et calcaire** d'âge Mésozoïque-Cénozoïque. Ce domaine est représenté par les séries Telliennes, les séries d'avant pays allochtone et les séries de l'avant pays Atlasique autochtone ([Chadi, 2004](#)).

La commune de khelil fait partie, selon cette subdivision, au **domaine externe**, plus exactement aux **nappes tellienns** . Ces nappes sont constituées par de plusieurs unités largement décalées les unes par rapport aux autres.

**Les séries tellienns** : Il s'agit de séries très **épaisses à dominante marneuse** issue du sillon Tellien, lui-même subdivise en trois grandes unites ([Vila,1980](#)) qui sont du nord vers le sud (les unités ultratelliennes,les unités telliennes sensu stricto,les séries penitelliennes et les unites méridionales à nummulites).

Notre commune est située à Les unités telliennes sensu stricto.

**-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 marneuxà argilo-calcaire, l'Eocène se caractérise par des marnes épaisses et l'yprésien est calcaireux. Ces nappes telliennes empilées sur des surfaces considérables qui s'étendent depuis les chainons côtiers des Babors jusqu'aux premières pentes des Monts du Hodna.

Elles peuvent se rassembler en cinq groupes.

- Les nappes Baboriennes; .
- Les unités Bibaniques;
- Les nappes de Djemila, beniAdallah, Barbacha Dra el ArbaErragrène;
- Les unités Gouraya-Arbalou-Brek;
- Les nappes Sétifiennes à matériel Eocène.

Notre commune est composée de 5 unités à savoir :

- **La nappe de type Draa el Arba**

Se développe largement entre Zemmoura à l'Ouest et le Bou Sellam à l'Est et est en partie masquée par les terrains récents du Dra er Ragouba. La monotonie de ses faciès où dominant les marnes, rend conjecturale toute tentative de déchiffrement de sa structure interne. Les intercalations calcaires qui marquent le Maestrichtien près des OuladDjelloul indiquent toutes une structure tranquille et assez lourde. Aucune charnière n'est visible. Le contact de base n'est jalonné par du Trias qu'au Sud de Zemmoura.

- **La nappe bibanique**

Constitue un des centres d'intérêt majeurs de cette feuille. Cette unité est disposée comme un vaste anticlinal couché vers le Sud dont la culmination se situe un peu au Nord de Guenzet. Le flanc inverse de ce dispositif est visible au Nord du TenietHaouch. Sa série inverse se prolonge vers le Nord sur la feuille d'A. Roua dans la vallée de l'Oued ben Sabah où elle apparaît en fenêtre. Que nombreux replis isoclinaux à vergence sud compliquent cette structure. Un petit chevauchement pince un synclinal WSW-ENE un peu au Sud de Titest. Le contact de base de la nappe bibanique recoupe toutes ces structures ainsi que la schistosité de plan axial qui les accompagne. Dans les écaillés qui marquent ce contact un peu à l'Est de la maison forestière de Bialel, cette schistosité intéresse même le Sénonien inférieur.

- **La nappe de Djemila**

Présente au Nord de la feuille une structure relativement simple car il s'agit d'une série à l'endroit affectée de faibles replis, à vergence sud. Son aspect est particulièrement calme le

long de l'Oued bouSellam, au Sud du Djebel Guergour. Il n'en est pas de même au Sud à Ain Taghrout où apparaissent des plis couchés qui redoublent les barres calcaires du Sénonien

○ **L'unité inférieure à matériel éocène**

N'est visible que dans le coin sud-ouest de la feuille à la faveur de l'anticlinal posthume des Oulad Hanech et aussi sur le bord sud près de Khelil (ex-Davoust). Les relations de cette unité ne sont analysables que sur la feuille voisine d'Ain Taghrout. Son contact de base y est visible dans le talus nord de la route de Sétif à Ain Taghrout, à quelques centaines de mètres de cette localité.

Le faciès de l'Eocène, riche en débris indique que cette unité peut représenter la couverture décollée d'une partie de la nappe de Djemila sous-jacente et par ailleurs dépourvue d'Eocène plus au Nord sur de vastes surfaces.

○ **Les Djebels Guergour et Anini**

Comme nous l'avons vu précédemment apparaissent en fenêtre sous la nappe de Djemila. Leur histoire nous est inconnue après le Sénonien. On sait seulement qu'un karst s'est développé et qu'il a été comblé par des composés essentiellement ferrifères. La fracturation de cet ensemble est complexe et rend délicate l'analyse stratigraphique. Elle a débuté dès le Sénonien puisque ce dernier est de nature conglomératique et s'est poursuivie avant la mise en place de la nappe de Djemila. En effet de nombreuses fractures dans le Cénomano-Turonien néritique ne passent pas dans la nappe de Djemila. Cet ensemble Guergour-Anini est demeuré tabulaire.

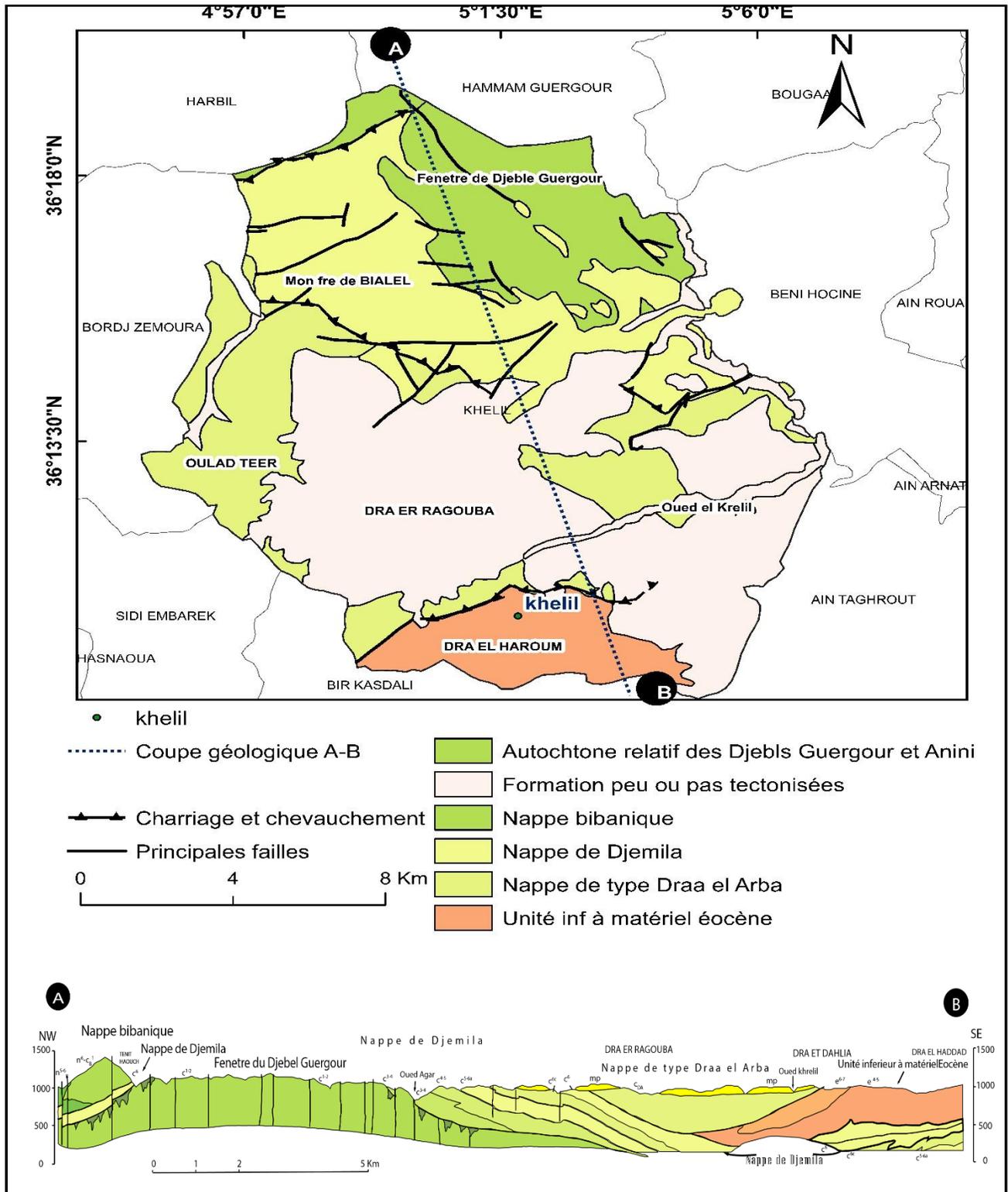
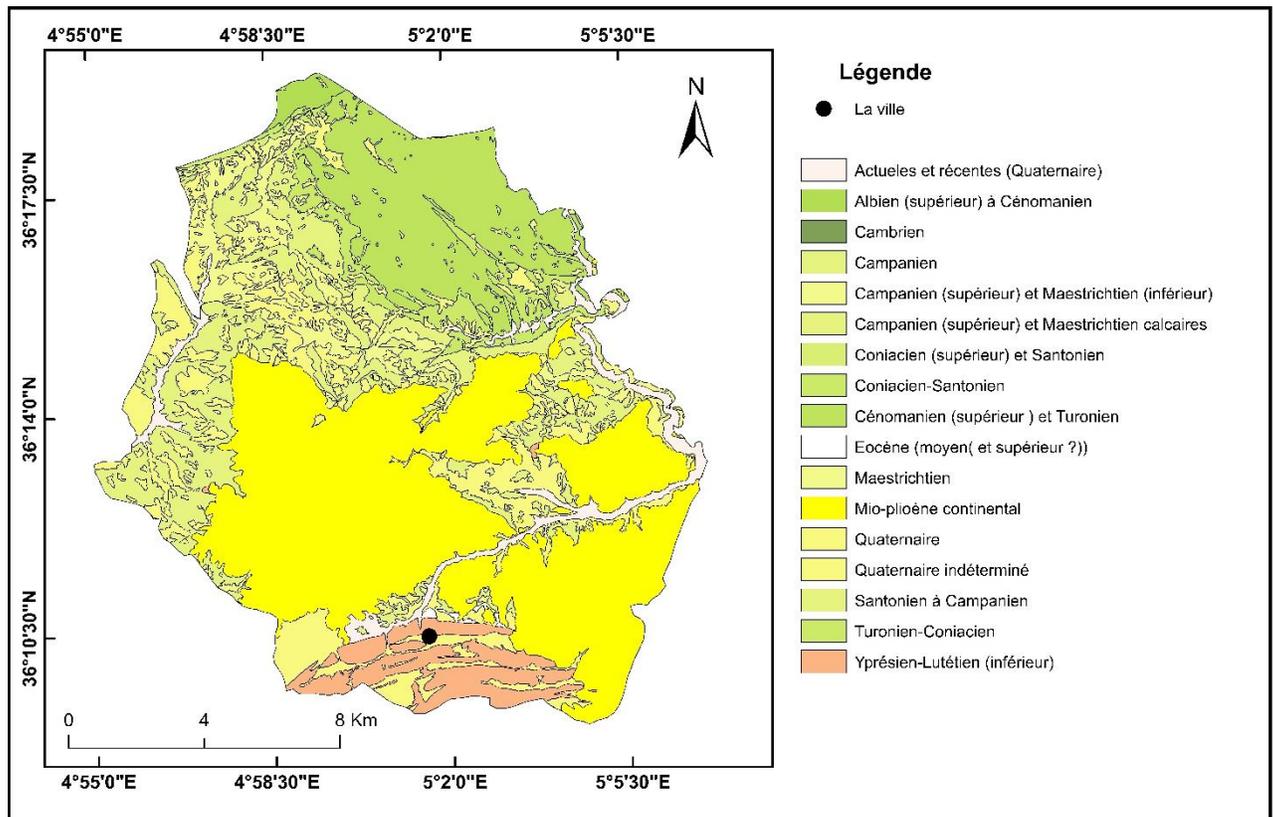


Figure 3 : Schémas structural simplifié montrant la position de la zone d'étude : extrait de la Carte géologique de Boussemlem à 1/50 000 (Vila, 1977). Modifié

## 3.2 La géologie locale

### 3.2.1 Lithologie

La carte des faciès de la zone d'étude a été digitalisée par logiciel ArcGIS 10.1 à partir de la carte géologique la Carte géologique de Boussellem à 1/50 000 (Vila, 1977).



**Figure 4 :** Carte lithologique simplifiée de la commune de khelil digitalisé à partir de la Carte géologique de Boussellem à 1/50 000

**Tableau 1** : légende (lithologie, âge) de la zone d'étude.

					Légende							
Eon	Ere	Période	Epoque	Etage	Age	Lithologie						
Phanérozoïque	Cénozoïque	Quaternaire			Actuel e récent	Alluvions						
					Quartenaire	Eboulis blocs, Eboulis à gangue marneuse						
					Quartenaire indéterminé	Terre arables formation des pente						
		Néogène	Pliocène			Moi-Pliocène continentale x	Argile et conglomérats					
								Miocène				
		Paléogène										
								Eocène	Lutétien	Eocène	Marne noire	
									Yprésien	Yprésien-Lutétien(inf)	Calcaires massifs bitumineux Facières à Globigérines (calcaires)	
		Mésozoïque	Crétacé		Supérieur	Maestrichtien	Campanien (sup) et maestrichtien inferieur	Marne grises ou noire Marneux sombre à boules jaunes				
	Maestrichtien						Marnes noire					
	Campanien (sup) et maestrichtien calcaire						Marno-calcaires					
	Campanien					Campanien	Marne jaune ou grises					
	Santonien					Coniacien (sup) et santonien	Alternances marne et micrites					
						Santonien à Campanien	Alternances marnes grises et petits banc calcaires					
	Coniacien					Coniacienne-Santonien	Marnes grises et calcaires					
	Turonien					Cénomaniens (sup) et Turonien	Dolomis, calcaires					
						Turonien-coniacien	Marnes et micrites					
	Cénomaniens					Albien (sup) à cénomaniens	Calcaires marneux, Marnes grises					

			Inferieur	Albien			
Paléozoïque							
	Cambrien				Cambrien	Karst minéralisé	

La géologie de la zone d'étude présente des **formations médiocre** pour l'équilibre des versants (La marne, Argile, Alluvions) avec une superficie importante.

• **Les unités géotechniques (UG) et morphologiques définies dans cette étude sont :**

Dans notre zone d'étude nous intéressent aux glissements qui affectent les matériaux meubles ou roches tendres (les schistes argileux, les argiles, les marnes etc...).

Nous avons procédé à la détermination des unités géologiques caractérisées par des propriétés lithologiques **les plus homogènes possible**.

**UG1** : argiles et conglomérats, calcaires lacustres, Eboulis à gangue marneuse, marnes noires à boules et lentilles jaunes, Terres arables, formation des pente, alluvions, Alluvions.

**UG2** : marnes jaunes ou grises à bancs lenticulaires de micrites noires ou grises et à boules jaunes abondantes, marnes noires, marneux sombre à boules jaunes abondantes, marnes écailleuses grises ou noires à boules jaunes, marnes et micrites (Rosalines et calciphères) avec repère à silex, alternances de marnes et de micrites à Rosalines.

**UG3** : Faciès à Globigérines (calcaires), marnes grises, petits bancs de marno-calcaires gris, calcaires massifs bitumineux blancs à cassure noire et silex noirs.

**UG4** : Eboulis à blocs, barre de marno-calcaires bien réglés à Inocérames et débris divers, alternances de marnes grises et de calcaires à débris d'Ostréides, Dolomies, Calcaires, Calcaires marneux noire et marnes grises, karst minéralisé.

### 3.2.2 Les failles

L'activité tectonique héritée et récente peut intervenir sur un mouvement de pente dans les zones de terrain déjà fragilisés, soit en pré-conditionnant le matériel soit en tant que déclencheur (trigger) lors d'une crise sismique (Compina, 2005). Il est évident que le réseau de fractures favorise l'**infiltration de l'eau**, entraînant ainsi une augmentation de la **pression interstitielle** et une réduction de la **résistance au cisaillement** des sols (Chaouki, 1991 ; El Khatabi, 2001). Une fois que ces derniers arrivent à saturation, le mouvement est déclenché par la surcharge hydraulique avec formation d'un plan de cisaillement profond (El Khatabi, 2001 ; Malet 2003). Dans cette section, nous avons réalisé la carte de fracturation totale de notre secteur d'étude. Pour ce faire, nous avons adopté :

La numérisation de toutes les failles, fait à partir de la Carte géologique de Boussellem à 1/50 000 (Vila, 1977).

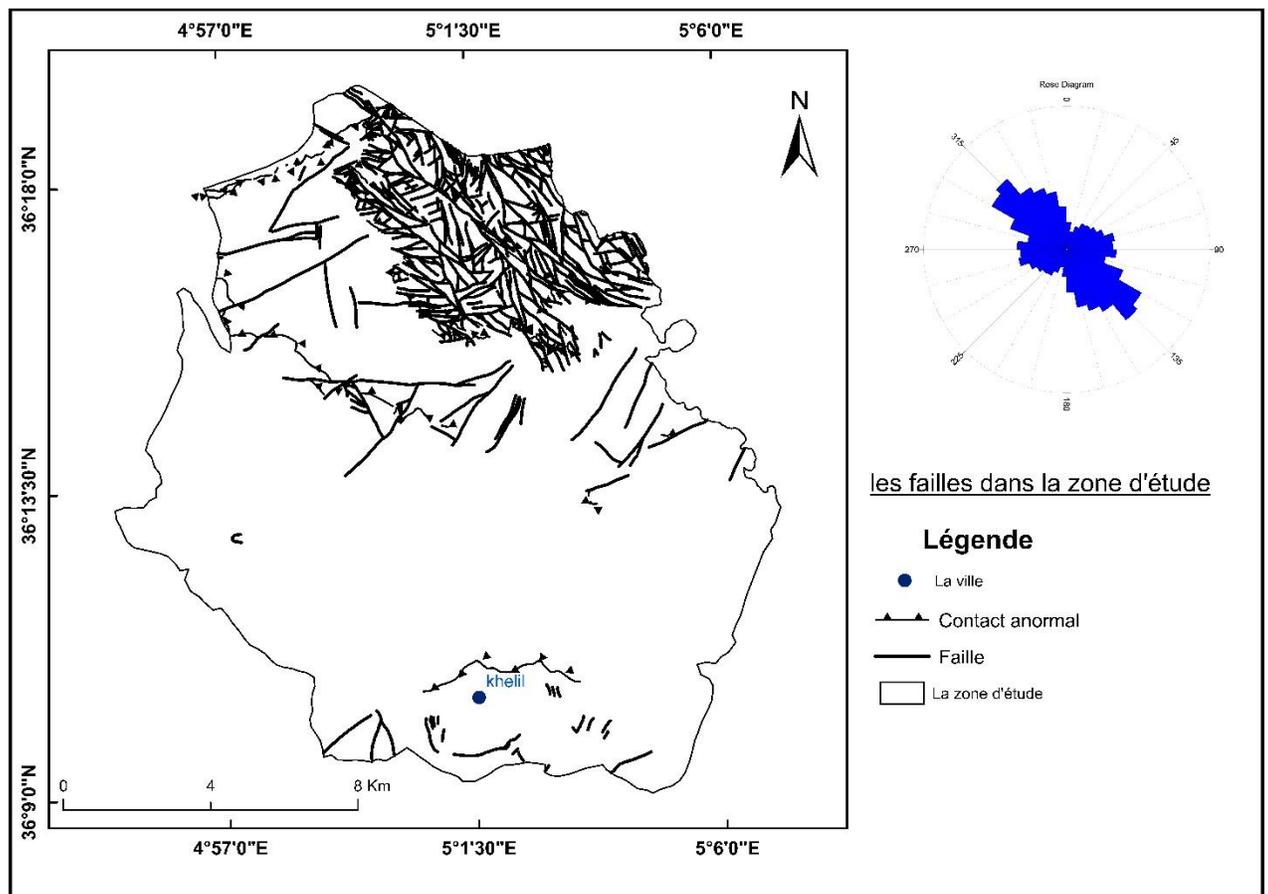


Figure 5 : Carte synthétique de la fracturation de la zone d'étude.

## 4. Séismicité

Les vibrations provoquées par les séismes sont responsables du déclenchement de mouvements de pente très variés tels que glissements, chutes de blocs ou écroulements, soit par action mécanique directe, soit par la modification des pressions interstitielles.

Des phénomènes plus spécifiques se produisent également, comme des glissements à morphologie particulière, survenant dans des sites sujets à la liquéfaction de couches sableuses ou soumis à une forte amplification des vibrations.

### 4.1 Aperçu sur la séismicité de l'Algérie

Le centre de recherche en astronomie astrophysique et géophysique (CRAAG) a énoncé que la sismicité de l'Algérie du nord est connue depuis 1365 ; Le rapprochement des plaques Eurasiatique et Africaine entraîne l'occurrence d'une activité sismique.

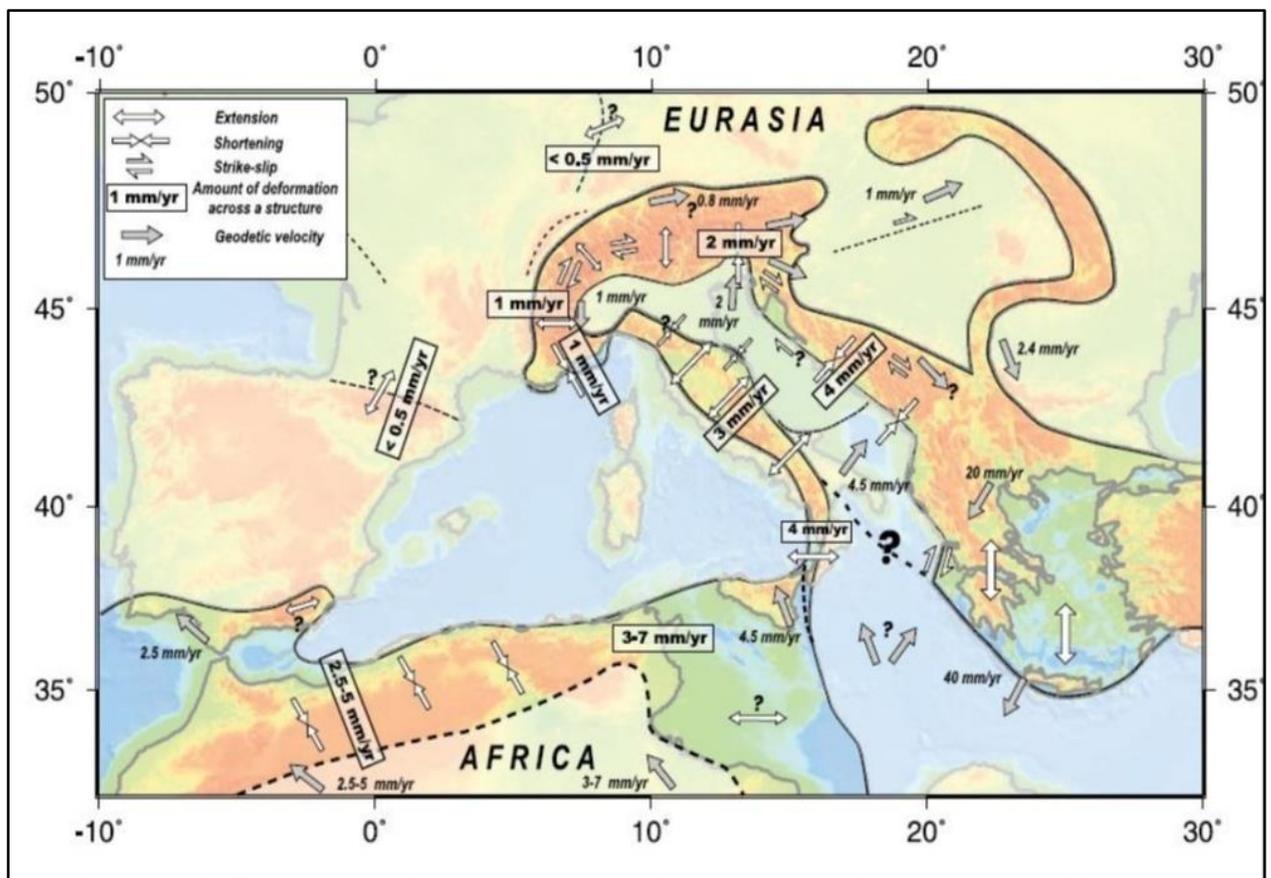
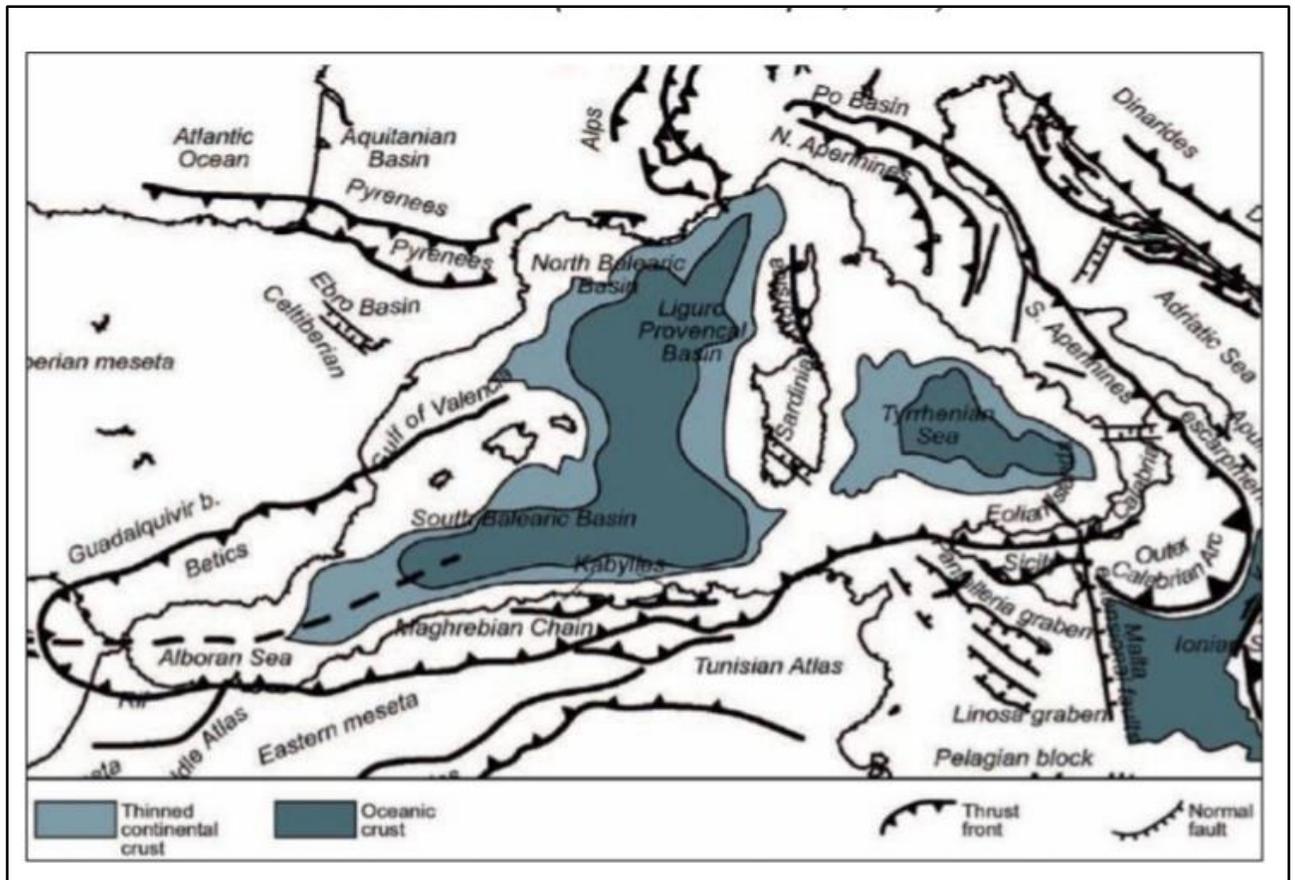


Figure 6 : Schéma tectonique de la Méditerranée occidentale, d'après [scalera \(2005\)](#)

(BRGM zonage sismique de la Méditerranée occidentale)



**Figure 7 :** Synthèse cinématique en Europe-Méditerranée occidentale et centrale (d'après [Nocquet,2002](#)).

Celle-ci est concentrée essentiellement dans la partie nord du pays :

La région tellienne est la plus active, dans cette région se produit la plus grande activité et les séismes les plus importants.

- **La région des Hauts Plateaux** est beaucoup moins active que la région Tellienne.
- La sismicité enregistrée à l'Est de l'Algérie est faible à modérée  $M \leq 5.5$  ([Ouyed et al., 1983](#) ; [Meghraoui, 1988 & 1996](#) ; [Bounif et al., 2003](#), [Delouis et al., 2004](#) ; [Yelles-Chaouche et al., 2004](#)).

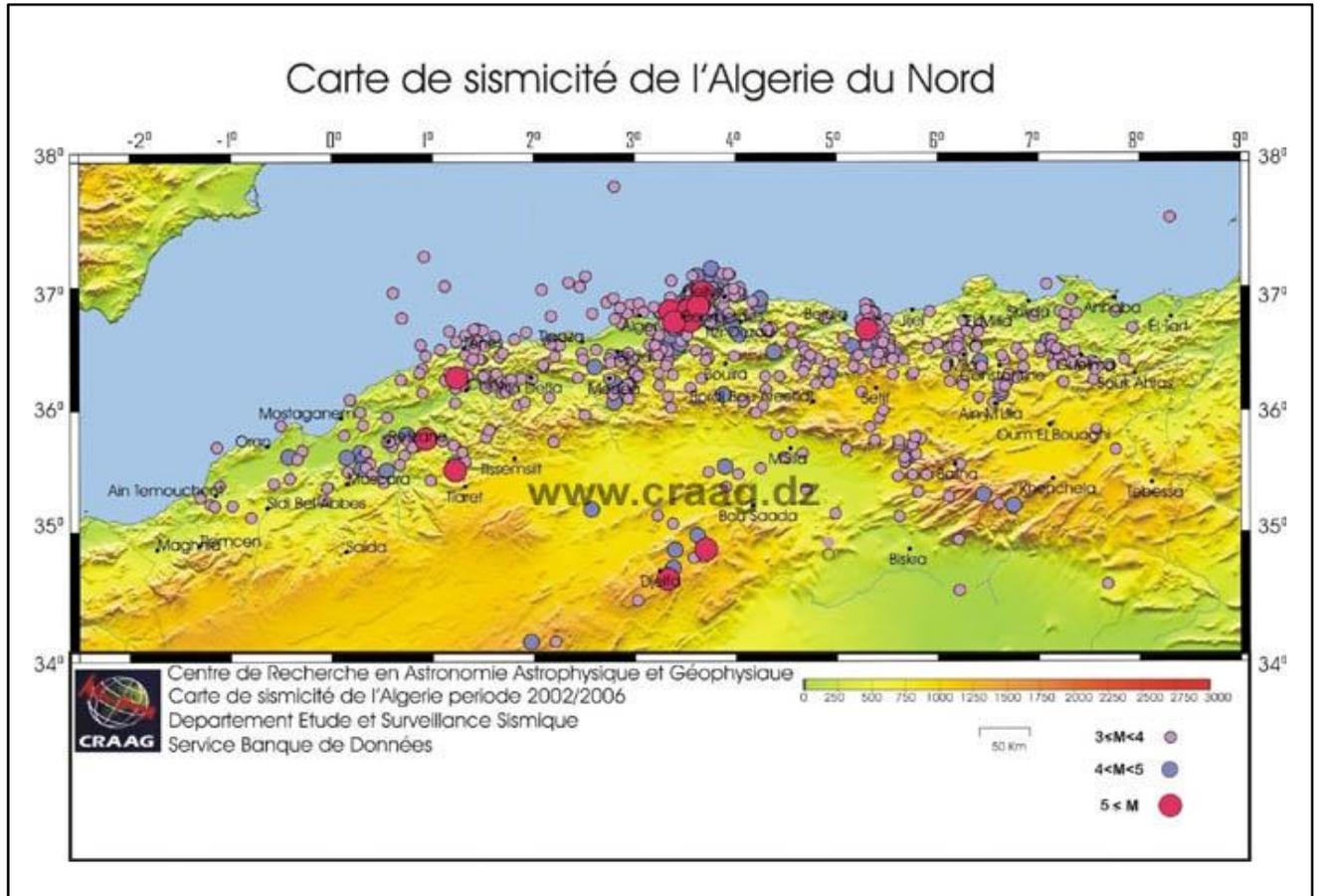


Figure 8 : Carte de séismicité de l'Algérie période 2002/2006

Sources : <https://www.craag.dz/index.php>

#### 4.2 Zonage sismique de notre zone d'étude

La cartographie des événements historique permet de connaître la localisation des **régions sismogènes**, mais aussi d'établir une zonation sismique du territoire.

Quatre zones majeures de sismicité sont ainsi mises en évidence :

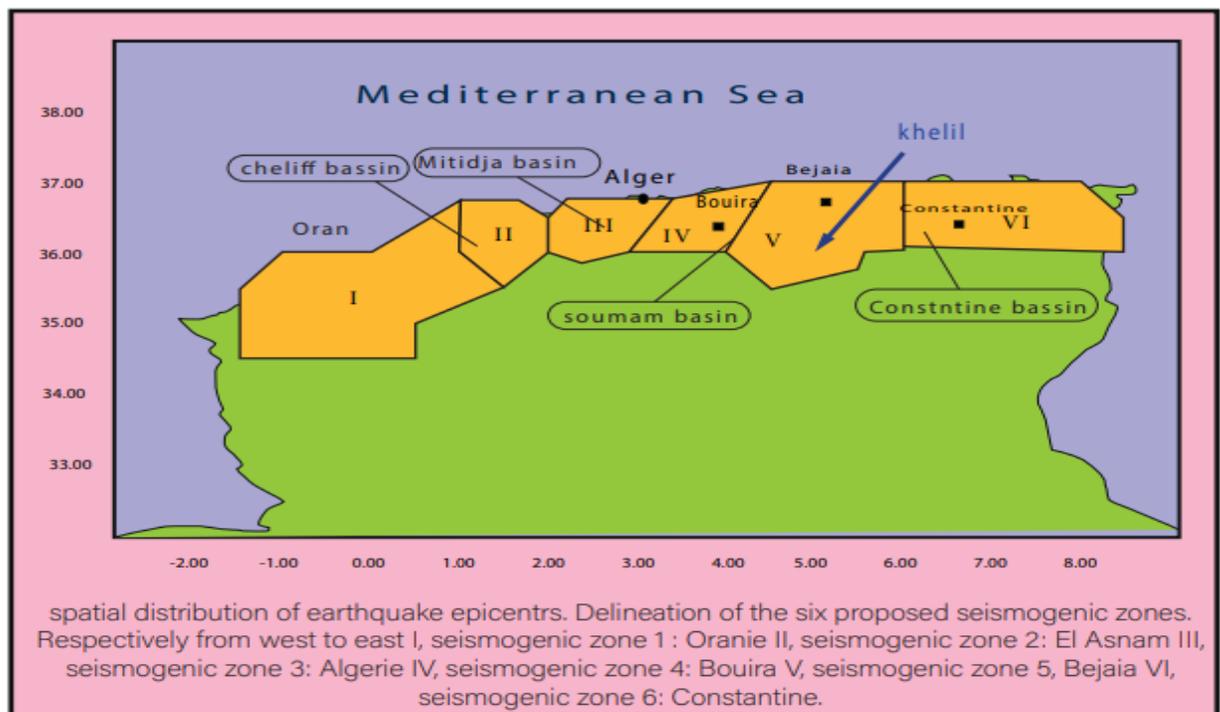
1. **Le domaine maritime.** Il est important de souligner que, parmi les plus importants séismes qui ont frappé L'Algérie du Nord, plusieurs se sont produits en mer. Les séismes d'Alger de 1716, d'Oran de 1790, de Djidjelli de 1856 et de boumerdes de 2003 sont les plus représentatifs

2. **Le Tell.** Dans cette région se manifeste le plus grand parti de l'activité sismique de l'Algérie du Nord. Avec le domaine maritime, elle constitue la Nord. Avec le domaine maritime, elle constitue la région la plus exposée aux séismes violents et dévastateurs, puisque la majeure partie de la population algérienne y réside.
3. **Les Hauts plateaux.** Actuellement, cette région se caractérise par **une quasi-absence de sismicité**. Les Hauts plateaux semblent donc se comporter comme un bloc rigide, se déformant simplement au niveau de ses bordures
4. **L'Atlas saharien.** Dans cette région, les cartes de sismicité montrent un chapelet de petite sismicité montrant un chapelet de petits séismes de faible magnitude ( $M < 4$ ), qui s'étale en particulier le long du front Sud-Atlasique.

#### 4.2.1 Zonage sismique de hamadache (1998) et aoudia et al (2000)

[Hamdache \(1998\)](#) propose un zonage sismique du nord de l'Algérie avec une caractérisation de la sismicité des zones basée sur **une analyse probabiliste**.

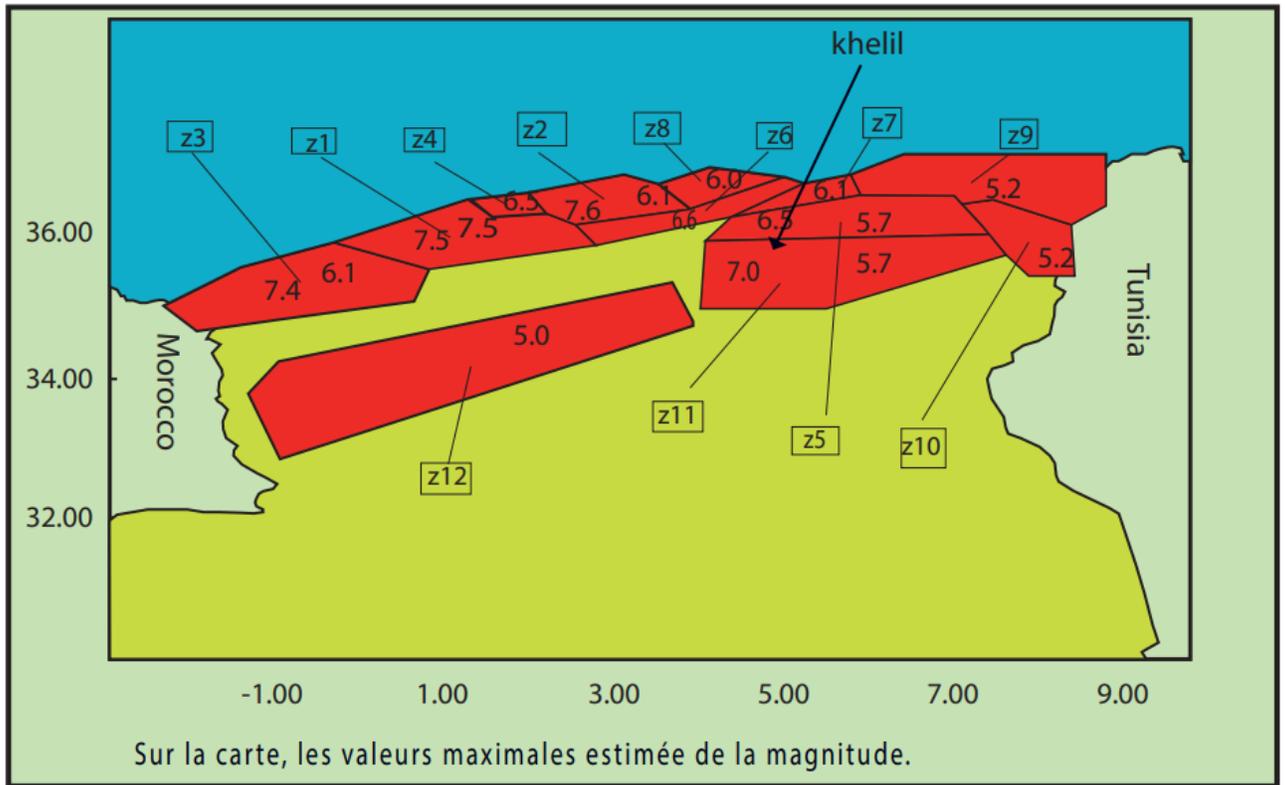
Tandis que le zonage sismique du Nord de l'Algérie proposé par [Aoudia et al. \(2000\)](#) suit plutôt **une démarche déterministe de l'aléa**.



**Figure 9 :** Zonage sismique du Nord de l'Algérie proposé par [Hamadach \(1998\)](#) et caractéristiques sismiques des zones,

**Tableau2** : tableau Zonage sismique du Nord de l'Algerie proposé par Hamadach (1998)

Mean return period of magnitude between 4.00 to 7.50 in each of the six seismogenic zones						
Mean average return period (years)						
Magnitude	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
4.10	02.10	00.70	01.30	02.90	01.30	03.10
4.50	04.70	01.40	02.90	06.70	02.80	06.40
5.00	13.10	03.10	06.30	15.60	07.30	16.00
5.50	37.00	07.20	14.90	36.50	19.40	41.90
6.00	106.10	16.80	42.20	86.40	55.00	124.30
6.50	320.90	40.00	349.8	211.6	192.9	638.8
6.70	517.60	57.10	>4145	308.70	387.90	4617.3
7.00	11163.0	99.00		566.6	8356.1	
7.50	191154	288.8		2062.6		
7.80		697.40		10068.2		
8.00		1667.6				



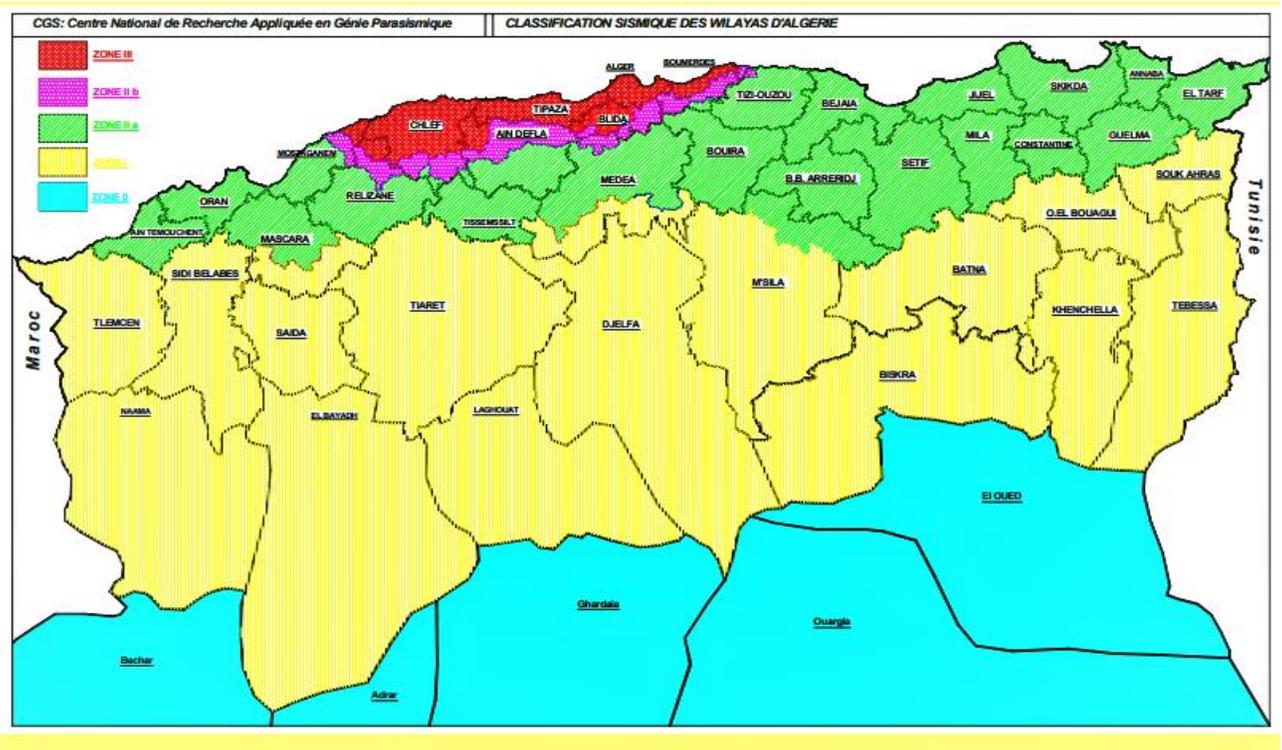
**Figure 10 :** Zonage sismotectonique du Nord de l'Algérie, d'après Aoudia et al (2000).

**Tableau 3 :** tableau du Zonage sismotectonique du Nord de l'Algérie, d'après Aoudia et al (2000).

Seismogenic zones	Active faults	Typical fault type	Fault length (Km)	Probable maximum earthquake magnitude Mw
Cheliff zone z1	El Asnam	Reverse	36-40	7.5
	Tenes-Abou El Hassan		30	7
	Boukadir		30	7
	Dahra		28-30	7

Mitidja zone z2	Sahel	Reverse	70	7.6
Oran-Beni	Ghriss		30	7
Chougrane zone z3	Habra	Reverse	-	-
	Saline d'Arzew		40	7.3
	Murdjadjo		60	7.4
Cherchell zone z4	Oued El Abiodh	Thrust + strike-slipe	20	6.5
Constantine zone z5	Constantine	strike-slipe(senestal)	30	6.5
Hodna zone z 11	Chott El Hammam	Reverse	30	7
Soummam zone z6	-	Reverse	-	-
Babor zone z7	-	Reverse	-	-
Kabylie zone z8	-	Reverse	-	-
Annaba zone z9	-	strike-slipe	-	-
Geulma zone z10	-	Normal	-	-
Sahara Atlas z12	-	strike-slipe	-	-

#### 4.2.2 Zonage sismique (d'après CGS 2003)



**Figure 11** : Carte des zones sismiques de l'Algérie (RPA 99 Version 2003).

Dans notre secteur d'étude la sismicité est moyenne selon les trois zonages, est de magnitude **faible** à modérée  $M \leq 5.5$  (Ouyed et al., 1983 ; Meghraoui, 1988 & 1996 ; Bounif et al., 2003, Delouis et al., 2004 ; Yelles-Chaouche et al., 2004).

L'effet le plus évident des séismes sur les mouvements de pente semblent à priori se manifester par cisaillement avec la formation de nouvelles fractures ou la réactivation de celles préexistantes. Une activité sismique ne peut induire des désordres et avoir un effet palpable sur la stabilité des versants qu'à partir d'une magnitude **minimale supérieure ou égale à 5** (Parise et Jibson, 2000 ; Mikos et al, 2006 ; Gallousi et Koukouvelas, 2007 ; Miles et Keefer, 2009...).

- Donc dans notre zone d'étude le séisme est **de même importance dans tout le terrain**.
- Le séisme est d'importance minimal (négliger) pour déclencher un mouvement des pentes dans khelil.

## 5. Conclusion

L'état de structuration de la nappes telliens met en contact des formations géologiques variées avec de fréquentes alternances de matériaux de différents comportements mécaniques (calcaires, dolomies, grès, marnes, argiles...). La morphologie est caractérisée par des reliefs très accidentés et de fortes dénivellations.

Cette situation est essentiellement la conséquence de l'activité tectonique de la nappes telliens perdurant jusqu'à aujourd'hui. Cette activité résulte de l'effet conjugué - de la convergence Afrique-Europe,

L'activité néotectonique et sismique qui se manifeste par le jeu récent de failles semble être induite par le blocage des plaques Europe et Afrique dans un état de contrainte où  $\sigma_1$  (Sigma) prend une direction N – S à NNW – SSE et  $\sigma_3$  une direction E – W (Ait Brahim et al., 1990, Ait Brahim, 1991). L'effet sismique est d'importance égale et n'affectant pas fortement notre zone d'étude (une quasi-absence de sismicité.)

## **CHAPITRE II : ETUDE HYDROCLIMATOLOGIQUE**

---

### **Résumé du chapitre**

Ce chapitre est axé sur l'étude de deux facteurs hydro-climatologiques par leur acquisition, description en plus de leur croisement avec la variable à modéliser (les mouvements de pente) afin d'étudier leur relation avec celle-ci dans la commune de khelil.

## 1. Introduction

Dans la plupart des mouvements de pente, les apports en eau, qui se traduisent par des changements de niveaux des nappes phréatique et des variations de pressions interstitielles, conditionnent les amplitudes des mouvements (Faver et al, 1992).

Les précipitations constituent avec la température les éléments les plus importants qui définissent le climat d'un lieu donné. Ils ont une grande influence sur les mouvements de pente.

## 2. Aperçu sur climats de l'Algérie

L'immense superficie de l'Algérie d'une part et la proximité de sa partie nord à la mer d'autre part, donne naissance à un climat très varié selon un axe Nord-Sud.

- Le Tell est caractérisé par un climat de type méditerranéen
- Les hauts plateaux possèdent un climat beaucoup plus rude avec un hiver plus froid et neigeux et un été plus chaud et plus sec. Le climat de ces zones est dit « semi-aride »
- Au Sahara, on rencontre un climat aride très chaud, avec un contraste des températures diurnes très marqué.

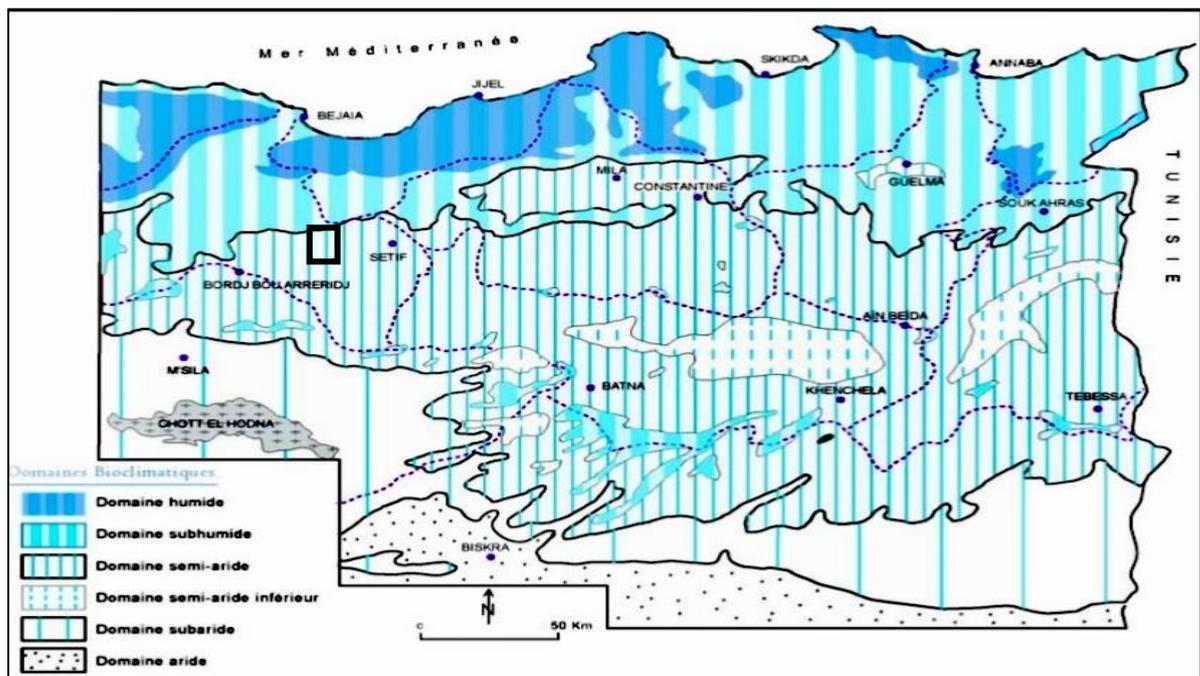
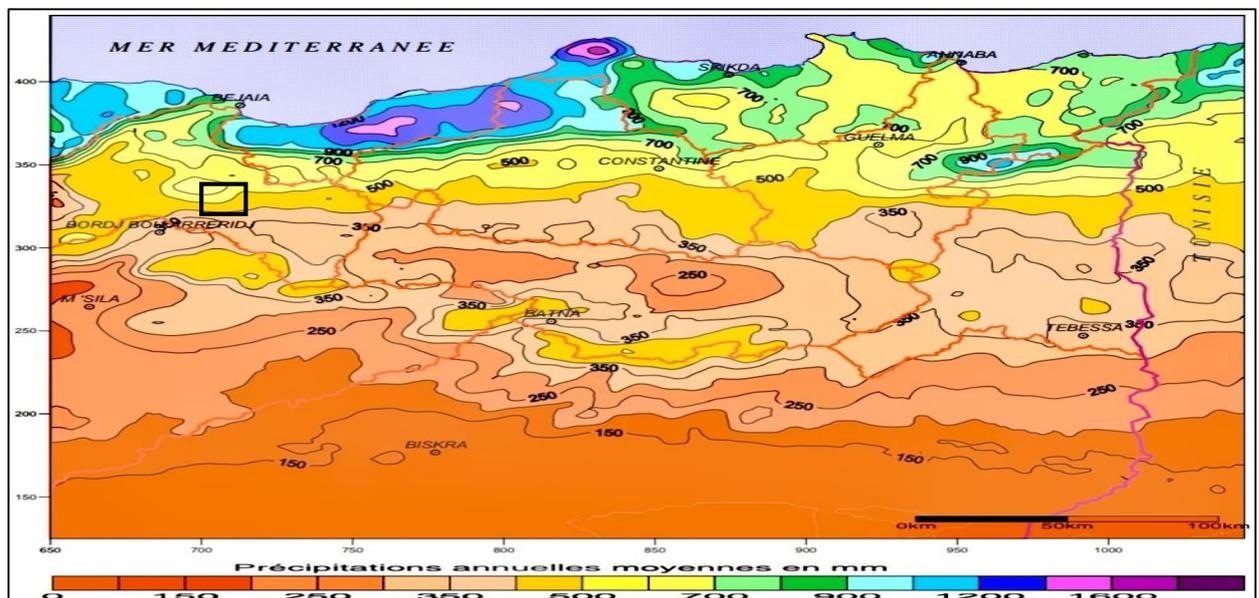


Figure 12 : Carte simplifiée des zones bioclimatiques de l'Est algérien (établie d'après Côte M., 1998a)

### 3. Précipitation

Les glissements de terrain apparaissent souvent au moment hydrologique le plus défavorable, c'est-à-dire lors de périodes pluvieuses prolongées, lors de fonte de neige ou après une longue période humide, selon des mécanismes tels que :

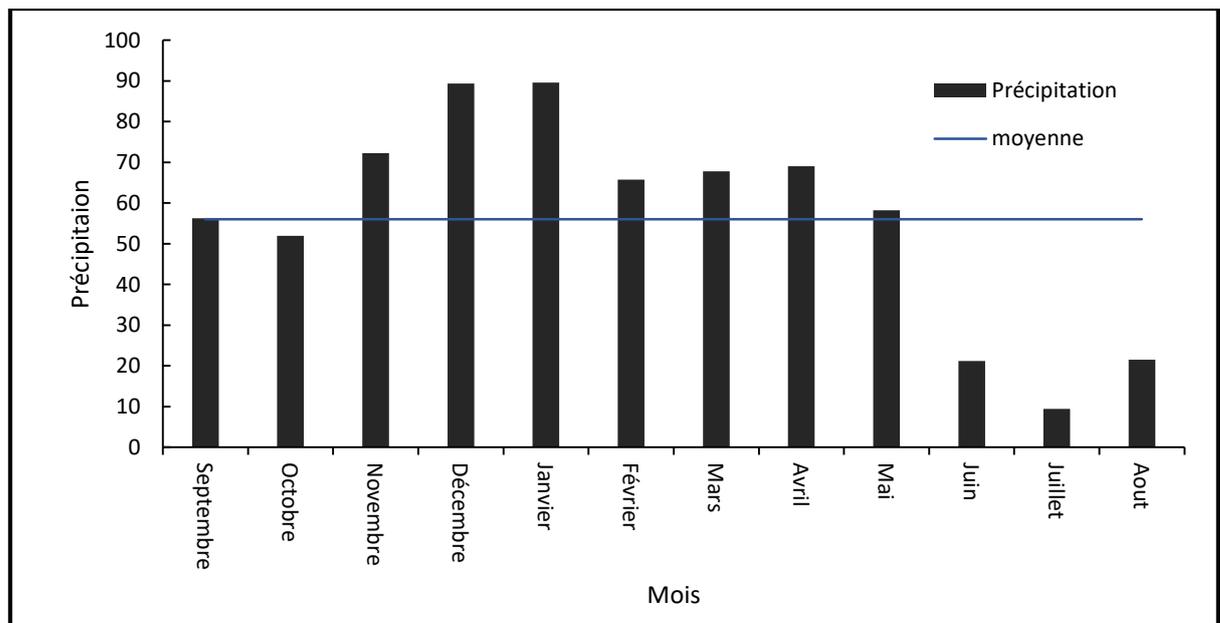
- L'augmentation de la pression interstitielle dans les sols saturés, due à un épisode pluvieux exceptionnel ou à une fonte de neiges, qui entraîne une diminution de la résistance au cisaillement du sol.
- La saturation des sols par descente d'un front d'infiltration influe aussi et fait augmenter le poids moteur.
- Une réduction de la consistance d'une argile causée par l'augmentation de la teneur en eau, lorsque celle-ci se rapproche de la limite de liquidité  $w_l$ , le milieu passe de l'état plastique à l'état liquide et la résistance au cisaillement diminue.
- L'érosion provoquant des changements de géométrie du versant, et par suite une modification de la pente qui implique une diminution du coefficient de sécurité
- Des écoulements souterrains qui ont des actions défavorables sur la stabilité des pentes tel que la pression de courant et érosion souterraine.



**Figure 13 :** Carte des précipitations annuelles moyennes de l'Est algérien (établie d'après A.N.R.H., 1993 : données moyennes de 60 ans, périodes du 1er septembre 1921 au 31 août 1960 et du 1er septembre 1968 au 31 août 1989)

### 3.1 Analyse des données de précipitations Caractéristiques temporelles des précipitations

Nous avons établi deux types de diagrammes. Le premier (Figure 14), représente les précipitations moyennes mensuelles calculées sur les dernières Trent ans (entre 1990 et 2017).



**Figure 14 :** variations des précipitations moyennes mensuelles (1990-2017)

Source : (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

Il montre que les maximas pluviométriques se situent en général en décembre et janvier, Les mois les plus secs sont toujours juin et juillet et août.

Le second diagramme (Figure 15) présente les variations interannuelles des hauteurs des précipitations sur la même période (27 ans). Il montre une certaine alternance, sans périodicité régulière, entre les périodes à forte précipitations et celles à faibles à très faibles précipitations. Cependant, quatre périodes humides alternées par d'autres moins humides.

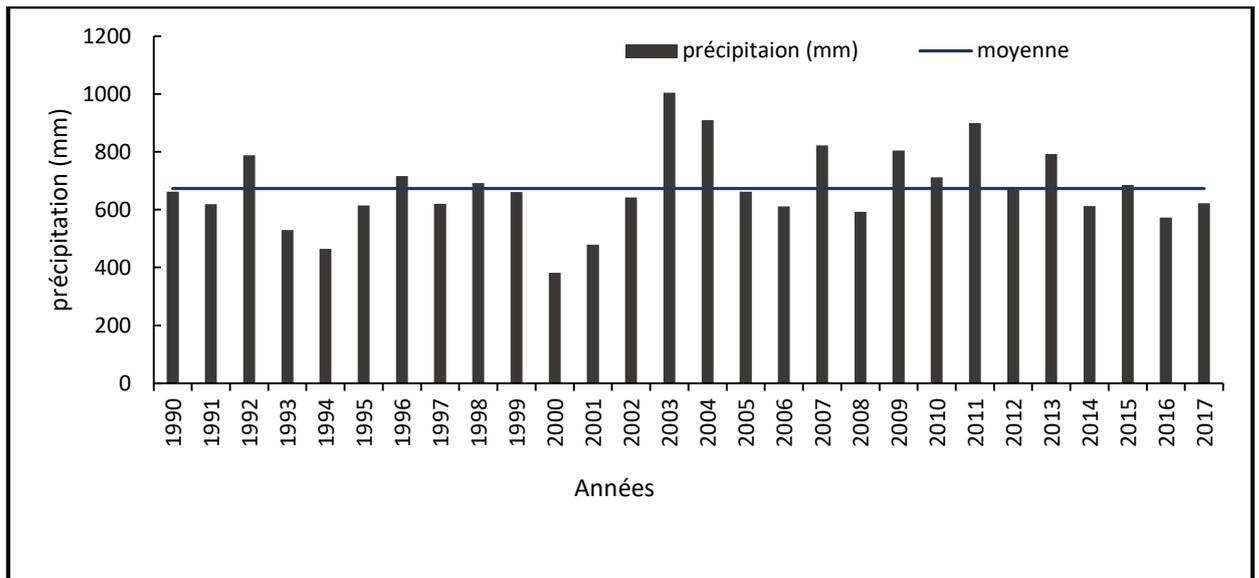


Figure 15 : variations interannuelles des hauteurs des précipitations (1990-2017)

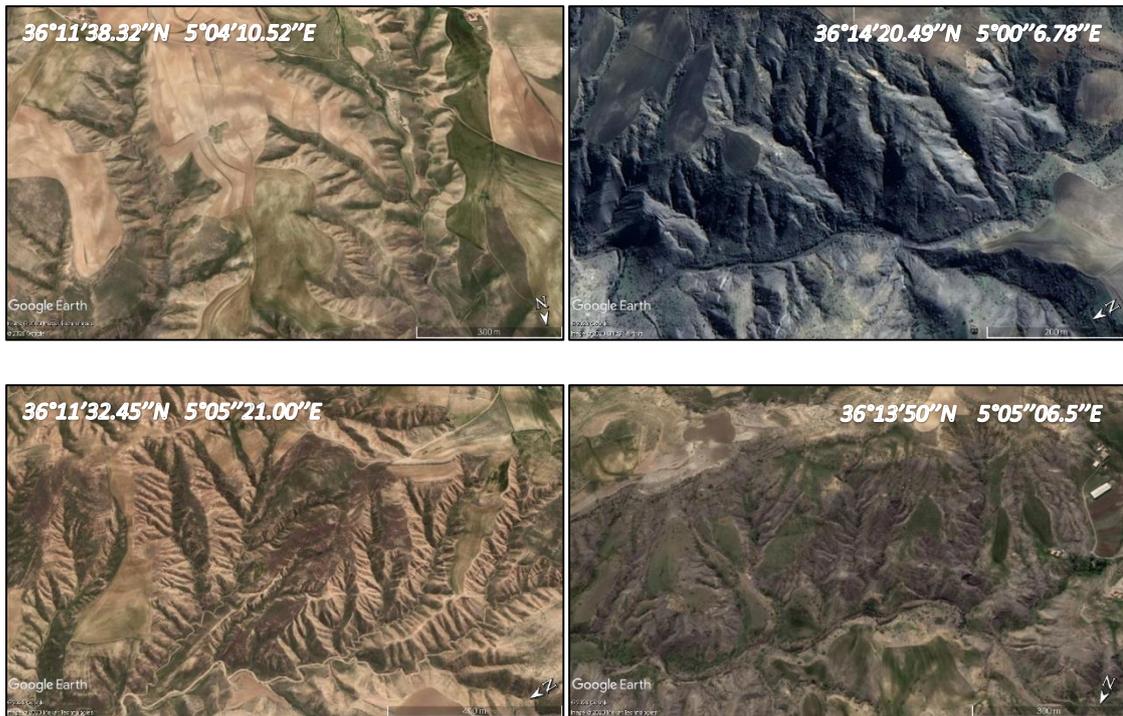
Source: (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

### 3.2 Rôles des pluies

La cause la plus importante dans la genèse des mouvements n'est pas la quantité de pluies annuelles en elle-même, mais plutôt **la conjonction**, sur une même "année pluvieuse" de plusieurs phénomènes, dont l'intensité et le rythme des précipitations. Lorsque plusieurs mois successifs concentrent des précipitations dépassant les 600 mm en trois mois (novembre, décembre, et Janvier), avec P mensuelles supérieures à la moyenne, ces précipitations ont un effet morphogénétiques certain comparé à une même pluviosité répartie sur toute l'année. Cette concentration exceptionnelle s'est produite les années 2003 et 2004 et 2011. Ainsi, même avec un décalage de quelques mois déficitaires, les effets des pluies sont cumulatifs. Les pluies qui tombent sur un terrain saturé en profondeur et sec en surface trouveront une infiltration facilitée en surface (retrait) et déclencheront des mouvements.

Des pluies intenses concentrées sur une courte période de l'année **accroissent également la capacité érosive** des oueds et rivières, en donnant naissance à des phénomènes de **sapements de berge** (Destruction d'un relief par la base, sous la forme d'une mise en porte à faux généralement due à l'action d'un cours d'eau.), des **badlands sur les formations tendres**, des écoulement et chutes de blocs par détente des escarpements des falaises. Elles peuvent aussi saturer les terrains sur une forte épaisseur, ce qui augmente

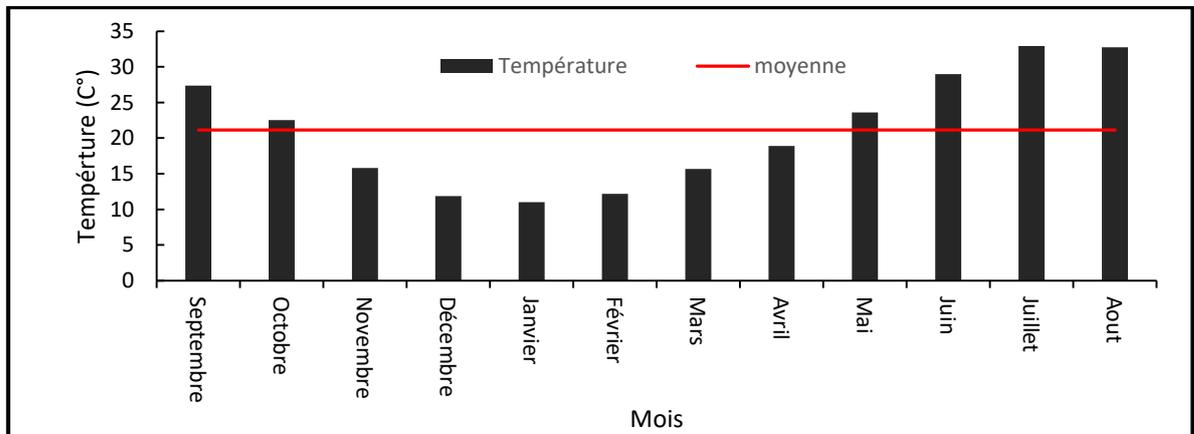
la charge hydraulique des versants, diminue leur résistance au cisaillement et génère des instabilités donnant lieu à d'important mouvements de pente.



**Figure 16 :** effet de précipitation sur terrain (badlands).

#### 4. La température

Les variations de températures sont un facteur déclenchant de chutes de pierres ou de blocs et même glissement de terrain, en raison des dilatations différentielles qui se manifestent (le Gel dégel ..etc).



**Figure 17 :** variations des températures moyennes mensuelles (1990-2017)

Source : (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>).

## 5. Les indices climatiques

### a) Indice d'aridité E. de Marton

Indic annual  $I=P/(T \times 10)$

$$I=673.11/(23.13+10)=21.622 \quad 20 < I < 30$$

Donc : le type de climats semi-humide approche d'un climats semi-aride.

### b) Le quotient pluviométrique d'Emberger

La formule  $Q_n = \frac{P}{M^2+m^2} \times 2000$

M : moyenne des maxima du mois le plus chaud (kelvin).  $T(k)=T(c^{\circ})+273.15$

m : moyenne des minimas du mois plus froids (kelvin).

P : précipitation moyenne annuelles (mm).

$$P=673.11 \text{ mm} \quad M= 32,7436667+273.15=305.8936667 \text{ (Aout)}$$

$$m= 11,8746667+273.15 = 285.024 \text{ (Décembre)}$$

$$Q_n=109.1625$$

Avec un hiver chaud  $13.35 \text{ c}^{\circ}$

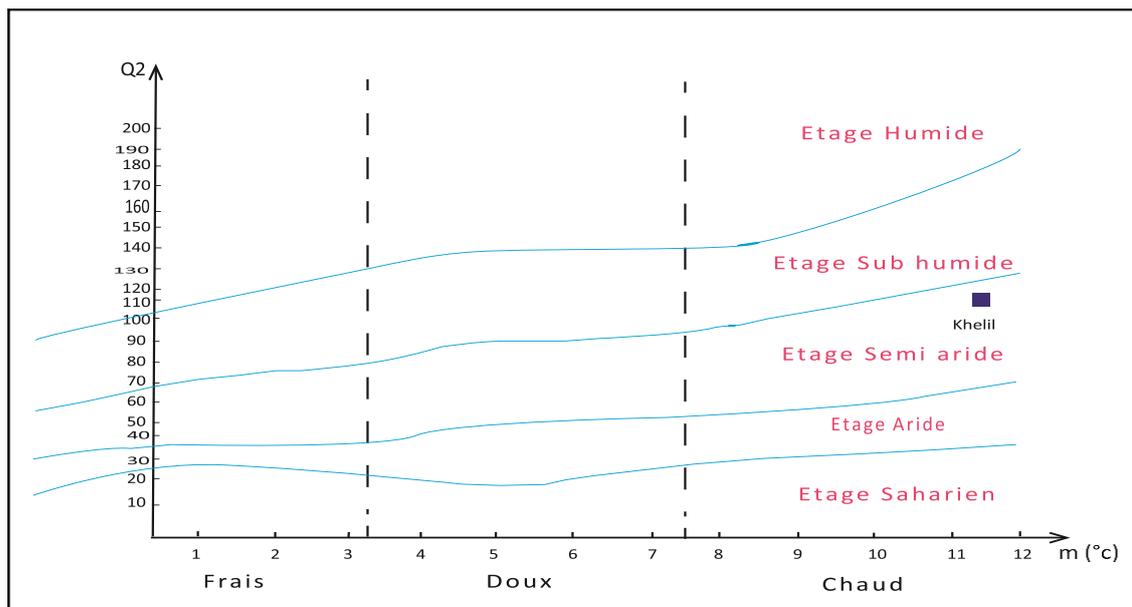
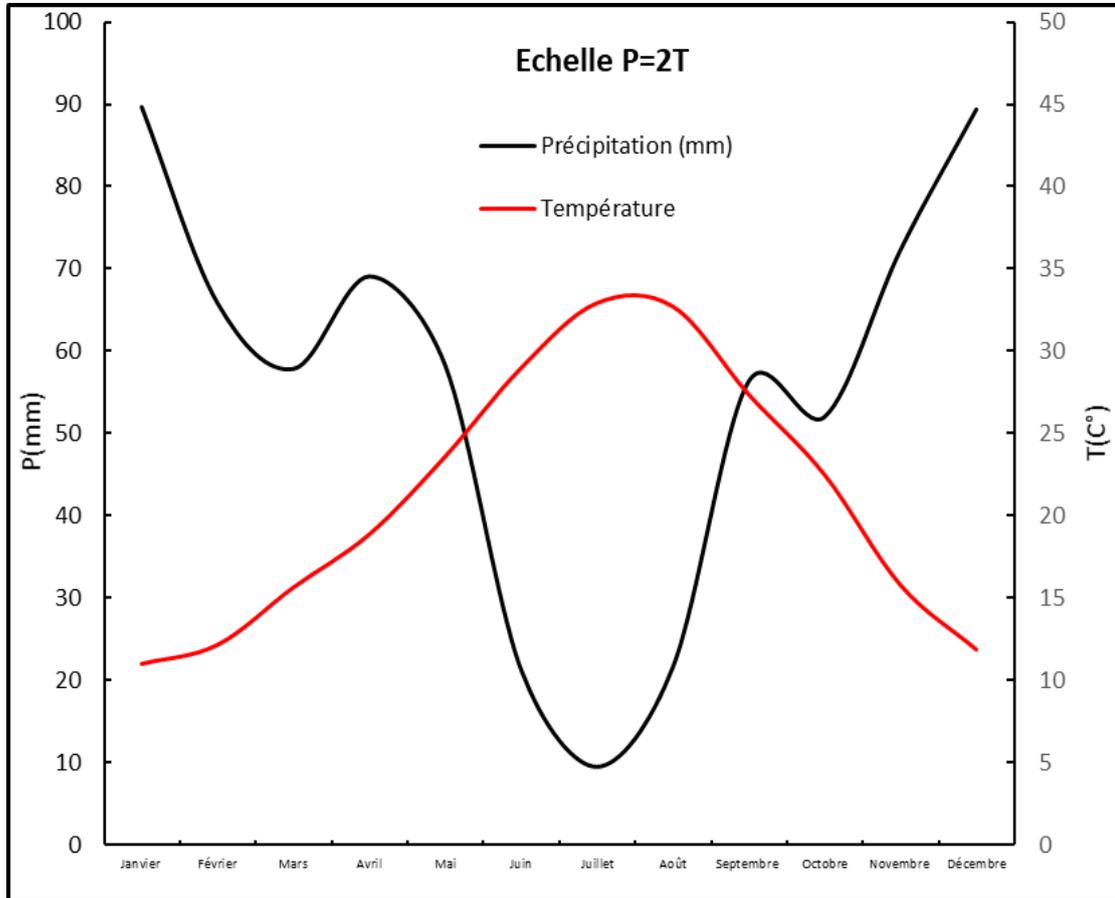


Figure 18 : Climatogramme d'Emberger.

### c) Le mois sec

D'après [Gausсен et Bannouls \(1953\)](#), un mois sec est un mois où les précipitations sont inférieures à 2 fois la température moyenne mensuelle ( $P < 2T$ ).



**Figure 19** : diagramme ombrothermique de la zone d'étude.

- Les mois à tendances sèches et entre Avril - Novembre selon, [Gausсен et Bannouls \(1953\)](#).

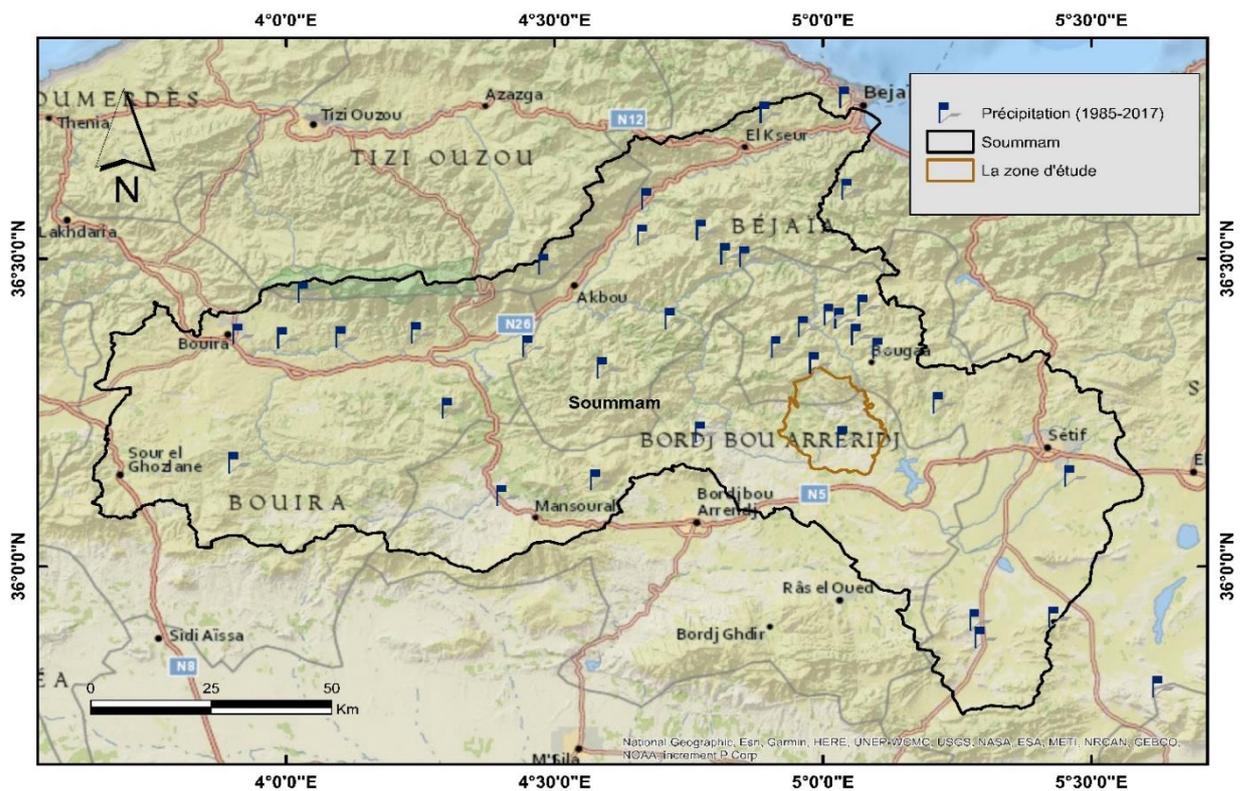
L'état hydrique général du sous-sol est tributaire du taux d'évapotranspiration, qui est tributaire à son tour ; essentiellement ; de la température, des précipitations et du vent. L'évapotranspiration représente la quantité d'eau rejetée à l'état de vapeur par l'évaporation directe au niveau du sol et par la transpiration des végétaux. Ce phénomène peut avoir deux types d'effet sur les versants. Il s'agira d'une action **stabilisatrice**, dans le cas d'une **évapotranspiration modérée**, suite à laquelle la teneur en eau du sol se trouve plus basse. Cela renforce la résistance interne du sol, par assèchement, en réduisant le poids du sol lui-même, et en diminuant sa pression

interstitielle. Par contre, il est possible que l'évapotranspiration ait une incidence **déstabilisatrice** des versants, quand elle se manifeste d'une **façon accrue**.

Cette évapotranspiration se manifesterait avec un certain retard par rapport aux pluies, et conduira à la mise en place d'une grande fissuration (fentes de dessiccation) en période estivale. Celle-ci contribuera à une augmentation de l'infiltration de l'eau (argiles gonflantes de l'UG1) dans le sol lors des premières pluies favorisant les mouvements de terrain, **les ravinements et la suffosion** (écoulement de sub-surface ou piping).

## 6. Réalisation de la carte des précipitations

La carte des précipitations a été réalisée par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles, calculées sur l'ensemble des données que nous avons pu avoir, soit 32 ans (1985 – 2017). Cependant, il serait judicieux de mentionner que le nombre de résultats météorologiques obtenue à partir du site (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>) reste **insuffisant pour effectuer une étude climatique très fine**.



**Figure 20** : précipitations moyennes inter-annuelles (1985-2017) intégrées dans l'interpolation.

**Tableau 4 :** précipitations moyennes inter-annuelle intégrées dans l'interpolation, et leur positionnement géographique.

Source: (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>)

	Latitude	Longitude	Précipitation 1985-2017 (mm)
1	36,11561	4,41351	610,5697
2	36,1411	4,5879	650,2812
3	36,16881	3,91371	564,238788
4	36,21091	5,04801	663,02909
5	36,21871	4,7831	650,281212
6	36,25751	4,31191	610,569697
7	36,26651	5,22561	663,0291
8	36,32311	4,60031	650,281212
9	36,35491	5,11391	663,029091
10	36,33141	4,99581	650,28121
11	36,35851	4,46151	575,783714
12	36,35711	4,92421	650,28121
13	36,37201	4,00501	610,5697
14	36,38031	4,25421	610,5697
15	36,37701	5,07391	663,0291
16	36,39021	4,97521	650,281212
17	36,40271	4,72671	650,2812
18	36,40351	5,04251	663,02909
19	36,42431	5,08641	663,02909
20	36,44551	4,04281	610,569697
21	36,49131	4,4911	610,569697
22	36,50791	4,83031	644,803636
23	36,54651	4,78501	644,803636
24	36,59721	4,68271	644,803636
25	36,61271	5,05561	662,863939
26	36,40941	5,02241	663,002909
27	36,37291	4,11331	610,569697
28	36,37791	3,92101	564,238788
29	36,50331	4,86591	644,803636
30	36,53861	4,67501	644,803636
31	36,73701	4,90371	644,803636
32	36,76121	5,05201	662,863939
33	36,14741	5,47091	663,0269091
34	35,80371	5,63501	489,74242
35	35,91271	5,29401	459,05818
36	35,91771	5,44161	459,05818
37	35,88431	5,30431	459,05818

Cependant, nous sommes passés par interpolation pour obtenir notre carte finale, à savoir :

- **L'Interpolation par pondération de l'inverse de la distance au carrée IDWI (power=2) et le krigage**

Ils s'agissent à des méthodes d'interpolation spatiale qui permet d'attribuer des valeurs à des aires non connues à partir d'un minimum de points connus

Pour que la précision augment nous avons interpoler au niveau du bassin versant puis couper la zone d'étude.

- **Discutions**

Selon la figure 21 l'interpolation par inverse de distance (IDW) elle s'avère donner des résultats plus cohérents qu'krigage, puisque la carte obtenue traduit la distribution des précipitations généralement en accord avec le changement du relief.

Les précipitations augmentent avec l'altitude et la proximité d'une montagne, puisque les masses d'air vont subir un double effet de refroidissement, aussi bien par leur détente que par le contact avec des surfaces froides.

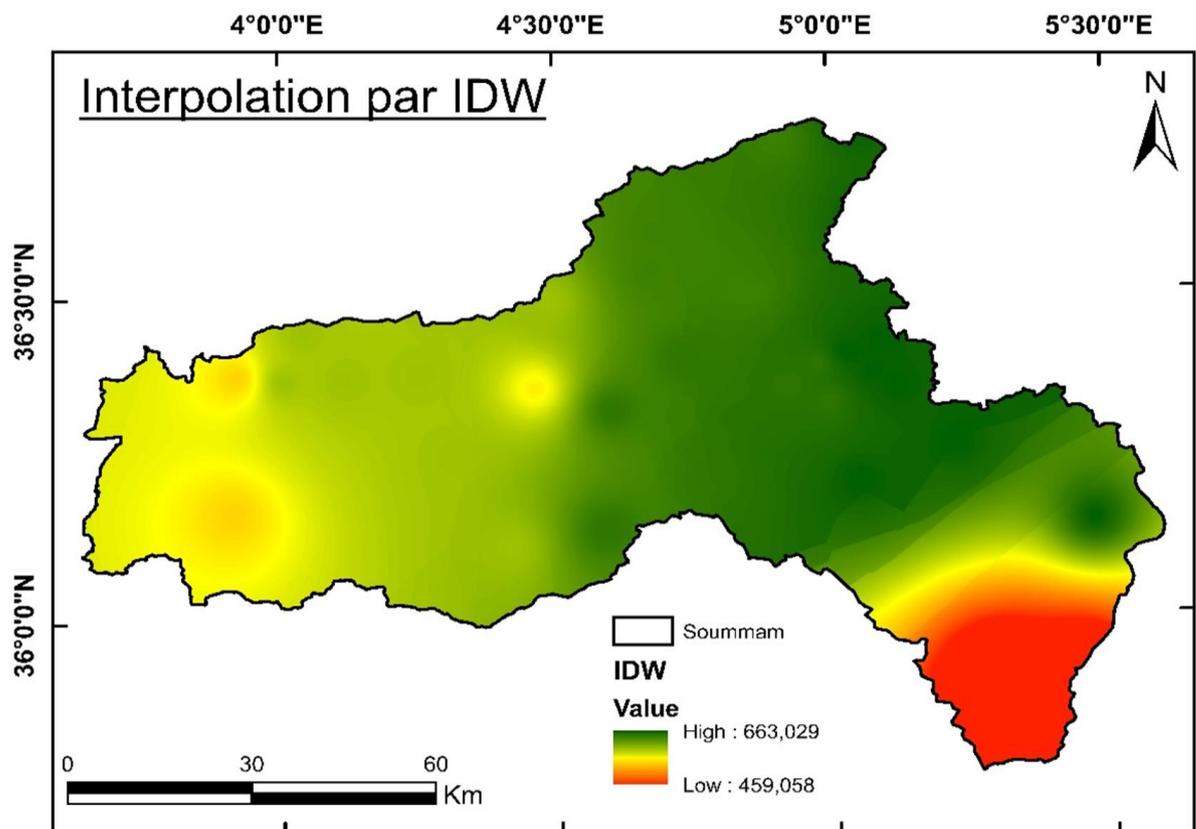


Figure 21 : carte de précipitation du bassin versant Soummam.

## 6.1 Carte de la zone d'étude

La carte obtenue de la zone, en sera extraite la partie couvrant le secteur d'étude (Figure 22) à l'aide du module spatial analys tools ,Extracts,clip d'ArcGis 10.

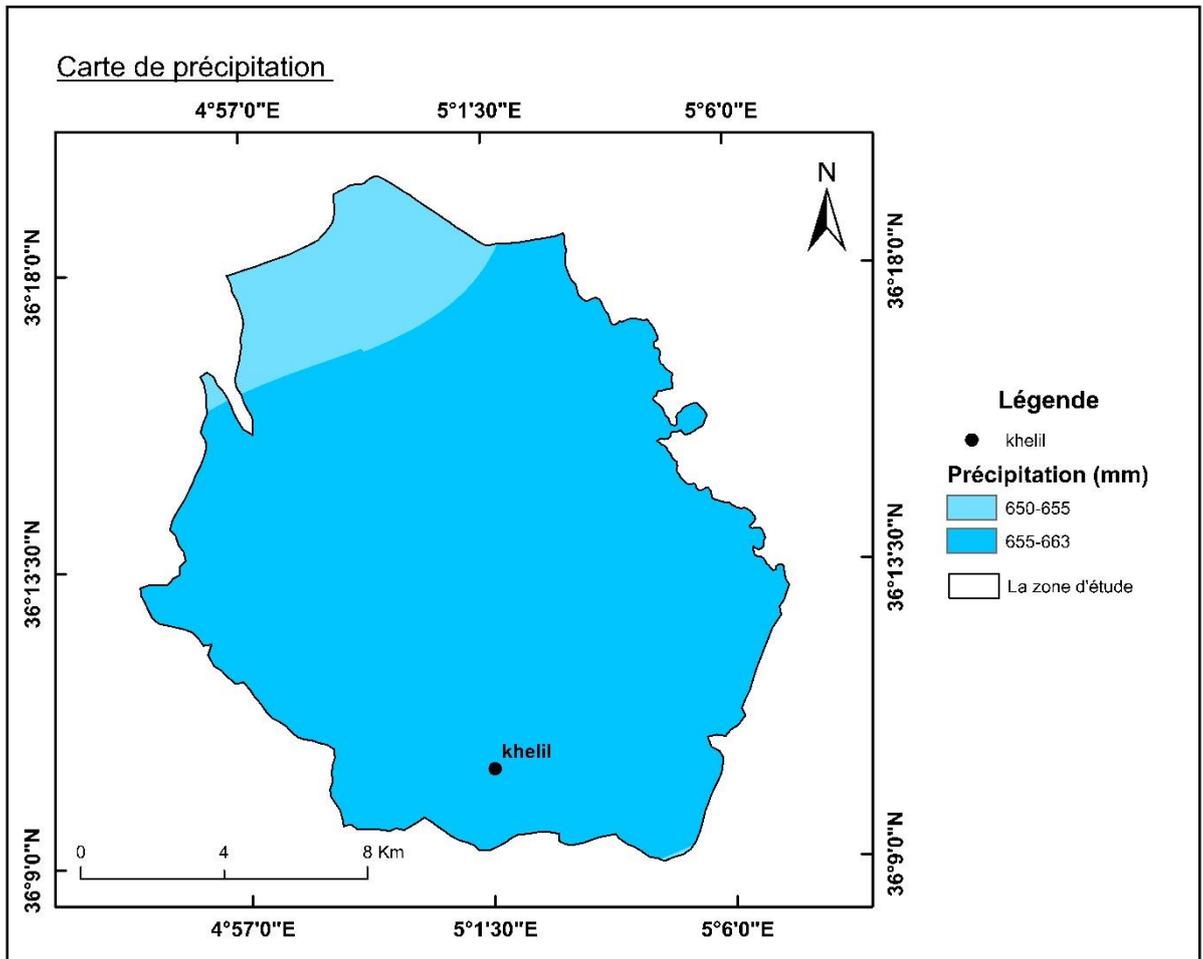


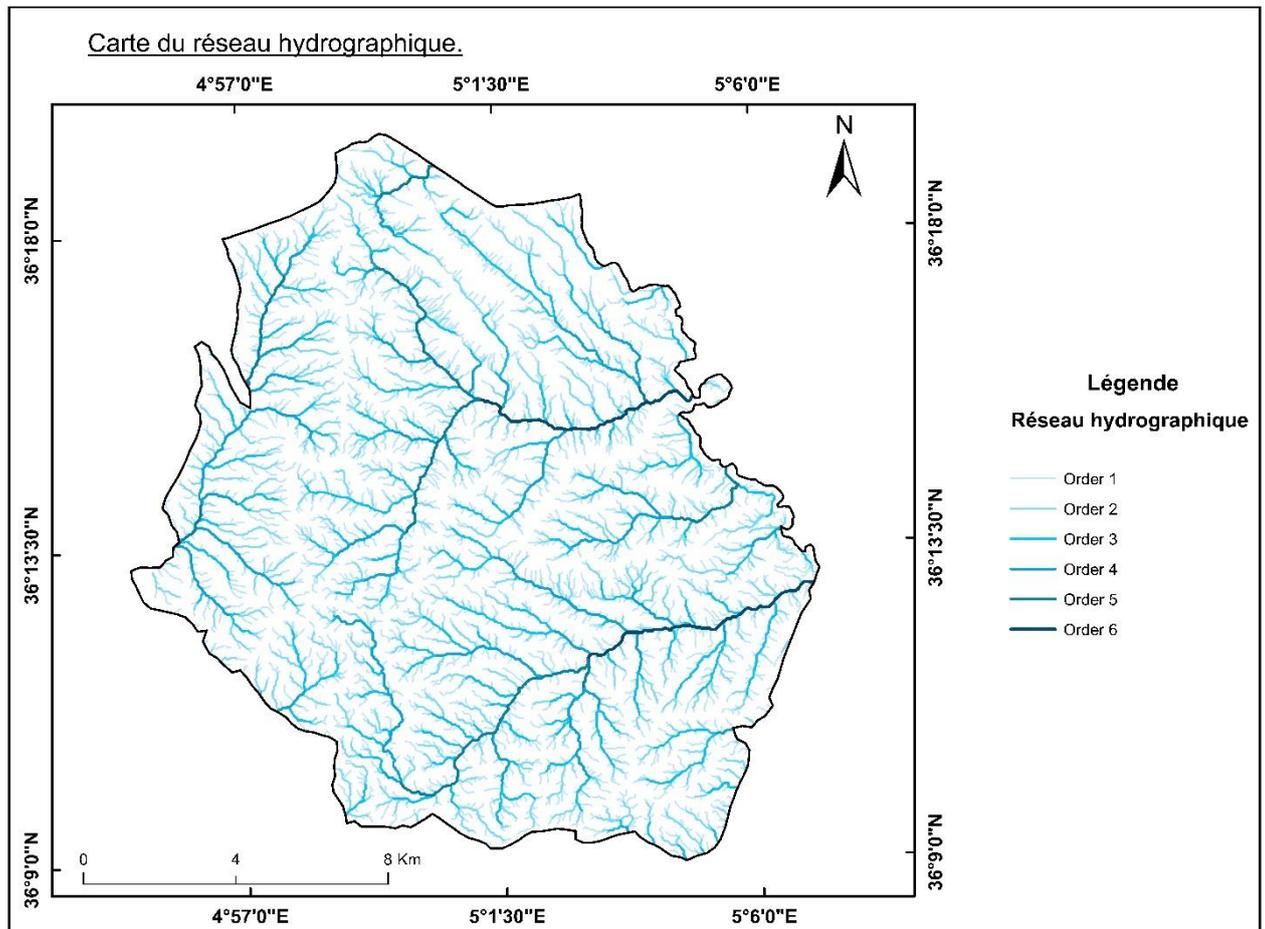
Figure 22 : carte de précipitation de la zone d'étude.

## 7. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'un des paramètres qui contrôlent l'occurrence des mouvements de terrain. Il peut agir aussi bien en surface qu'en profondeur, d'où on peut parler des eaux souterraines et des eaux de surfaces.

Les versants peuvent se trouver perturbés par les torrents, ce qui est considéré comme un important facteur d'instabilité. Le réseau de drainage par sa mobilité et son pouvoir érosif donne naissance à des perturbations notables et génère des instabilités sur les versants. Le ruissellement superficiel génère des zones d'intense ravinement (badlands)

dans le cas de formations géologiques tendres. Il peut cependant avoir un effet déstabilisant par sapement de berges. Il en résulte le déclenchement d'un nouveau mouvement de versant ou sa réactivation s'il s'agit d'un mouvement stabilisé. Les conséquences de l'érosion par torrents sur les versants que ce soit dans le cadre d'un rythme érosif régulier ou irrégulier sont illustrées dans la figure 23.



**Figure 23** : Réseaux hydrographique de la zone d'étude.

### 7.1 Dynamique des eaux et dégradation des sols

La zone d'étude est sillonnée par plusieurs oueds, qui sont délimités la plupart du temps par des berges instables. Au cours de la période hivernale et lors des pluies exceptionnelles, l'activité hydrodynamique du réseau de drainage s'intensifie en catalysant le déclenchement des sapements et des écroulements de berges. Ils peuvent aussi réactiver d'anciens glissements scellés, notamment dans les concavités des méandres (figure 16).

## **8. Conclusions**

Le facteur précipitations il a été cartographié par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles, calculées sur l'ensemble des données que nous avons pu avoir, soit 32 ans (1985 – 2017), où nous avons testé deux modèles d'interpolation dont ont obtenu le résultat le plus plausible, c'est-à-dire obtenu par la méthode IDW, concernant la variable réseau hydrographique a été incorporé par ordre.

## **CHAPITRE III : GENERALITES SUR LES MOUVEMENTS DE PENTE DANS LA ZONE D'ETUDE.**

---

### **Résumé du chapitre**

Le troisième chapitre, dresse un état d'art sur les méthodes de classification des mouvements de pente. Cela a permis de définir une typologie générale et **pragmatique** des mouvements de pente rencontrés dans la zone d'étude. Ensuite, après avoir exposé la méthodologie et les différentes techniques utilisées pour l'inventaire des mouvements de pente de notre secteur et leur caractérisation. L'inventaire effectué a permis de reconnaître grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de **facteurs naturels** qu'anthropiques. Il s'agit, des glissements, des coulées boueuses, des sapements de berges, et des badlands.

## 1. Typologie des mouvements de pente

Depuis les premières classifications des mouvements de pente (Collin, 1846 ; Terzaghi, 1925 ; Sharp, 1938 ; Varnes, 1958 ; J Bombard, 1968 ; Nemcok et al., 1972 ; Varnes, 1974 ; Hutchinson, 1988 ; Sassa, 1988 ; Dikau et al., 1996...etc), on constate qu'une grande variété de mouvements gravitaires a été reconnue en fonction de leur **nature**, de leur **cinématique** ou de leur **dynamique**. Ce sont : les éboulements, le fauchage, les glissements, le fluage, les affaissements et les effondrements...etc.

Cependant, la typologie et la terminologie pour classer les différents types de mouvement de pente restent très ambiguës ; et jusqu'à l'heure actuelle elle n'existe aucune classification standard gérant tous les types de mouvements de pente. Millies-Lacroix, 1981 et Flageollet, 1989 n'ont pas manqué de signaler les confusions existantes entre les différentes appellations pour définir ces processus. Colin en 1846 (in Cruden, 1996) a différencié entre des mouvements superficiels, et des mouvements profonds. Ensuite, Dana en 1862 (in Cruden, 2003) définit trois types de mouvements de pente, à savoir : les coulées de débris (debris flow), les étirements de sols (earth spreads), et les glissements rocheux (rockslide). Depuis, de très nombreuses classifications ont été proposées. Basées sur des critères différents, ces classifications considèrent tantôt les caractéristiques du matériau affecté par le mouvement de terrain, tantôt les caractéristiques de ce dernier telle que sa morphologie ou encore les conséquences qui en résultent.

Sous l'expression générique mouvements de pente sont regroupés plusieurs types de phénomènes d'instabilité des terrains, variables en fonction de la **nature des matériaux** mis en jeu, de la **dimension**, du **mécanisme**, de la **cinématique**, etc.

## 2. Classification

Par la diversité des facteurs responsables des glissements de terrain, il existe de nombreuses classifications qui ont été proposées par des **géologues**, des **mécaniciens** ou des **géotechniciens**.

Ces classifications nous permettent de dénommer les principaux types de mouvement de pentes, de telle façon qu'elles évoquent certaines de leurs caractéristiques essentielles ou permettent de les retrouver.

- ✓ Bien sûr, les premières étaient simples car elles s'appuyaient sur des observations. En 1846 Collin propose une classification basée sur la forme et la dimension de la masse déplacée.
- ✓ **K. Terzaghi (1925)** fait intervenir la mécanique des sols pour le classement des mouvements de terrains. Il distingue d'une part les mouvements se produisant à sec, et d'autre part, les mouvements impliquant des formations plastiques (Tableau 5). Mais cette classification ne mentionne pas les mouvements liés à la solifluxion.

- ✓ **Sharpe (1938)** propose une répartition assez exhaustive qui tient compte de nombreux critères :

- Type de matériau ;
- Type ou forme de mouvement ;
- Dimensions du mouvement ;
- Causes du mouvement ;
- Vitesse de mouvement ;
- Organisation du matériau à l'intérieur de la masse glissée ;
- Relation entre masse en mouvement et son substratum.

Mais cette classification reste essentiellement fondée sur trois facteurs, le mode de mouvement, la teneur en eau et le type du matériau.

- ✓ **J.P. Bombard** en 1968 propose quatre critères qui peuvent être à la base d'une classification des mouvements de terrain :

- Le mode de mouvement ;
- Le type du matériau ;

- Les dimensions du mouvement ;
- La vitesse du mouvement.

L'inconvénient de cette classification, reste que la vitesse du mouvement est difficile à mesurer avec précision, et elle est très variable dans l'espace et dans le temps, du fait qu'il y a des phases d'accélération et de ralentissement dans la cinétique du mouvement.

- ✓ [Nemcok et al. \(1972\)](#) : La classification de [Nemcok, Pasek, et Rybar\(1972\)](#) est basée sur le caractère géo mécanique des mouvements de pente et leur vitesse, quatre (4) processus sont distingués : Fluage (creep) ; glissement (sliding) ; écoulement (flow) et écroulement (fall) .
- ✓ J.P. Mougin en 1973 intègre l'existence et la forme de la surface de rupture, il s'est basé sur quelques critères observables sur le terrain tels que :
  - Existence d'une surface de rupture et sa forme ;
  - Le degré de relation de cette surface avec le contexte géologique ;
  - Le degré de remaniement de la masse glissée ;
  - La nature des terrains impliqués ;
  - L'extension de la masse glissée.
- ✓ G. Colas et G. Pilot en 1976 proposent une classification basée sur deux critères fondamentaux, qui sont :
  - La nature du matériau ;
  - Le type de déplacement.

**Tableau 5 :** Classification des mouvements de terrain, K. TERZAGHI (1925).

Ordre	Group	CLASSE	VARIETE
A./ Mouvements à sec	I./ Reptation (mouvement de masse, continu)	1.Reptation de sol 2.Reptation d'éboulis (matériaux meubles) - gravier	Ecrolement de roches
	II./ Glissements (mouvement de masse rapide)	- glacier rocheux 3.Mouvements de roches 4.Mouvements d'éboulis (matériaux meubles)	Glissement dans gravier
	III./ Affaissement et coulées (résultat d'une variation rapide de la porosité)	5.Glissements mixtes 6. Sables boullants et coulées de terre	Cendres volcaniques
B./ Mouvements plastique	IV./ Dislocation et coulées (résultat d'une dislocation après gonflement et fragmentation)	7. Chutes, coulées de sable	Dépôts lacustres anciens
		8. Sédiments lacustres	Dépôts lacustres récents
	V./ Coulées résultant d'une Suppression hydrostatique	9. Desquamation et altération	Dépôts lacustres mixtes
		10.Glissement profond dans les matériaux homogènes 11.Glissement profond dans matériaux hétérogènes	
	VI./ Expulsion (diminution de la résistance sous l'action d'une forte sous-pression)	12.Reprise de mouvement dans un ancien glissement 13. Glissement suivant des plans et joints de stratification	
		15. Gonflement résultant d'une baisse de la pression 16. Expulsion résultant de sous-pres- sions locales	

✓ Classification [Varnes \(1978\)](#). Elle est basée sur deux axes qui sont : le type de mouvement en rapport avec la structure géologique, et la nature des formations affectées par la déstabilisation étudiée (Tableau.8).

✓ *K. Sassa en 1985 a proposé une classification plus géotechnique en fonction de deux critères ; l'un est relatif au matériau, l'autre est relatif au type de mouvement.*

*Pour des classifications plus récentes,*

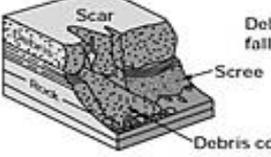
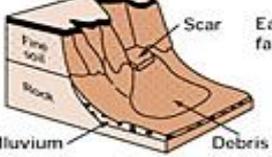
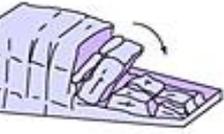
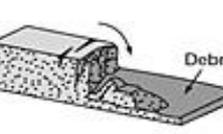
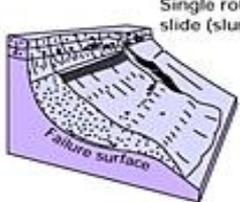
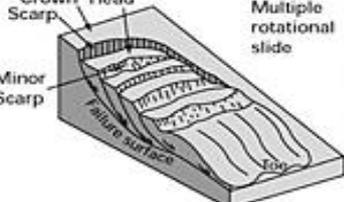
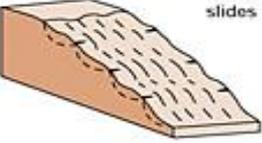
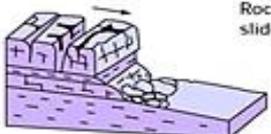
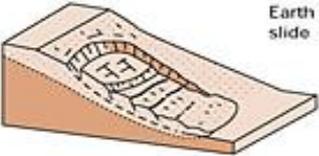
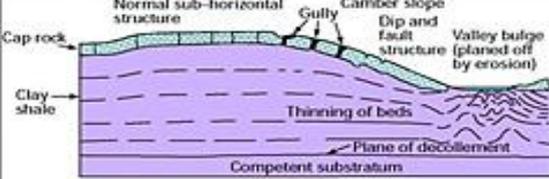
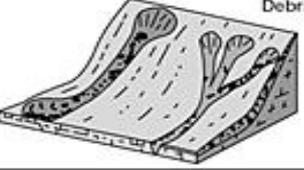
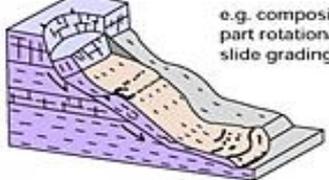
✓ Classification de Meunier (1991)

[Meunier \(1991\)](#) propose une classification des mouvements de terrain en fonction de la proportion relative entre deux grands pôles : les matériaux solides et l'eau.

✓ P. Antoine en 1992 propose une classification basée sur les mécanismes. On trouve par exemple dans la première catégorie le fauchage et le fluage. Dans la seconde catégorie les chutes en masse et écroulements, les glissements proprement dits, les écoulements, les mouvements généralisés ou complexes.

✓ [Cruden et Varnes\(1996\)](#) qui se sont basés d'une part sur la nature des matériaux en cause (rocher, sol ou débris) et d'autre part sur le type de mécanisme de déformation et de rupture (chutes de matériaux, basculements, glissements plans ou rotationnels, etc.).

**Tableau 6** : classification Varne 1987.

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		 <p>Scar Rock fall Debris</p>	 <p>Scar Debris fall Scree Debris cone</p>	 <p>Scar Earth fall Colluvium Debris cone</p>
	TOPPLES	 <p>Rock topple</p>	 <p>Debris topple Debris cone</p>	 <p>Cracks Earth topple Debris cone</p>
SLIDES	Rotational	 <p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	 <p>Crown Scarp Head Multiple rotational slide Minor Scarp Failure surface</p>	 <p>Successive rotational slides</p>
	Translational (Planar)	 <p>Rock slide</p>	 <p>Debris slide</p>	 <p>Earth slide</p>
SPREADS	 <p>Cap rock Normal sub-horizontal structure Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planed off by erosion) Clay shale Thinning of beds Plane of décollement Competent substratum</p> <p>e.g. cambering and valley bulging</p>			 <p>Earth spread</p>
FLOWS	 <p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	 <p>Debris flow</p>	 <p>Earth flow (mud flow)</p>	
COMPLEX	 <p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		 <p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>	

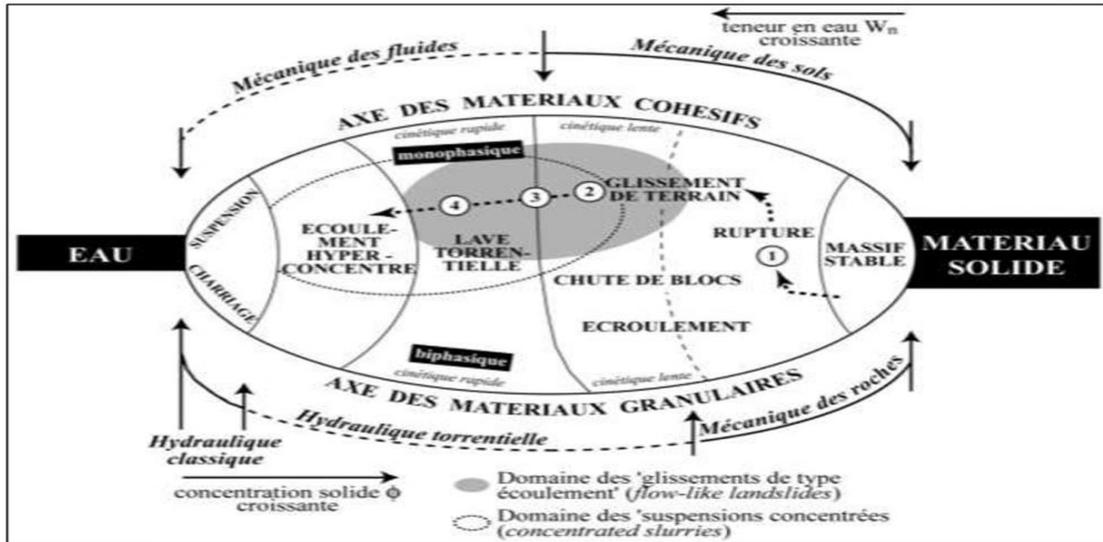
Source : British Geological Survey

**Tableau 7** : Classification des MP selon des critères cinématiques, d’après [Varnes, 1978](#) et [Crozier, 1986](#). E.R. : extrêmement rapide, T.R. : très rapide, R. : rapide, M. : modéré, L. : lent, T.L. : très lent, E.L. : extrêmement lent, adaptée par [Campina, 2005](#).

Processus	Vitesse de propagation						
	3 m/s	0,3 m/s	1,5 m/j	0,5 m/m	1 à 1,5 m/an	0,3 m/an	0,3>m/an
	E.R.	T.R.	R.	M.	L.	T.L.	E.L.
Chuts, écoulement de rochers							
Avalanches de débris							
Coulées de terre de débris							
Glissement de roches							
Glissement rotationnel de roche							
Glissement rotationnel de sol							
Glissement plan de roche							
Glissement plan de sol							
Glissement de débris							

✓ Corominas (1989) et de Corominas et Garcia Yagüe (1997).

Les ingénieurs francophones optent pour la classification de [Colas et Pilot \(1976\)](#) qui dérive de celle proposée par [Nemock et al., \(1972\)](#). Une vue d’ensemble sur ces travaux permet de conclure que trois types de classification peuvent être distingués. La première fondée sur la morphologie et la géométrie des mouvements de terrain (Tableau 7). Une deuxième basée sur la cinématique ou la dynamique des phénomènes (Tableau 8). Et finalement une troisième qui combine les critères de la plupart des précédentes classifications.



**Figure 24 :** répartition des phénomènes hydrogravitaires et domaines de comportement, d'après Meunier, 1991 ; modifié par Malet, 2003

**Tableau 8 :** classification des mouvements de terrain selon des critères morphologiques et géométriques, d'après Varnes, 1978, adaptée par Campina, 2005.

Type de mouvement			Type de matériau		
			Roche	Sols	
				grossiers	Fins
Chutes			<i>Ecoulement rocheux</i> <i>Rock fall</i>	<i>Ecroulement de débris</i> <i>Débris fall</i>	<i>Ecroulement de terrain</i> <i>Earth fall</i>
Basculements			<i>Basculement rocheux</i> <i>Rock topple</i>	<i>Basculement de débris</i> <i>Debris topple</i>	<i>Basculement de terrain</i> <i>Earth topple</i>
Glissements	Rotation	Peu d'unités	<i>Affaissement rocheux</i> <i>Rock slump</i>	<i>Affaissement de débris</i> <i>Debris slump</i>	<i>Affaissement de terrain</i> <i>Earth slump</i>
	Translation	Unités multiples	<i>Mass rocheux en glissement</i> <i>Rock block slide</i>	<i>Débris en glissement</i> <i>Debris block slide</i>	<i>Terrain en glissement</i> <i>Earth slide</i>
			<i>Glissement rocheux</i> <i>Rock slide</i>	<i>Glissement de débris</i> <i>Debris slide</i>	<i>Glissement de terrain</i> <i>Earth slide</i>
Etalement latéraux			<i>Etalement des roches</i> <i>Rock spread</i>	<i>Etalement de débris</i> <i>Debris spread</i>	<i>Etalement de terrain</i> <i>Earth spread</i>
Ecoulements			<i>Avalanche de roche</i> <i>Rock flow</i>	<i>Lave torrentiel</i> <i>Debris flow</i>	<i>Coulé de terrain</i> <i>Earth flow</i>
Complexe			<i>Combinaison de deux ou plusieurs type de mouvement principaux</i>		

Enfin et dans un cadre plus général, on peut classer ces phénomènes **suivant la rhéologie** et suivant la nature des matériaux glissés. Sous l'angle rhéologique, les mouvements de pente sont classés en deux grandes familles :

- Les glissements proprement dits, qui se caractérisent par l'apparition de surfaces de cisaillement bien définies à l'intérieur du milieu. Dans ce cas, le milieu a un comportement élasto-plastique.
- Les fluages et les coulées boueuses qui se caractérisent respectivement par une déformation de type visco-plastique ou un écoulement de type fluide. Suivant la nature des matériaux qui constituent le terrain, nous distinguons dans la pratique trois types de mouvement :

- 1) Les mouvements affectant des sols.
- 2) Les mouvements affectant des masses rocheuses dissociées et remaniées (qui se comportent de fait comme des sols).
- 3) Les mouvements et écartements affectant les roches massives diaclasées.

Il apparaît des divergences entre les différentes classifications. Cela concerne à la fois les volumes concernés, les matériaux affectés, les modes de déplacements et les conséquences qui peuvent en résulter. Ceci rend la tâche de classification des mouvements de pente de notre secteur difficile à établir, vu que la chaîne des bibans présente une grande variété des terrains, associée à une forte complexité morphologique. Cependant, d'une manière relativement simpliste, en faisant appel à la classification et aux définitions fournies par l'Association Internationale des géomorphologues ([Dikau et al, 1996](#)), associées à la seconde édition du livre "Hillslope materials and processes" ([Selby, 1993](#)) qui a été largement consulté pour la rédaction de ce paragraphe, nous avons pu mettre en place une typologie globale et pragmatique des mouvements de pente pour la région biban dans son ensemble et pour notre zone d'étude en particulier.

Cela nous a permis de retenir Cinq grandes familles de phénomènes, simple à cartographier et à reconnaître d'un point de vue morphologique sur la photo-interprétation des photosatellites du programme Google Earth et des images photographiques sur terrain, à savoir :

- i. Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs.
- ii. Les glissements.
- iii. Les écoulements, ou coulées de masses.
- iv. Sapement de berge.
- v. Ravinement.

## 2.1. Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs



**Figure 25 :** Exemple de chutes de pierre et de blocs dans le sud de la zone.

Cette classe regroupe un ensemble de phénomènes rapides et brutaux qui affectent généralement des roches rigides et fracturées tels que les calcaires, les grès, ou les roches cristallines, etc. Dans le cas des roches sédimentaires, les joints de stratification et le diaclasage accroissent le nombre de discontinuités dans la roche et donc sa prédisposition à l'instabilité. La phase de préparation de la chute d'éléments rocheux est longue, et difficile à déceler (altération des joints de stratification, endommagement progressif des roches qui conduit à l'ouverture limitée des fractures, etc.). La phase d'accélération qui va jusqu'à la rupture est brève (Selby, 1993 ; Flageollet et al., 1996...) ce qui rend ces phénomènes très difficilement prévisibles. Les facteurs naturels favorisant leur déclenchement sont nombreux. On peut citer par exemple les fortes variations de températures (thermoclastie, cycle gel/dégel), la croissance de la végétation (disjonction

racinaire) ou au contraire sa disparition, les pressions hydrostatiques imposées par la pluviométrie et la fonte des neiges, les séismes...etc .

Le volume total éboulé permet de différencier les différents phénomènes entre eux (Whalley et al., 1983 ; Whalley, 1984) : on parle de chutes de pierres et de blocs (figure 25) lorsque ce volume est inférieur à la centaine de m<sup>3</sup>, d'éboulement lorsqu'il est compris entre quelques centaines de m<sup>3</sup> et quelques centaines de milliers de m<sup>3</sup>, et d'éboulement en grande masse (ou écroulement) lorsqu'il est supérieur au million de m<sup>3</sup>.

La figure 25 montre un exemple d'écroulement de barre rocheuse au niveau des terrains qui constitue la limite Est de l'extension urbaine de khelil. Ce phénomène se rencontre essentiellement sur les terrains argiles et conglomérat de mio-pliocène.

### **Les risques**

Étant donné la rapidité, la soudaineté et le caractère souvent imprévisible de ces phénomènes, les instabilités rocheuses constituent **des dangers pour les vies humaines, même pour de faibles volumes** (chutes de pierres). Les chutes de blocs, et a fortiori les éboulements, peuvent causer des dommages importants aux structures pouvant aller jusqu'à leur ruine complète, d'autant que l'énergie (fonction de la masse et de la vitesse) des blocs est grande (Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement de LYON rapport atlas départementale Aout 2013).

## **2.2 Les glissements**

Les glissements de terrain correspondent à des déplacements lents d'une masse de terre généralement cohérente, surtout dans le cas des sols et des formations tendres. Quand il s'agit de formations rocheuses compétentes, les glissements se manifestent généralement par une très grande vitesse, de l'ordre de 3m/s. La formation d'un glissement de terrain implique l'existence initiale d'une surface de rupture généralement courbe ou plane.



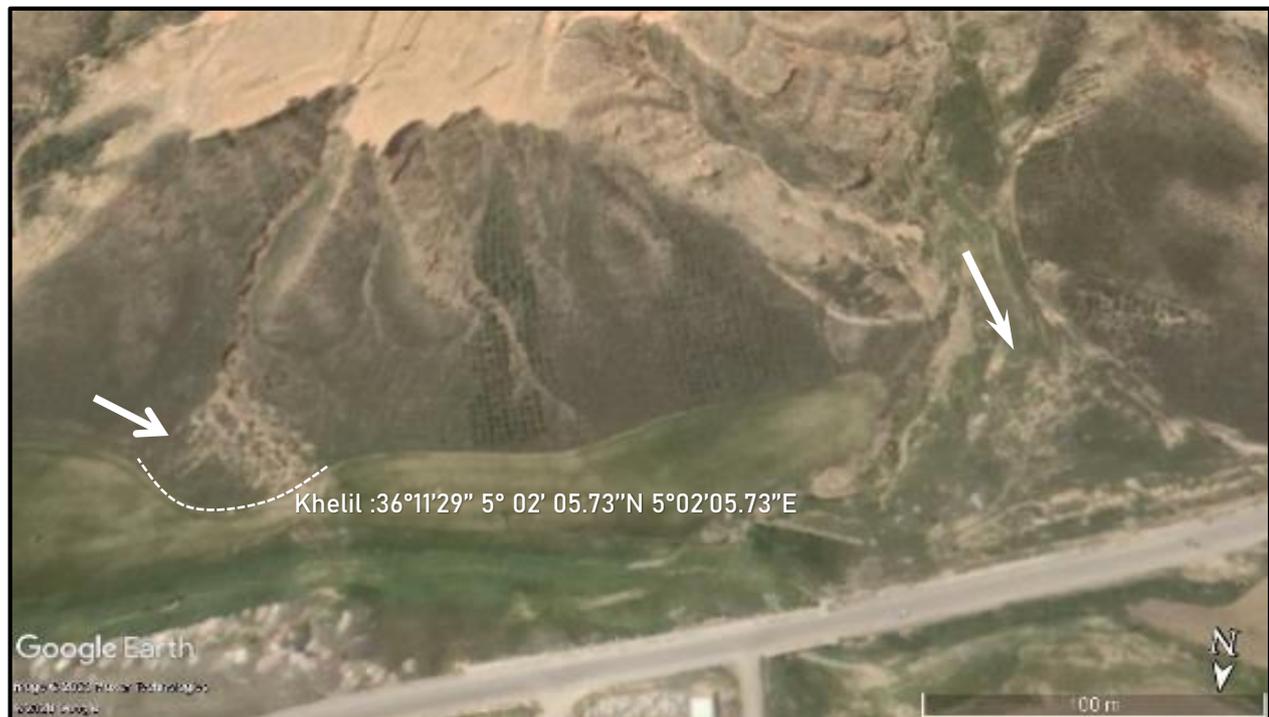
**Figure 26 :** Exemples de glissements provoqué par le séismes 2003 dans la zone d'étude.

Cet glissement selon la parole des habitants de cette village ils ont me dit que ces glissements sont déclencher par le séisme 2003 de Bouremedes .

### 2.3 Les écoulement, ou coulées de masses

Ce genre de processus se manifeste par un mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, de tailles très variables, à forte teneur en eau, et de consistance plus ou moins visqueuse (Radbruch-Hall et al., 1976 ; Varnes, 1978 ; Selby, 1993 ; Corominas et al., 1996 ; ...etc). Ces coulées sont très souvent la conséquence de la déforestation, là où couche superficielle du sol, soumise à de fortes précipitations, se décroche et glisse en

masse ou en tapis sur un plan lubrifié le long de la pente. Dans le cas le plus courant les coulées de masses résultent de l'évolution de grands glissements et prennent naissance dans leur partie amont (Selby, 1993).



**Figure 27 :** Exemple de coulée de masse dans la zone d'étude (cône de déjection).

## 2.4 Sapement des berges

Lors des crues, les écoulements affouillent la base des berges des oueds, qui s'écroulent sous l'effet du poids des matériaux en surplomb. Cette forme d'érosion qui s'observe surtout au niveau des méandres des oueds, s'exerce sur les rives concaves du lit de l'oued, et s'accompagne de dépôt latéraux de matériaux sur les rives convexes de l'aval ces dépôts sont mobiles d'une crue (Cherif, 2003).

Ce phénomène peut conditionner des mouvements de pente comme le montre la figure suivante :



**Figure 28** : exemple de sapement des berges conditionne un mouvement de pente sur la zone d'étude.

## 2.5 Ravinement

Erosion linéaire par l'énergie du ruissellement se manifeste par des griffes (centimétrique), des rigoles (quelque décimètre) ou des ravines de plus de 50 mètres de profondeur, des ravines de plusieurs mètres de profondeur et des « badlands » ou ravinement généralisé, lorsque la surface primitive et complètement disparu (Rose et al.,1995)

Les géographes insistaient jadis sur l'opposition pouvant se développer entre les processus de ravinement et de mouvement de pente. « Si le ruissèlement domine, les ravines marqueront l'évolution des versant. Par contre si l'infiltration domine, les risque de glissement augment » (Rape et all.,1972). En réalité sur le terrain on observe souvent

la présence des deux processus, mais agissant successivement dans le temps. Soit le ravinement est précédé d'un mouvement de pente au sommet d'un versant concave qui rassemble les eaux de surfaces. Soit le ravinement déséquilibre un versant qui évolué ensuit par décrochement successifs (Rose et al.,1995).



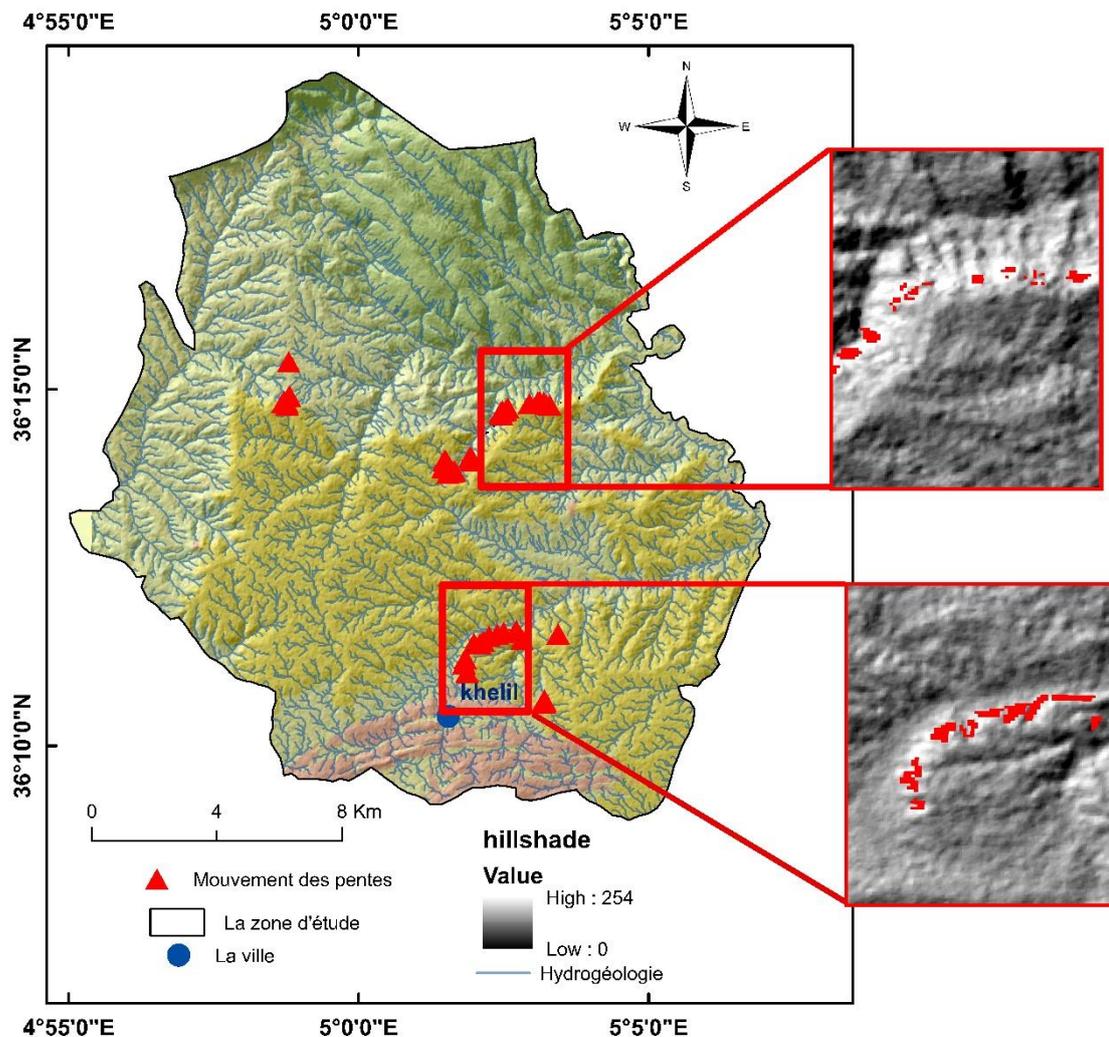
**Figure 29** : exemple de ravinement sur le terrain.

### **3. Inventaire des mouvements de terrain de khelil**

#### **3.1 Données de base et cadre théorique de l'inventaire cartographique des MP**

Toute étude de cartographie et d'évaluation du risque et/ou de l'aléa mouvements de pente pour un secteur donné, doit inévitablement être précédée par **la collecte d'un maximum d'information** sur la position des mouvements de pente hérités et actuels, ce qui revient à leur cartographie. L'inventaire de ces derniers représente la forme la plus simple de leur cartographie (Hansen, 1984) permettant d'enregistrer leurs emplacements qui constitue l'élément de base pour toute modélisation ou prédiction de l'aléa, et définir leurs types dans la mesure où des traces perceptibles existent toujours (Varnes, 1984). Pour effectuer un inventaire de mouvements de pente plusieurs techniques peuvent se présenter, et dépendent de **la taille des phénomènes, l'étendue de la zone d'étude**, les échelles des cartes de base, des **images satellitaires et des photos aériennes des photos**

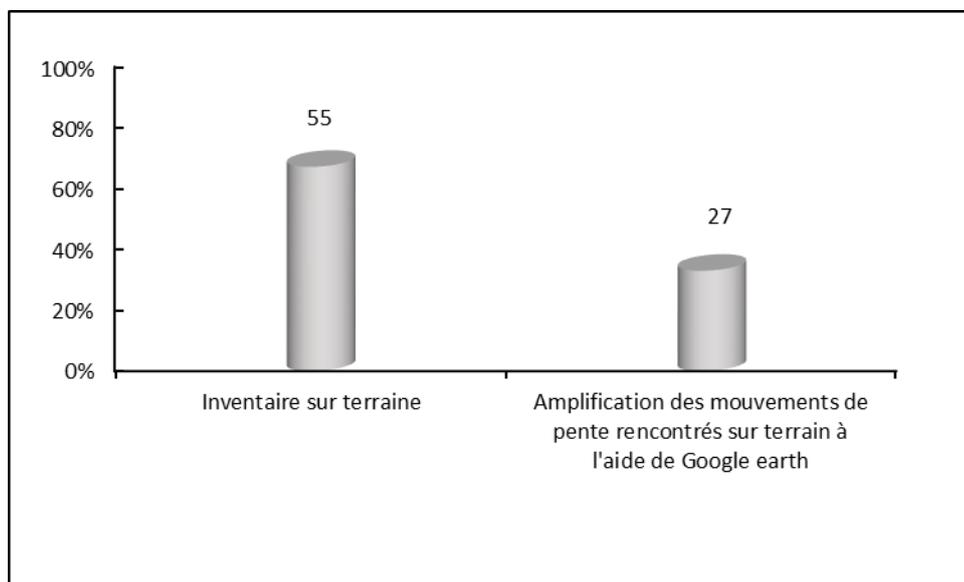
sur terrain, la qualité et la précision des informations accessibles, et les ressources disponibles pour mener à bien un tel travail (Guzzetti et al., 2000).



**Figure 30 :** Cartes d’inventaire des mouvements de pente de la zone d’étude

### 3.2 Qualité de la carte d’inventaire des MP

D’après Carrara et al., 1992 ; Guzzetti et al., 1994 ; Guzzetti, 2005 ; Galli et al., 2008 ; Blahut et al., 2010, il est clair qu’il n’existe aucune méthode standard permettant d’évaluer la qualité d’une carte d’inventaire de mouvement de pente.



**Figure 31** : Histogramme comparatif du nombre de mouvement de pente identifiés par photo-interprétation et sur le terrain.

### 3.3 Synthèse

L'inventaire effectué a permis de détecter 82 mouvements de pente. Ils couvrent une superficie totale de 0,408155Km<sup>2</sup>, soit 0,184% de la superficie globale de la zone d'étude (222,754169 Km<sup>2</sup>).

Il est à noter cependant, que le changement de la taille des mouvements de pente se fait d'une façon progressive entre les petites et les grandes superficies, ce qui justifie que dans une même région, il est possible de rencontrer tous type de mouvements de pente et d'ampleurs variables, et qu'il n'existe pas une distribution géographique préférentielle des phénomènes en fonction de leur taille (superficie).

#### **4. Conclusion**

L'inventaire et la caractérisation des mouvements de pente récents et fonctionnels d'un secteur donné constituent un élément de base pour la prédiction de leur occurrence future. Dans ce chapitre, après avoir fait un état d'art sur les méthodes de classifications et de typologie de mouvements de versants, la quasi-totalité de ces derniers a été repéré par interprétation visuelle d'images satellitaires de Google Earth suivie d'observations de terrain. Ensuite, leur cartographie (digitalisation) a été conduite directement au sein et à l'aide de notre programme SIG, pour construire une partie de la base de données d'une part, et pour compléter la métadonnée comportant les caractéristiques (cordonnées, superficie, périmètre, type...etc) des mouvements de pente de notre secteur.

## **Chapitre IV : Préparation des variables prédictives pour la cartographie de la susceptibilité.**

---

### **Résumé du chapitre**

Ce chapitre est axé sur l'étude des variables prédictives (facteurs conditionnant de l'occurrence des mouvements de pente) par leur acquisition, description, ainsi que leur spatialisation, permettant leur superposition, consultation, en plus de leur croisement avec la variable à modéliser (les mouvements de pente) afin d'étudier leur relation avec celle-ci dans la zone d'étude.

## 1. Introduction

Nombreuses sont les méthodes et les techniques d'évaluation de la susceptibilité, ce qui fait qu'aucun accord général n'a encore été trouvé que ce soit pour les méthodes ou les échelles à utiliser pour le réalisation d'un zonage de susceptibilité aux mouvements de pente (Brabb, 1984 ; Varnes, 1984 ; Carrara, 1989 ; Nieto, 1989 ; Carrara et al., 1991 ; Soeters et Van Westen, 1996 ; Van Westen et al., 1997 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al, 1999 ; Crozier et Glade, 2005 ; Glade et Crozier, 2005, Guzzetti, 2005). Cette absence d'accord est le plus souvent accentuée par la variabilité des techniques et outils disponibles pour mener un tel travail. Malgré les divergences existantes, de grands points (hypothèses) de concordance sont à souligner et constituent le fondement de la quasi-totalité des démarches :

-1 Les mouvements de pente après leur déclenchement laissent des traces qui permettent leur reconnaissance, cartographie et classification via les travaux de terrain, ou les techniques de la télédétection spatiale satellitaires et aéroportées (Rib et Liang, 1978 ; Varnes, 1978 ; Hansen, 1984 ; Hutchinson, 1988 ; Cruden et Varnes, 1996 ; Dikau et al., 1996 ; Griffiths, 1999 ; Guzzetti, 2005) ;

-2 Les instabilités gravitaires des versants sont régies par des lois mécaniques qui peuvent être déterminées empiriquement, statistiquement ou par des méthodes déterministes (Guzzetti, 2005). En outre, les principaux facteurs intervenant directement ou indirectement dans la genèse des mouvements peuvent être reconnus, cartographiés et utilisés pour établir des modèles prédictifs de l'occurrence des mouvements de pente (Crozier, 1986 ; Hutchinson, 1988 ; Dietrich et al., 1995 ; Guzzetti, 2005) ;

-3 Le principe de la causalité (*The past and present are keys to the future*, Varnes, 1984 ; Carrara et al., 1991 ; Hutchinson, 1995) est la clef de base pour la compréhension du comportement des mouvements sur les versants. Il implique que les futures instabilités surviendront selon des conditions d'occurrence similaires à celles des mouvements antérieurs ; et donc la possibilité de prédire les endroits potentiels de déclenchement ;

-4 L'évaluation de l'occurrence spatiale et temporelle des mouvements de pente peut être effectuée par voie heuristique (analyse qualitative), probabiliste statistique, ou par l'application de modèles physiques, ce qui permettra d'aboutir à un zonage de la susceptibilité (ou de l'aléa) en différentes classes (niveaux) (Carrara et al., 1995 ; Soeters

et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999 ; Guzzetti, 2005).

## 2. Echelles d'analyse

Définir l'échelle d'analyse, est la toute première étape de tout travail de cartographie (ou évaluation) de la susceptibilité (et/ou de l'aléa), comme nous l'avons précisé précédemment (. Pour ce faire, il faut se poser deux questions principales : -1° Quelle est la précision (finalité) des résultats à obtenir ? et -2° quels sont les moyens disponibles pour la réalisation de l'étude ? Après quoi, il faut et il est désormais possible de sélectionner la méthode (ou les méthodes) adaptée(s). L'échelle de travail de la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa mouvement de pente dépend essentiellement de trois facteurs (Aleotti et Chowdhury, 1999) :

- L'objet de l'étude ;
- L'étendue de la zone d'étude ;
- La disponibilité des données.

Les premières échelles d'analyse ont été fixées initialement par l'Association Internationale des Géologues Ingénieurs (IAEG, 1976). Ces dernières au nombre de quatre, ont été reprise par Van Westen, 1993, où on distingue :

- Echelle synoptique ou régionale :  $< 1/100\,000$
- Echelle moyenne :  $1/25\,000 - 1/50\,000$
- Echelle large :  $1/5\,000 - 1/10\,000$
- Echelle détaillée :  $> 1/5\,000$

Les mêmes échelles ont été adoptées en 2007 par le Comité Technique International Joint pour l'étude des mouvements de terrain (JTC-1, 2007), avec un léger changement d'appellation, où l'échelle synoptique ou régionale est désormais appelée petite échelle. Dans la thèse de Thiery, 2007 ; et celle de Maquaire, 2002, une subdivision plus complète et plus pragmatique des échelles d'analyse a été établie, et on parle de :

- Echelle nationale :  $1/1\,000\,000$  :
- Echelle régionale :  $1/100\,000$  à  $1/500\,000$
- Echelle moyenne :  $1/25\,000$  à  $1/50\,000$

- Echelle large : 1/15 000 à 1/ 5 000
- Echelle locale : 1/1 000 à 1/5 000

Le tableau 9 résume les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvements de pente. Les cartes de susceptibilité aux mouvements de pente devraient être préparées à une échelle appropriée afin de monter les informations requises à un niveau de zonage particulier. Cependant, dans

**Tableau 9** : Les différentes échelles d'analyse pour l'aléa mouvement de versant (d'après, [Maquaire, 2002](#) ; [Van Westen et al, 2008](#)).

Echelle	Valeur indicatives	Taille indicative de la zone d'étude
Nationale	1/1 :000.000 <sup>ème</sup> ou +	Pays et/ou région (>10 000 km <sup>2</sup> )
Régionale	1/100.000 <sup>ème</sup> à 1/500.000 <sup>ème</sup>	Région (de 10 000 à 1000 Km <sup>2</sup> )
Moyenne	1/25.000 <sup>ème</sup> à 1/100.000 <sup>ème</sup>	Bassin versant (de 1 000 à 100 Km <sup>2</sup> )
Large	1/5.000 <sup>ème</sup> à 1/25.000 <sup>ème</sup>	Bassin versant ou versant (de 100 à 10 km <sup>2</sup> )
Locale	Du 1/5.000 <sup>ème</sup> au 1/1.000 <sup>ème</sup>	Versant ou site instable (<10Km <sup>2</sup> )

### 3. Méthodes pour la cartographie de la susceptibilité

La cartographie de la susceptibilité définit la localisation et la caractérisation des mouvements de pente identifiés sur le site d'étude, ainsi que l'estimation des zones pouvant potentiellement être affectés dans le futur. Elle concerne principalement les zones " sources " des mouvements de pente (zone de rupture) et intègre parfois des informations sur les zones pouvant être touchées par la propagation et/ou la régression des mouvements. Les zones potentiellement soumises à la rupture et les zones soumises à la propagation / régression des mouvements sont généralement analysées de manière indépendant. La susceptibilité ne tient pas compte de la fréquence des mouvements de pente (probabilité annuelle), ni de leur intensité (volume et magnitude potentielle) ([Mărgărint et al.,2011](#)).

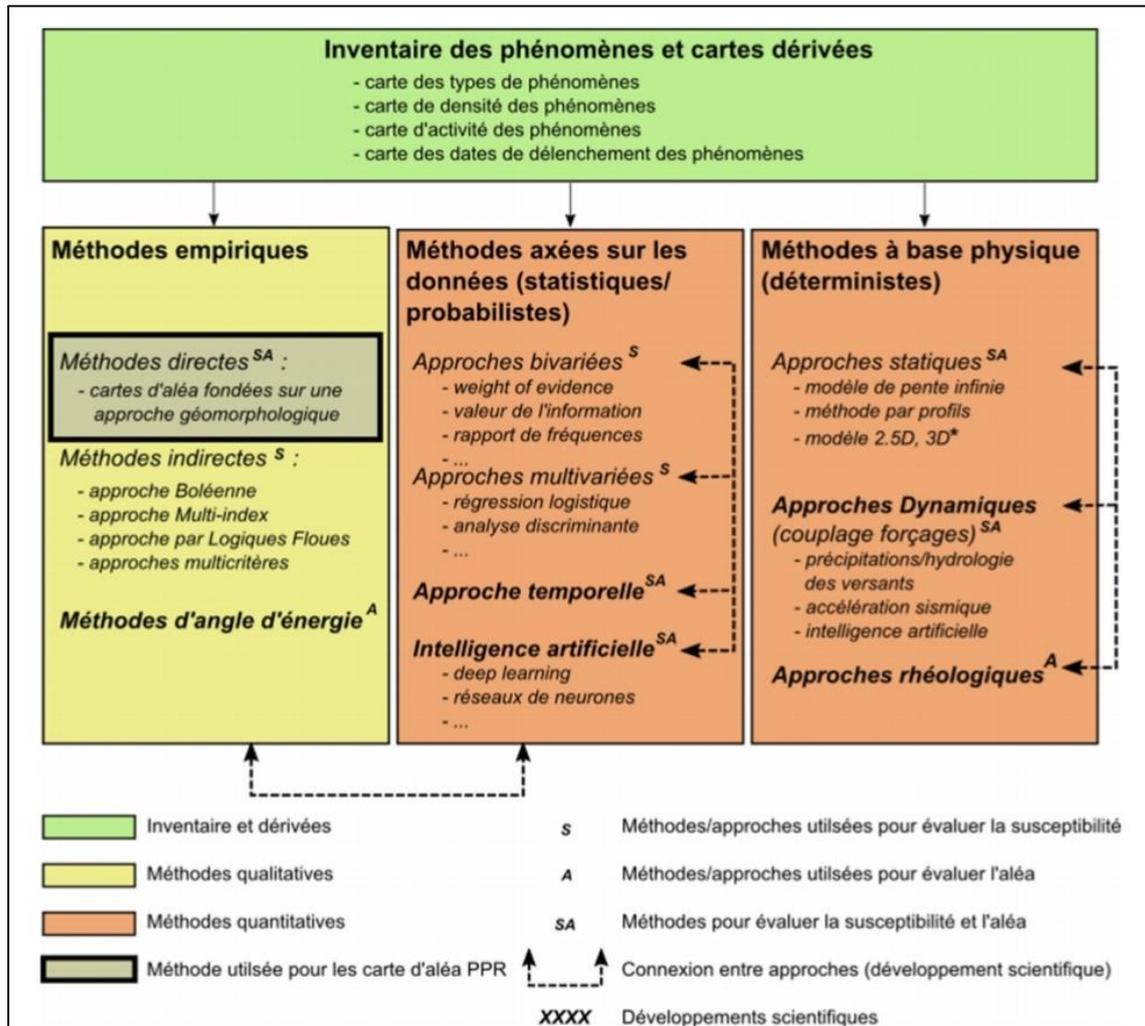
On observe dans la littérature une multiplication des travaux dédiés aux mouvements de pente. Les approches visant l'impact potentiel de ces glissements, par l'élaboration des cartes de susceptibilité, sont signalées dès les années 1970 ([Brabb & Pampeyan, 1972](#) ; [Kienholz, 1978](#)). Récemment, les études méthodologiques visant la réalisation de telles

cartes se sont multipliées en bénéficiant de la généralisation des systèmes géo-informationnels, de l'augmentation spectaculaire des sources d'acquisition des données spatiales par l'intermédiaire des images satellitaires et du développement des modèles statistiques pour expliquer et prévoir les phénomènes naturels (Van Westen, 2008).

Certains chercheurs ont appliqué de nombreuses méthodes pour évaluer la susceptibilité, l'aléa et le risque « mouvement de pente » à travers le monde. Un aperçu sur les différentes méthodes de cartographies de la susceptibilité et de risque mouvement de pente sont données par Barbb (1984), Varnes (1984), Hansen (1984), Hutchinson (1991), Carrara et al. (1995), Soeters et Van Westen (1996), Aleotti et Chowdhury (1999), Guzzetti et al. (1999), Gorsevki et al. (2003), Hubain et al (2005), Kanungo et al. (2009) et Safaei et al. (2011).

Selon le degré de subjectivité introduit dans l'analyse, trois approches peuvent être distinguées. On trouvera dans la littérature ( Soeters et Van Westen, 1996 ; Leroi,1996 ; Aleotti et chowdhury, 1999 ; Dai & Lee, 2001 ; Van Westen et al., 2003 ; Van Westen et al., 2006 ; Van Westen, 2008 )

- L'approche qualitative fondée sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation ;
- L'approche semi-quantitative qui tend à diminuer la part de subjectivité liée à l'expert ;
- L'approche quantitative basée sur des critères de pondération " Objectifs ", mettant en relation les phénomènes observés et les facteurs de prédisposition cartographiés.



**Figure 32 :** Méthodes pour évaluer la susceptibilité et l'aléa glissement de terrain (d'après Soeters et van Westen ,1996 ; van Westen et al., 2006 ; fell et al., 2008 ;Corominas et al,2014)

#### 4. Etapes de la modélisation de la susceptibilité sous SIG

Décrire les différentes étapes pour la modélisation de la susceptibilité aux mouvements de pente à l'aide d'un SIG peut paraître très long, mais indispensable pour la compréhension de la suite logique des processus. La première des étapes est de se fixer une échelle de travail (dans notre cas : échelle moyenne) la définition des méthodes adaptées, suivie par la collecte des données existantes (cartes géologiques, géomorphologiques, topographiques, ou toute autres carte thématique, rapports, données bibliographiques...etc). Dans une seconde étape, l'interprétation des données de la télédétection spatiale satellitaire et aéroportée est conduite et est complétée par des missions de contrôle sur le terrain pour réaliser :

-1° L'inventaire des phénomènes (Cf. chapitre 3) (mouvements de pente ou appelés variable à modéliser) ;

-2° La cartographie des paramètres les plus significatifs (entamé dans ce chapitre) (facteurs conditionnant) et leur analyse. En parallèle la structuration d'une base de données et de sa métadonnée est effectuée ainsi que son géocodage. Toutes les étapes que l'on vient d'énumérer doivent être validées, et les données qui en résultent, doivent être transformées au format adéquat pour leur exploitation informatique.

Enfin -3° La définition des pondérations relatives (en respectant les lois de la méthode utilisée) pour chaque facteur causal pour la localisation des phénomènes, ce qui définit la relation entre la distribution spatiale des phénomènes et les facteurs intervenant dans leur genèse, afin d'aboutir au produit ultime qui est **la carte de susceptibilité**.

## **5. Préparation des variable prédictive et leur analyse**

### **5.1 Les variables géométriques ou topographiques : gradient de pente, altitude et expositions, TWI (Facteur d'humidité topographique)**

Les paramètres géométriques appelés aussi topographiques sont indispensables pour toute **évaluation quantitative ou semi quantitative de la susceptibilité** et de l'aléa « mouvements de pente ». Ces paramètres ont été toujours bien adaptée pour d'autres types d'études comme la **caractérisation morphostructurale d'un secteur donné**. Les produits topographiques numériques se sont développés avec le développement des technologies informatiques (Matériel et Logiciels). Des logiciels spécifiques peuvent désormais réaliser, à partir de données numériques (MNT), des cartes en courbes de niveaux à des échelles différentes, des profils topographiques de terrain, des cartes de gradient des pentes, des ombrages et plusieurs sortes de traitements relatifs à l'imagerie en général. Le MNT de la zone de khelil a été automatiquement calculé à partir des données Radar ASTER GDEM.

- **Définition modèle numérique de terrain**

La représentation des formes du terrain consiste à traduire, dans un plan bidimensionnel, la surface topographique tridimensionnelle. Plusieurs formes de représentations du relief sont utilisées : les points côtés, les courbes de niveau, l'estompage ou les vues en perspective. Avec le développement de la cartographie

numérique et les systèmes d'information géographique, l'information altimétrique sous forme numérique offre une souplesse et une flexibilité considérables. Cette forme numérique du relief s'appelle Modèle numérique du Terrain (MNT).

- **Modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude**

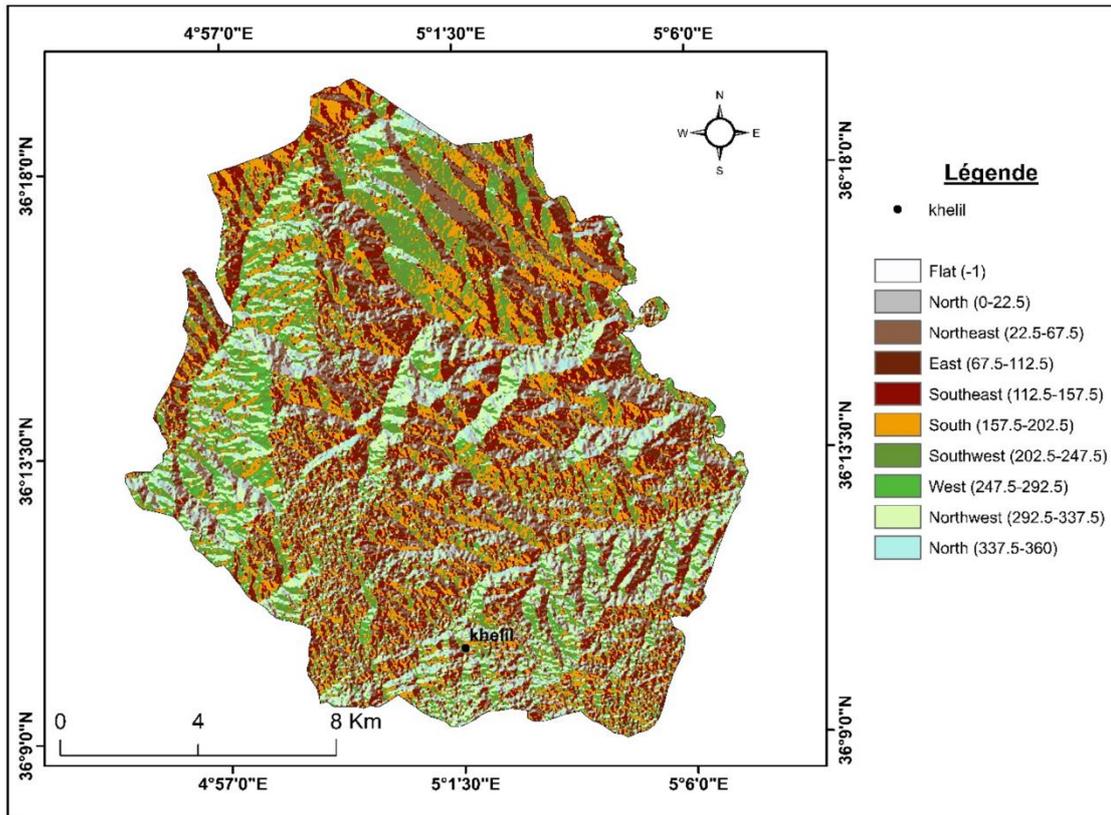
Le MNT de la zone de khelil a été calculé automatiquement à partir des données Radar. Ces derniers sont directement téléchargeables sur le site officiel de la NASA <https://earthdata.nasa.gov/>, et correspondent parfaitement à la finalité souhaitée, du moment que la taille d'un pixel est de 30 mètres (échelle bien adaptée à l'étendue de la région d'étude), et que la totalité de la région est disponible.

### 1) Expositions

L'exposition d'un versant représente son orientation par rapport au Nord. Elle est déterminée par mesure de l'angle existant entre le Nord et la projection horizontale de la ligne de pente maximale d'un versant, et ce en se déplaçant dans le sens des aiguilles d'une montre.

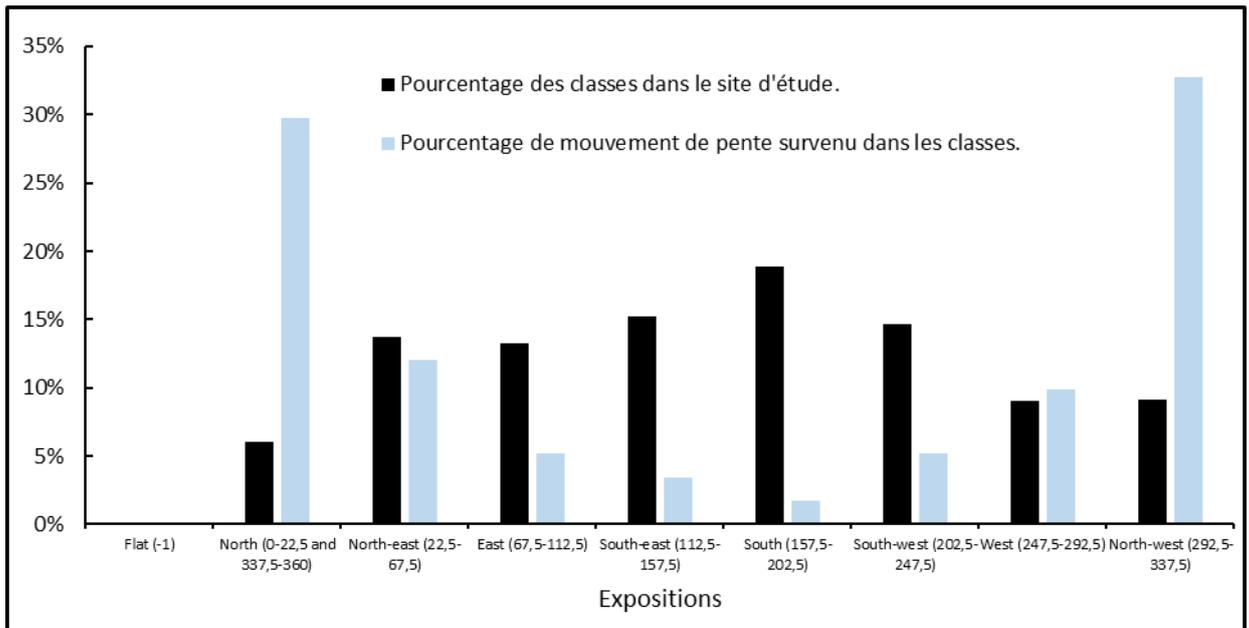
Le changement de l'exposition des versants équivaut une grande variabilité de l'obliquité par rapport aux **rayons solaire**, la durée d'ensoleillement des versants, ainsi que des apports énergétiques (**vents, température...**) inégaux. Cela rend très **différente la prédisposition** des versants aux mouvements de pente. La Figure (33) donne une représentation cartographique simplifiée en 9 classes d'orientation des versants dans le sens des aiguilles d'une montre : Nord ; Nord – Est ; Est ; Sud – Est ; Sud ; Sud – Ouest ; Ouest ; Nord – Ouest ; et finalement les terrains plats dont l'exposition est nulles.

La carte a été réalisée à l'aide de la commande "Analyse de surface" du module "Spatial Analyst" qui est implémenté dans ArcGis 10.1.



**Figure 33 :** Carte des expositions de la zone d'étude.

L'analyse statistique de la figure 34 nous a permis de constater que les mouvements de pente sont localisés beaucoup plus sur les versants orientés vers le Nord-Ouest soit 32.76% (la classes la plus influente) suivie par les versants orientés vers le Nord (29.74%). Vers le Nord-Est (12.07%) et enfin vers Ouest avec un pourcentage de 9.91%. Ces quatre orientations présentent des densités supérieures comparativement aux autres.

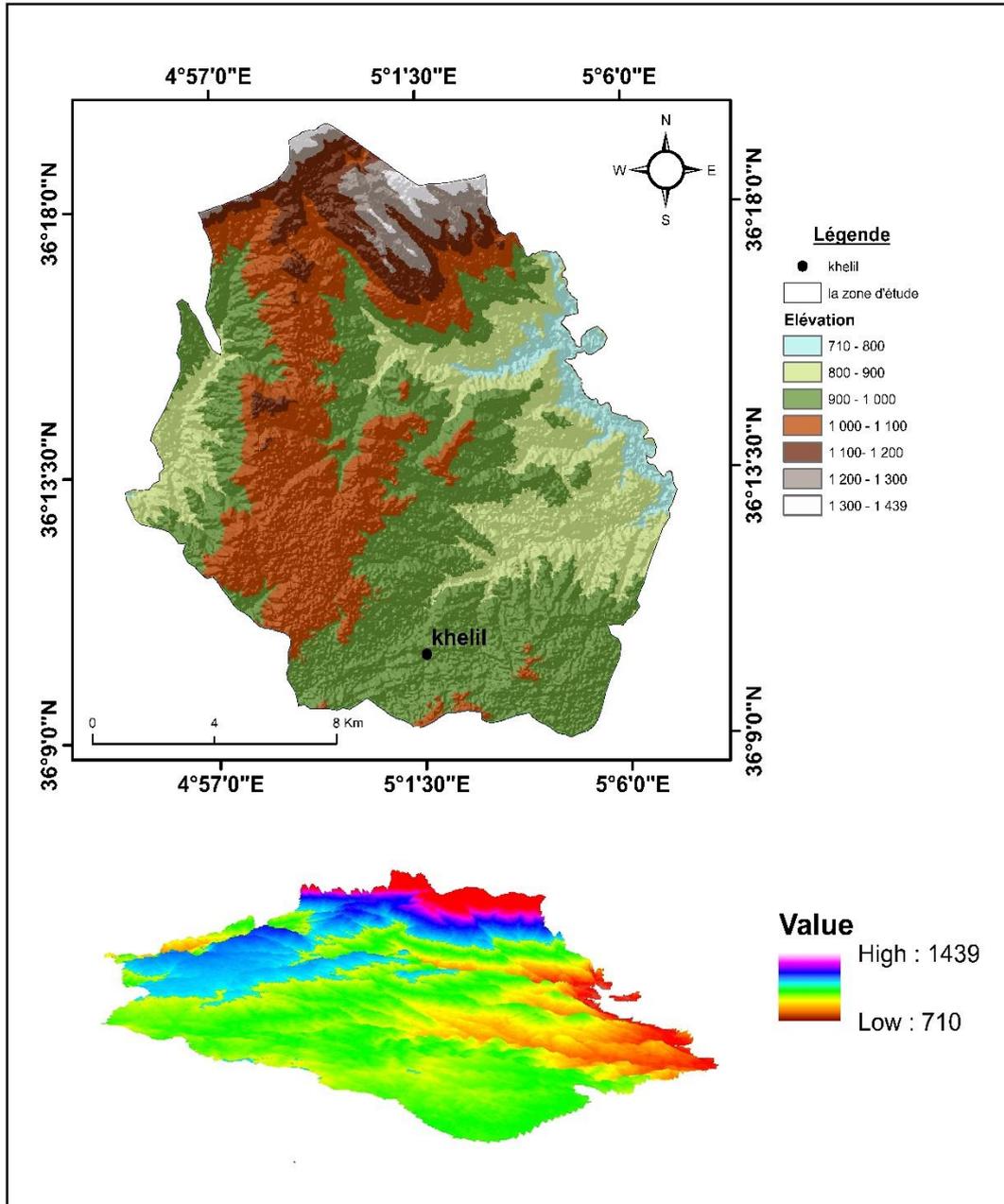


**Figure 34 :** Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'exposition de pentes et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

## 2) Altitude ou hypsométrie

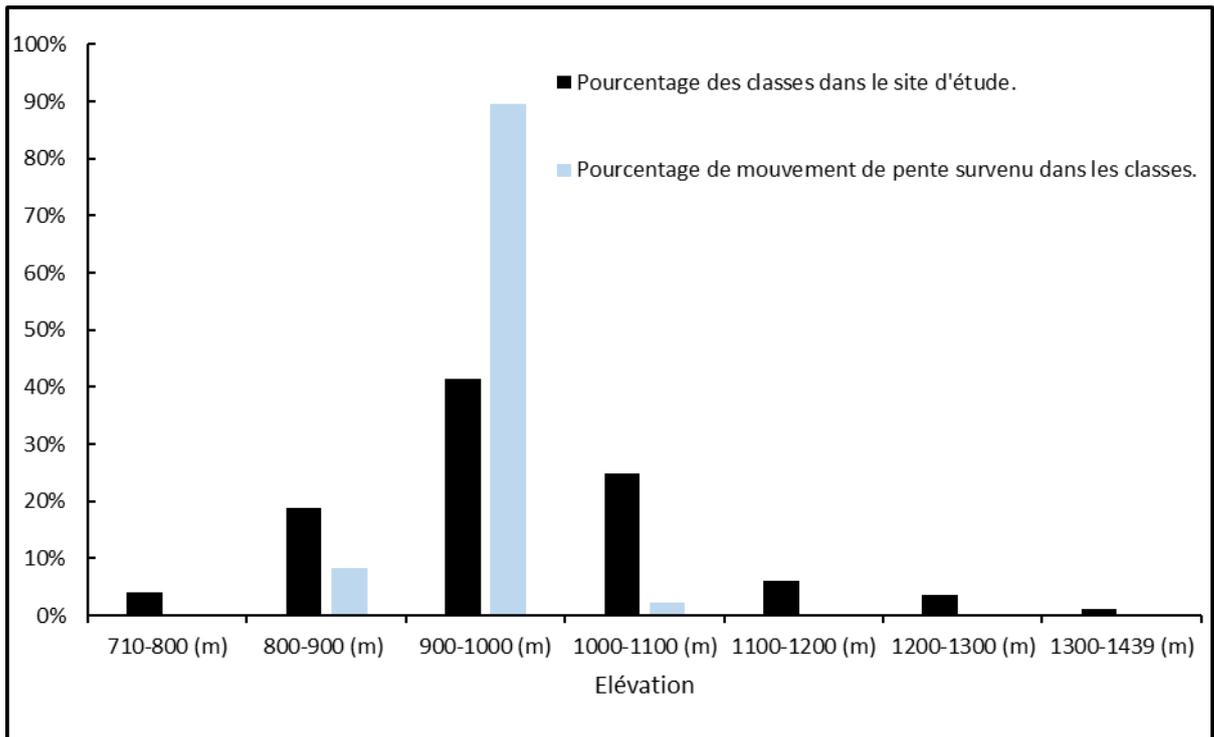
Peut-être aussi appelée carte d'élévation peut être définie comme étant un document qui matérialise **la répartition de l'énergie du relief**. L'élaboration d'une telle carte, se fait classiquement par l'assemblage des courbes de niveau de la carte topographique en classes d'altitude variables. Car dans un MNT traduit l'élévation de chaque point est exprimée en mètre, ainsi les différentes classes sont obtenues automatiquement par regroupement en intervalles d'altitude spécifiques selon le besoin et le type d'analyse. Cependant, l'interprétation des données altimétriques peut être effectuée plus facilement par l'interprétation d'images.

La carte a été réalisée à l'aide de la commande " reclassify (spatiale analyse tools)" qui est implémenté dans ArcGis 10.1.



**Figure 35 :** Carte hypsométrique de la zone d'étude.

L'analyse des données d'élévation figure 36 indique que l'élévation comprise entre 900 et 1000 mètres dominantes dans le site d'étude est contenue des mouvements de pente plus que l'autre.



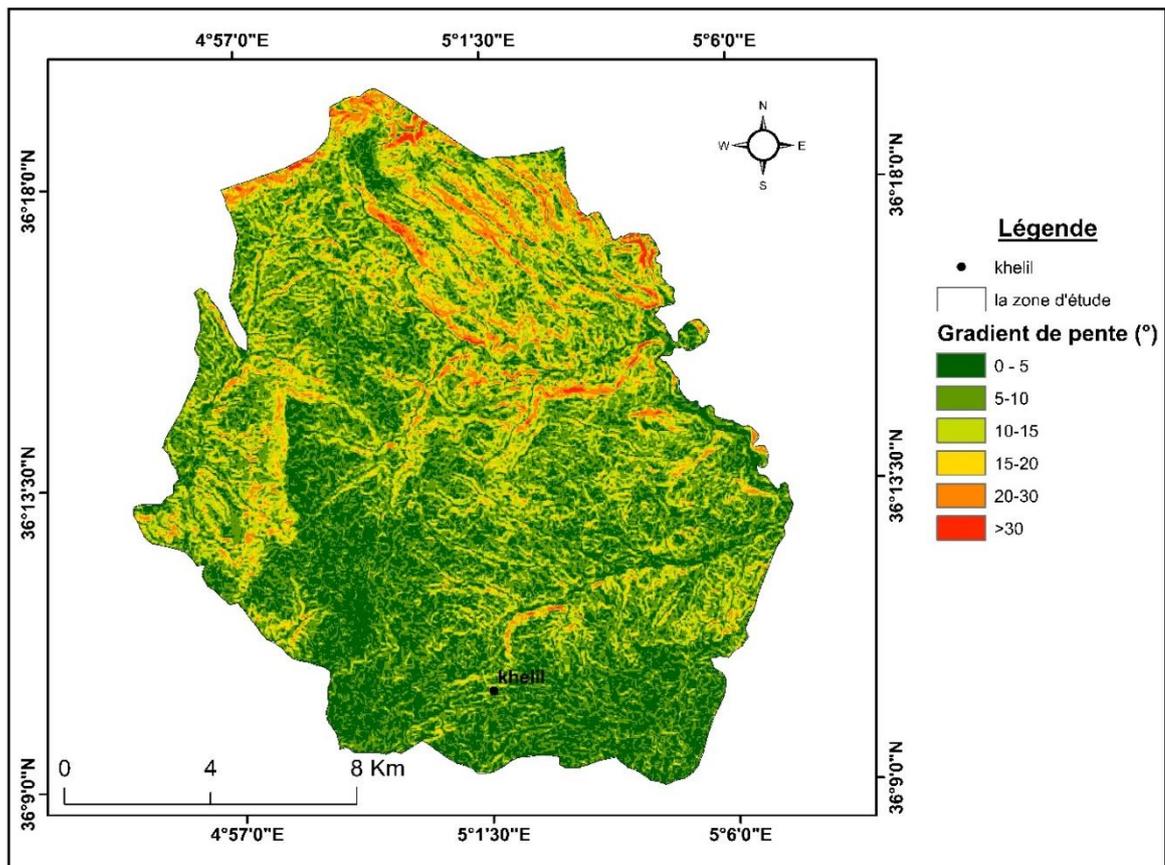
**Figure 36 :** Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'élévation et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

### 3) Gradient de pente

Pour un même matériau dont le poids et les caractéristiques mécaniques sont invariables, l'augmentation de l'angle de pente se traduit par une augmentation de la contrainte tangentielle au cisaillement. Et par conséquent, à une diminution du coefficient de sécurité. L'étude du gradient de pente est donc indispensable pour comprendre la dynamique des versants. Toutefois, comme le soulignait déjà [Millies-Lacroix en 1968](#), il demeure indispensable de l'associer à d'autres facteurs environnementaux, afin de limiter au mieux les incertitudes sur les évaluations de la stabilité. Cela s'explique par l'existence d'une multitude de méthode de calcul de stabilité ; mais aucune n'est parfaite ; car aucune ne prend en considération le paramètre de la déformabilité du sol, ce qui est en relation avec la méconnaissance des lois de comportement des sols considérés toujours comme étant rigide et/ou plastique.

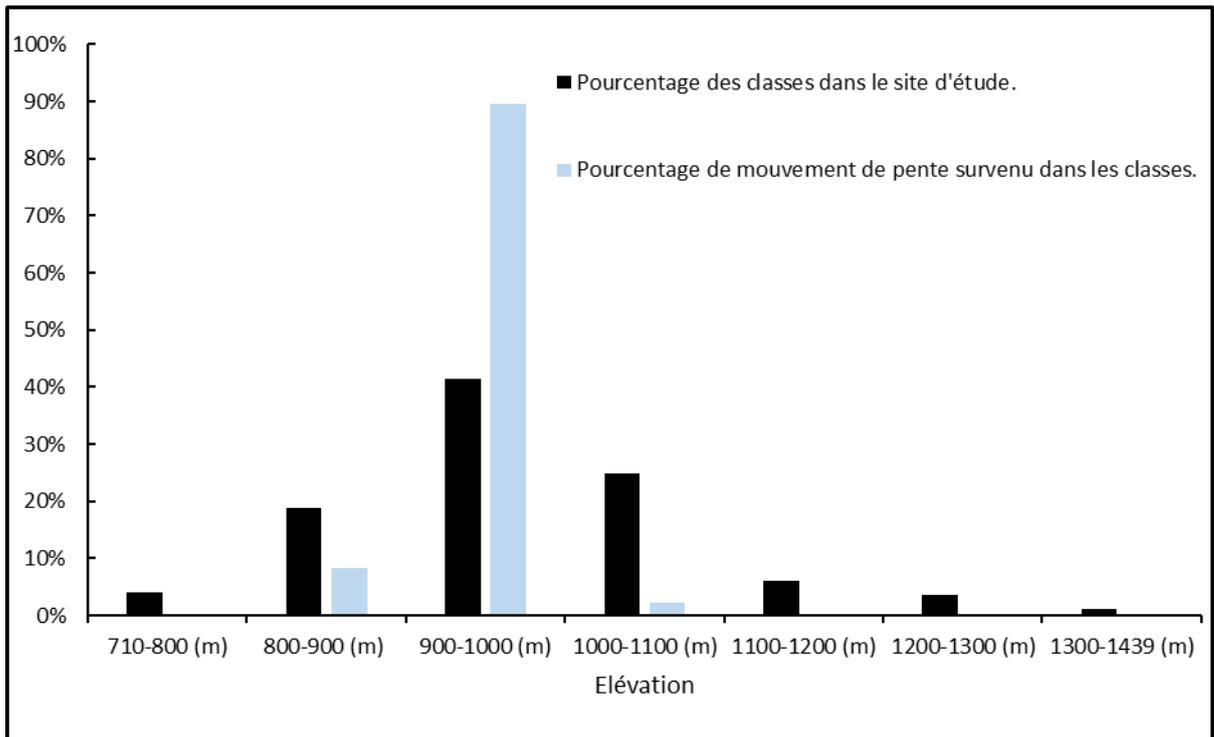
Nous avons classifié en six classes de pente ( $< 5^\circ$ ,  $5^\circ - 10^\circ$ ,  $10^\circ - 15^\circ$ ,  $15^\circ - 20^\circ$ ,  $20^\circ - 30^\circ$ ,  $> 30^\circ$ ) le dérivé de la classification proposés par [Pierre Gueremy \(1987\)](#) .

La cartes réalisées à l'aide de la commande "Analyse de surface" du module "Spatial Analyst" qui est implémenté dans ArcGis 10.



**Figure 37 :** Carte du gradient de pente de là de la zone d'étude.

L'analyse statistique des données extraites de la carte des pentes indique que les pentes compris entre  $[0-5^\circ]$ ,  $[5-10^\circ]$ ,  $[10-15^\circ]$  sont dominantes dans le site d'étude, avec des pourcentages de 26.61%, 39.23%, 20.73%. Cependant, la présence des mouvements de pente dans la classes  $[15-20^\circ]$  atteint un pourcentage important de 34.91% suivi par les classes  $[20-30^\circ]$  et  $[10-15^\circ]$ . Un nombre minime de mouvement de pente se produit dans les classes  $[0-5^\circ]$  et  $[5-10^\circ]$  et  $[>30^\circ]$ . La figure 38 montre le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes de pente.



**Figure 38** : Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

#### 4) Facteur d'humidité topographique

Le *Topographic Wetness Index* (TWI) (Beven et Kirkby, 1979) est un indice classique qui sert à quantifier l'effet de la topographie sur les processus hydrologiques (entre autres l'engorgement des sols). Il fait ressortir les zones relativement plates et naturellement humides de par leur position dans le bassin versant.

Autant que notre terrain présente des phénomènes hydrologiques et de grande fréquence nous avons incorporé cette indice par une carte qui présente des différents classes d'humidité.

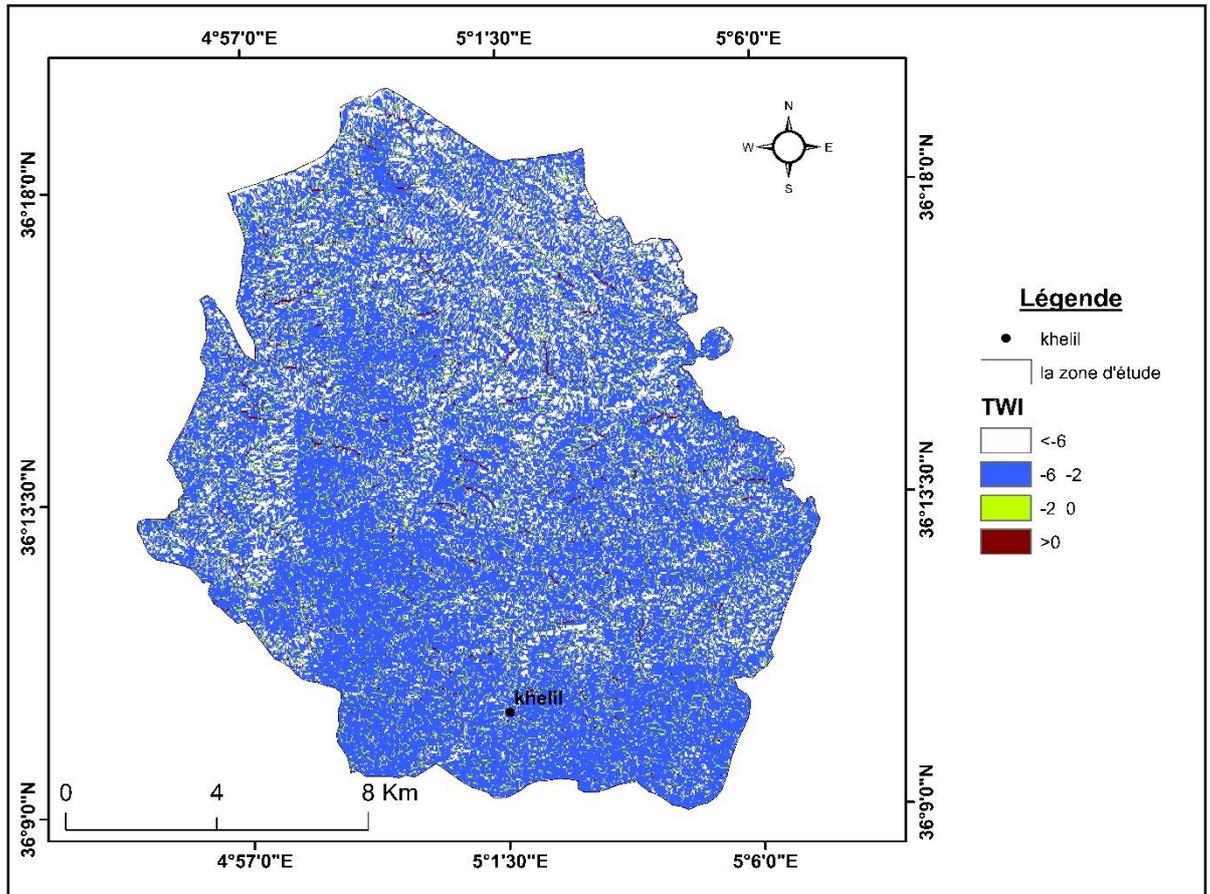


Figure 39 : facteur d'humidité topographique de la zone d'étude.

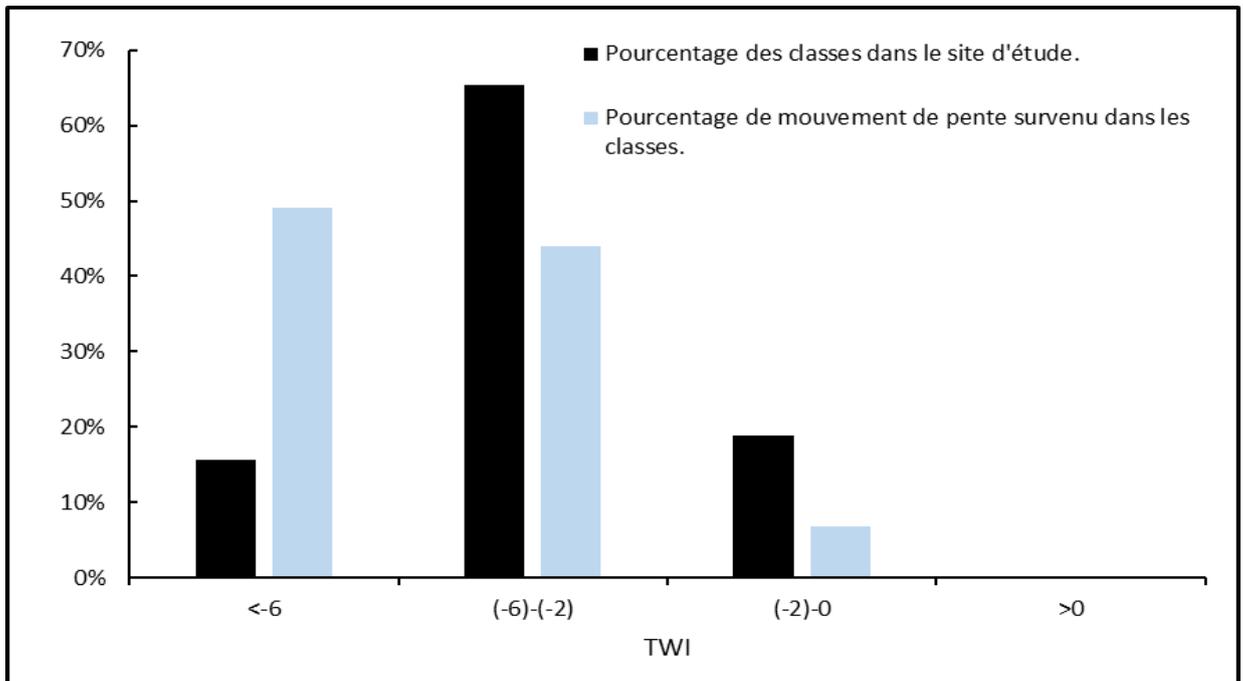


Figure 40 : Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de pente et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

## 5.2 Lithologie

La lithologie d'une région influe fortement sur la stabilité des pentes. Il existe une relation étroite entre ce facteur et l'occurrence de glissement de terrain. Une attention particulière doit être accordée à la lithologie d'une région parce que la plupart des ruptures de pente sont peu profondes, impliquant donc des dépôts près de la surface (Achour, 2017).

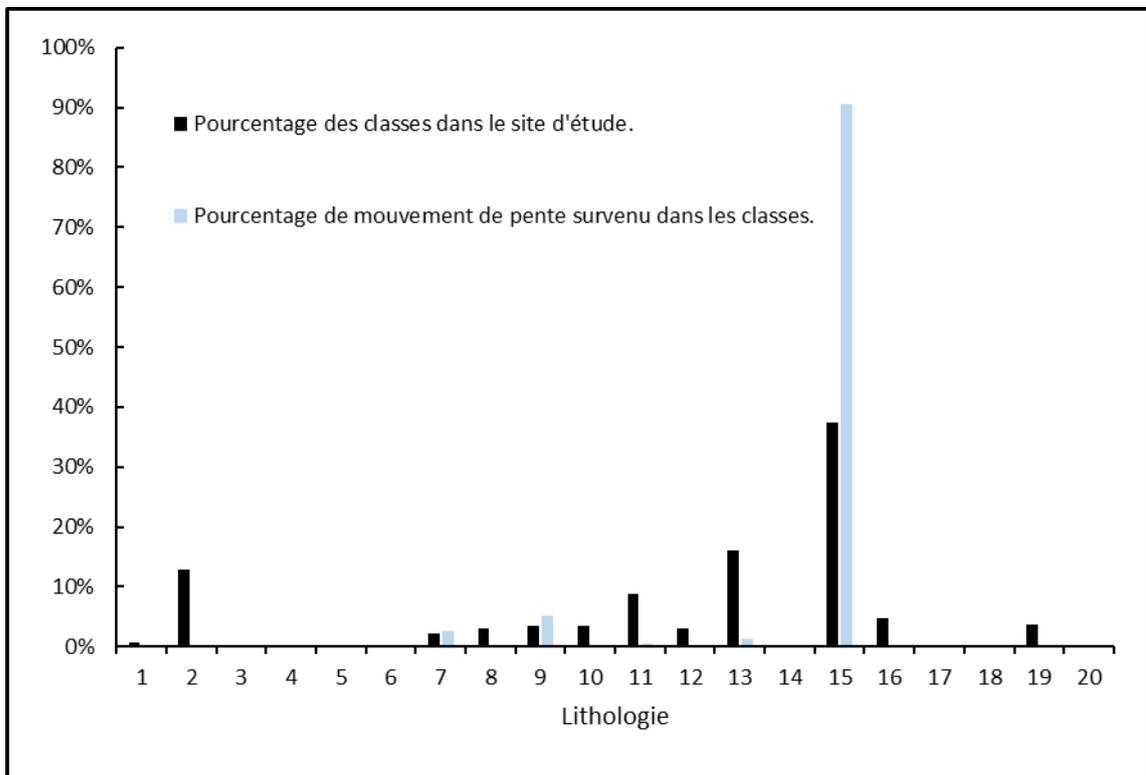
Elle est considérée comme un facteur causatif fondamentale dans cette étude.

**Tableau 10 :** Formations géologiques rencontrées dans la zone d'étude.

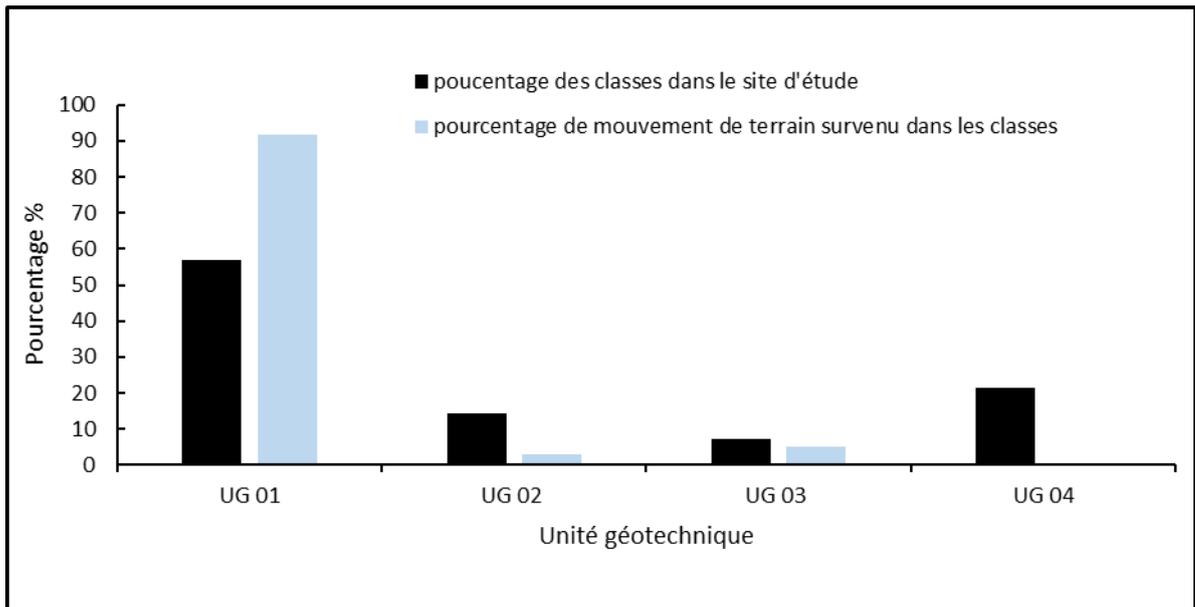
Unité géotechnique	Lithologie	Surfaces (Km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
UG 01	Argiles et conglomérats,calcaires lacustres	83,313	37,401
	Eboulis à gangue marneuse	0,036	0,016
	Marnes noires à boules et lentilles jaunes	0,334	0,15
	Terres arables,formation de pente,alluvions	35,765	16,056
	Alluvions	7,591	3,408
	La somme	127,039	57,031
UG 02	Marnes jaunes ou grises à bancs lenticulaires de micrites noires ou grises et à boules jaunes abondantes	19,689	8,839
	Marnes noires	6,77	3,039
	Marneux sombre à boules jaunes abondantes	4,708	2,113
	Marnes écailleuses grises ou noires à boules jaunes	0,086	0,0387
	Marnes et micrites (Rosalines et calciphères) avec repère à silex	0,269	0,121
	Alternances de marnes et de micrites à Rosalines	0,67	0,300
	La somme	32,192	14,452
UG 03	Facièces à Globigérines	0,104	0,047
	Marnes grises,ptits bancs de marno-calcaires gris	8,015	3,598
	Barre de marno-calcaires bien réglés à Inocérames et débris divers	6,772	3,04
	La somme	14,891	6,685
UG 04	Eboulis à blocs	0,088	0,039
	Calcaires massifs bitumineux blancs à cassure noire et silex noirs	10,566	4,743
	Alternances de marnes grises et de calcaires à débris d'Ostréides	7,711	3,462
	Dolomies,Calcaires	28,653	12,863

	Calcaires marneux noire et marnes grises	1,605	0,720
	Karst minéralisé	0,009	0,004
	La somme	48,63	21,831

L'analyse statistique de la figure 41 indique que la formation argiles et conglomérats, Terres arables et Dolomies Calcaires sont dominantes dans le site d'étude, avec des pourcentage de 37.4% , 16.06% et 12.863% .Cependant la présence des mouvement de pente dans la classes argiles et conglomérats, atteint un pourcentage important de 90.52% suivi par la classes alternances de marnes grises et de calcaires à débris d'Ostréides.



**Figure 41 :** Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de lithologie et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.



**Figure 42 :** Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes des unités géotechniques de la zone d'étude et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

**Tableau 11 :** légende géologique.

<u>Légende</u>	
1	Calcaires marneux noirs et marnes grises
2	Dolomies, Calcaires
3	karst minéralisé
4	alternances de marnes et de micrites à Rosalines
5	marnes et micrites (Rosalines et calciphères) avec repère à silex
6	marnes écailleuses grises ou noires à boules jaunes
7	marneux sombre à boules jaunes abondantes
8	marnes noires
9	alternances de marnes grises et de calcaires à débris d'Ostréides
10	Alluvions
11	marnes jaunes ou grises à bancs lenticulaires de micrites noires ou grises et à boules jaunes abondantes
12	barre de marno-calcaires bien réglés à Inocérames et débris divers
13	Terres arables, formation des pentes, alluvions

14	marnes noires à boules et lentilles jaunes
15	argiles et conglomérats,calcaires lacustres
16	calcaires massifs bitumineux blancs à cassure noire et silex noirs
17	Eboulis à blocs
18	Eboulis à gangue marneuse
19	marnes grises,ptits bancs de marno-calcaires gris
20	Facièces à Globigérines

---

### 5.3 Densité des failles

Les failles constituent un des paramètres cruciaux à prendre en considération pour toute étude de susceptibilité aux mouvements de pente. Ce paramètre est intégré la plupart du temps dans les études en tenant compte de la distance par rapport aux failles (Regmi et al., 2010 ; Pradhan, 2010 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Yilmaz, 2009a ; Yilmaz, 2009b; Greco et al., 2007 ; Van Den Eeckhaut et al., 2006 ; Yesilnacar et al., 2005 ; ...etc). Cela, se fait par l'établissement des zones tampons (buffering areas). Cependant, dans notre travail, le facteur « failles » sera incorporé en se basant sur la densité de la fracturation. ; la densité des failles est généralement proportionnelle au degré d'infiltration et de la circulation des eaux.

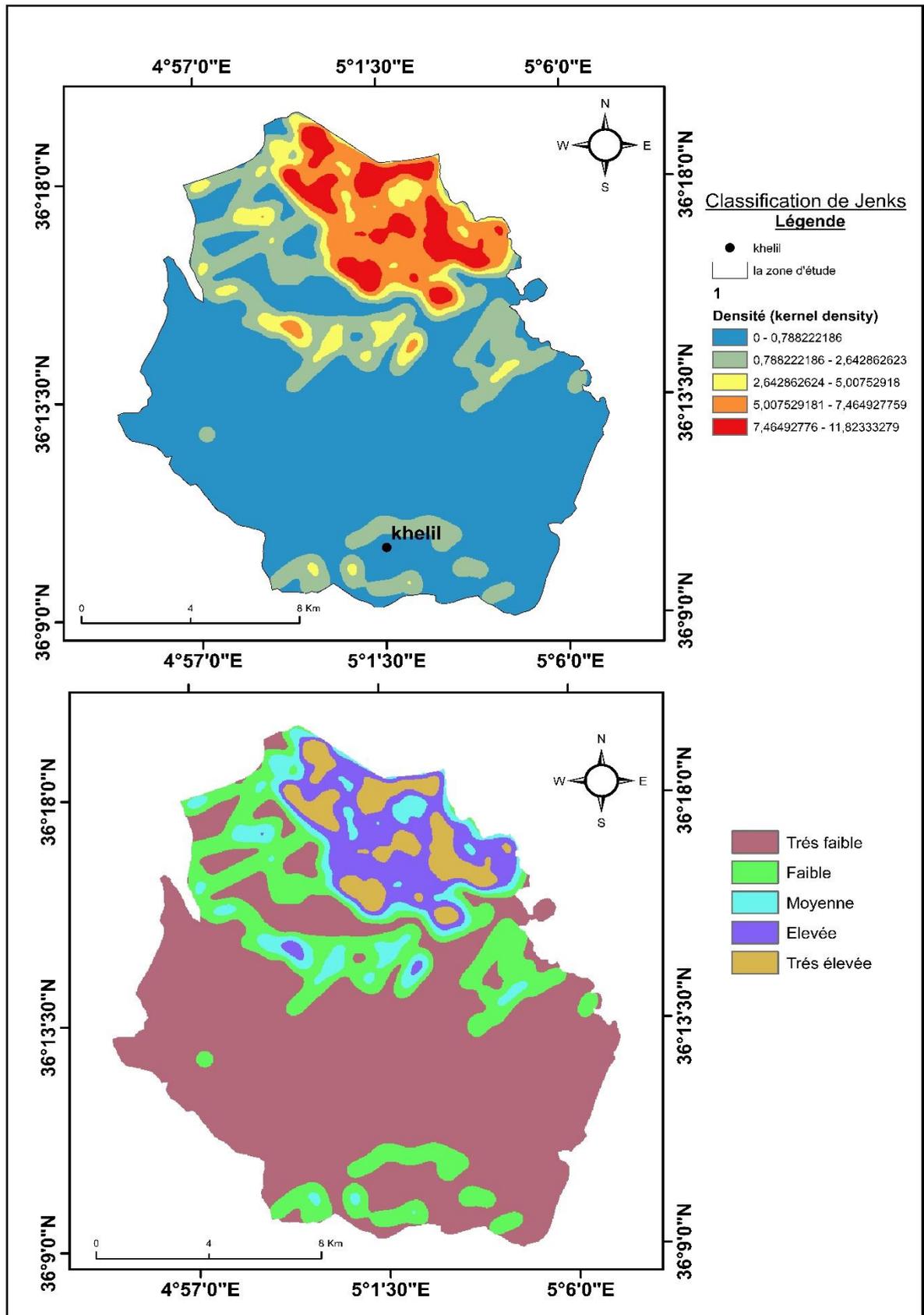
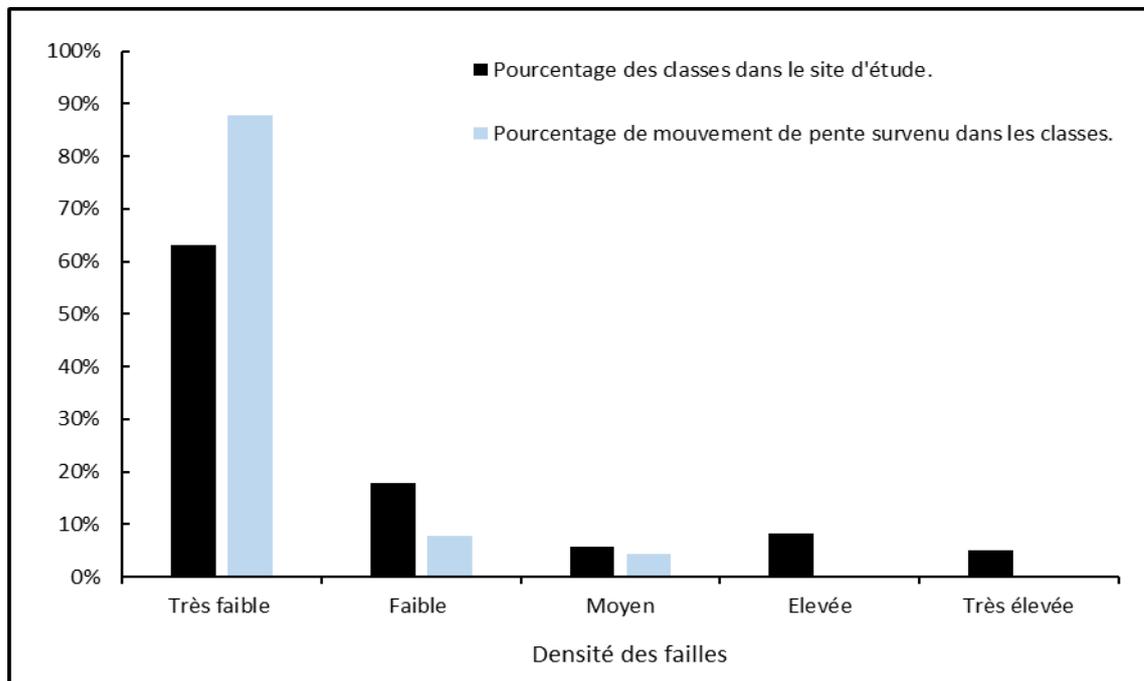


Figure 43 : Cartes de densité de la fracturation de la zone d'étude.

L'histogramme ci-dessus montre qu'il y a un changement inversé entre l'augmentation des densités des failles et l'augmentation des mouvements de pente.



**Figure 44** : Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de densité des failles et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

#### 5.4 Densité de réseaux hydrographique

D'après la littérature (Bai et al, 2010 ; Pradhan, 2010 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Yilmaz, 2009 ; Regmi et al., 2010 ; Nefeslioglu et al., 2008 ; Thiery et al., 2007 ; Yesilnacar et Topal, 2005...etc) ; pour la modélisation de la susceptibilité et/ou de l'aléa mouvements de terrain ; le réseau hydrographique est intégré en tenant compte de la distance par rapport aux principaux cours d'eau par la définition des zones tampons comme nous l'avons expliqué pour le cas des failles. Cependant, dans tout type de modélisation portant sur la probabilité d'occurrence spatiale et/ou temporelle des mouvements de terrain, de très nombreux auteurs (Pavel et al., 2011 ; Liu et al., 2011 ; Atkinson et Massari, 2011 ; Van Den Eeckhaut et al., 2011 ; Sterlacchini et al., 2011 ; Lara et Sepúlveda, 2010 ; Van Den Eeckhaut et al., 2010 ; Lee et al., 2010 ; Dong et al., 2010 ; Bai et al., 2010 ; Nandi et Shakoor., 2009 ; Rodriguez et al., 2008 ; Song et al., 2008 ; Yao et al., 2008 ; Greco et al., 2007 ; Guzzetti et al., 2007 ; Chang et al., 2007 ; Ayalew et al., 2005...etc) n'intègrent pas le réseau hydrographique sous ses différentes formes, ou paramètres se rattachant à ce dernier.

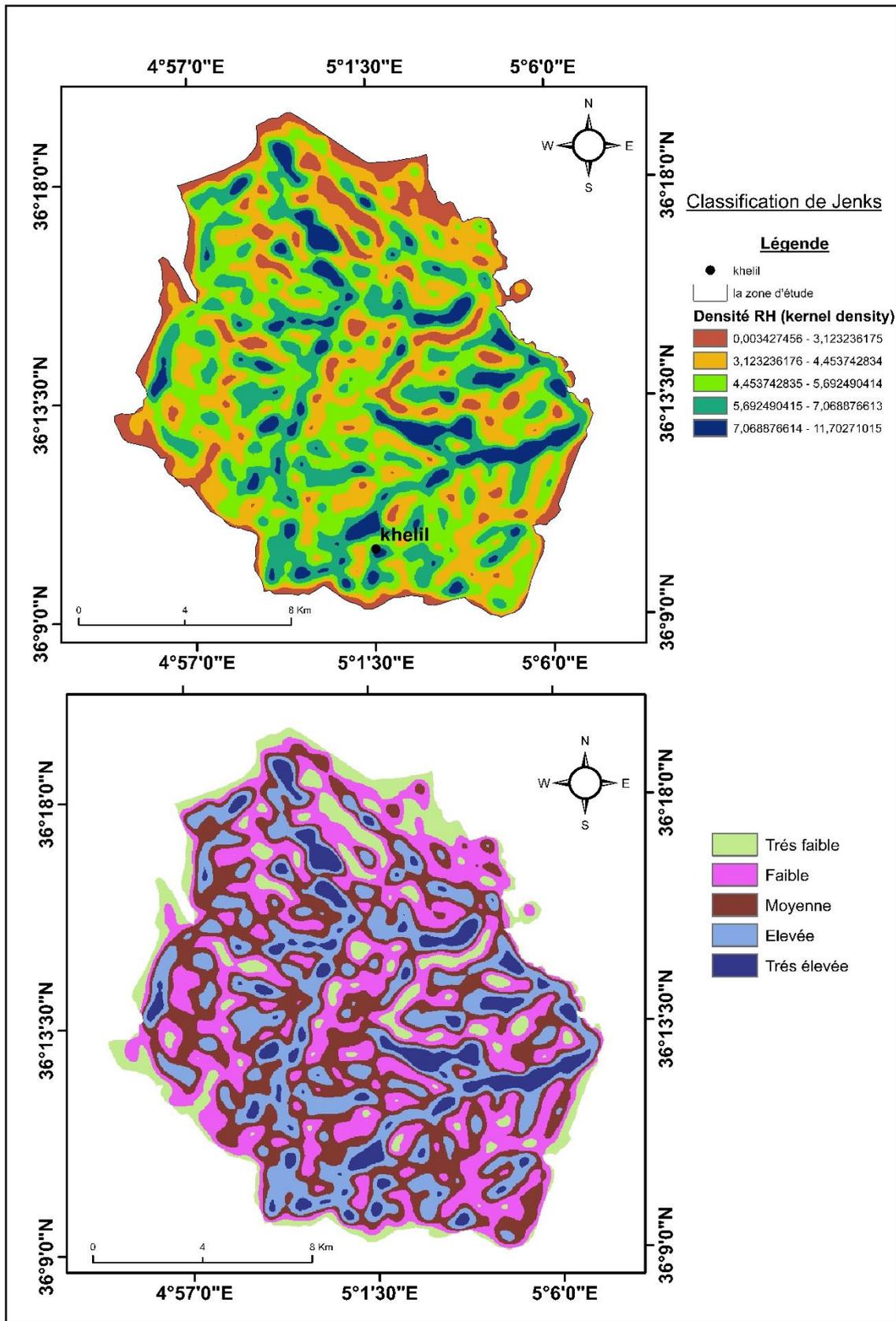
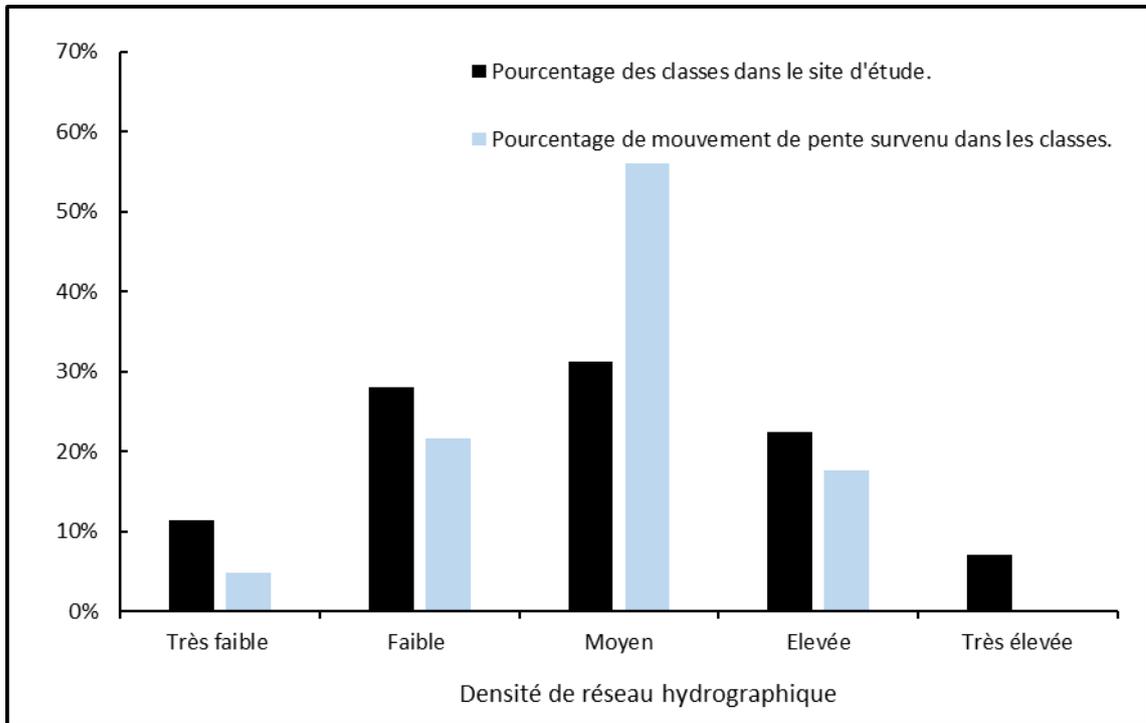


Figure 45 : Densité de réseaux hydrographique de la zone d'étude

La figure 46 montre qu'il y a une corrélation entre l'augmentation de densité de réseaux hydrographiques jusqu'à un niveau élevé et l'augmentation des mouvements de pente.



**Figure 46 :** Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de densité de réseaux hydrographiques et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

## 5.5 Végétation

Dans les régions dominées par des mouvements de pente le paramètre végétation joue un rôle important. Celle-ci, peut, en **favorisant un ruissellement de subsurface** (matte racinaire), et un enracinement profond, limiter le développement des mouvements de pente sur les versants à matériel dont les caractéristiques géotechniques sont médiocres (argileux, argilo-marneux...). Lors de son absence, ou sa rareté sur les versants, l'effet érosif par ruissellement peut être accéléré, ce qui peut constituer un facteur catalysant dans ce cas. La relation entre les mouvements de pente et le paramètre végétation s'avère être complexe. Par conséquent, nous évaluerons dans cette section le rôle de **la végétation** dans la stabilité des versants à travers une cartographie d'une NDVI

(*Normalized Difference Vegetation Index*) de la zone de khelil à partir des données Landsat 8 (bande rouge /bande proche infrarouge).

- **L'Indice NDVI**

Est un indice normalisé permettant de générer une image affichant la couverture végétale (biomasse relative). Cet indice repose sur le contraste des caractéristiques de deux canaux d'un jeu de données raster multispectral : l'absorption du pigment chlorophyllien dans le canal rouge et la haute réflectivité des matières végétales dans le canal proche infrarouge (NIR).

ArcGIS utilise l'équation suivante pour générer les données en sortie :

$$NDVI = ((IR - R)/(IR + R)) * 100 + 100$$

Cet indice génère des valeurs comprises entre -1.0 et 1.0, représentant principalement la couverture végétale, où les valeurs négatives sont essentiellement générées par les nuages, l'eau et la neige et les valeurs proches de zéro essentiellement générées par la roche et le sol nu. Les très faibles valeurs de l'indice NDVI (0,1 et inférieures) correspondent aux surfaces stériles de roche, de sable ou de neige. Les valeurs intermédiaires (0,2 à 0,3) représentent des zones d'arbustes et de prairies, alors que les valeurs élevées (0,6 à 0,8) indiquent des forêts tempérées ou tropicales humides (*Environmental Systems Research Institute*).

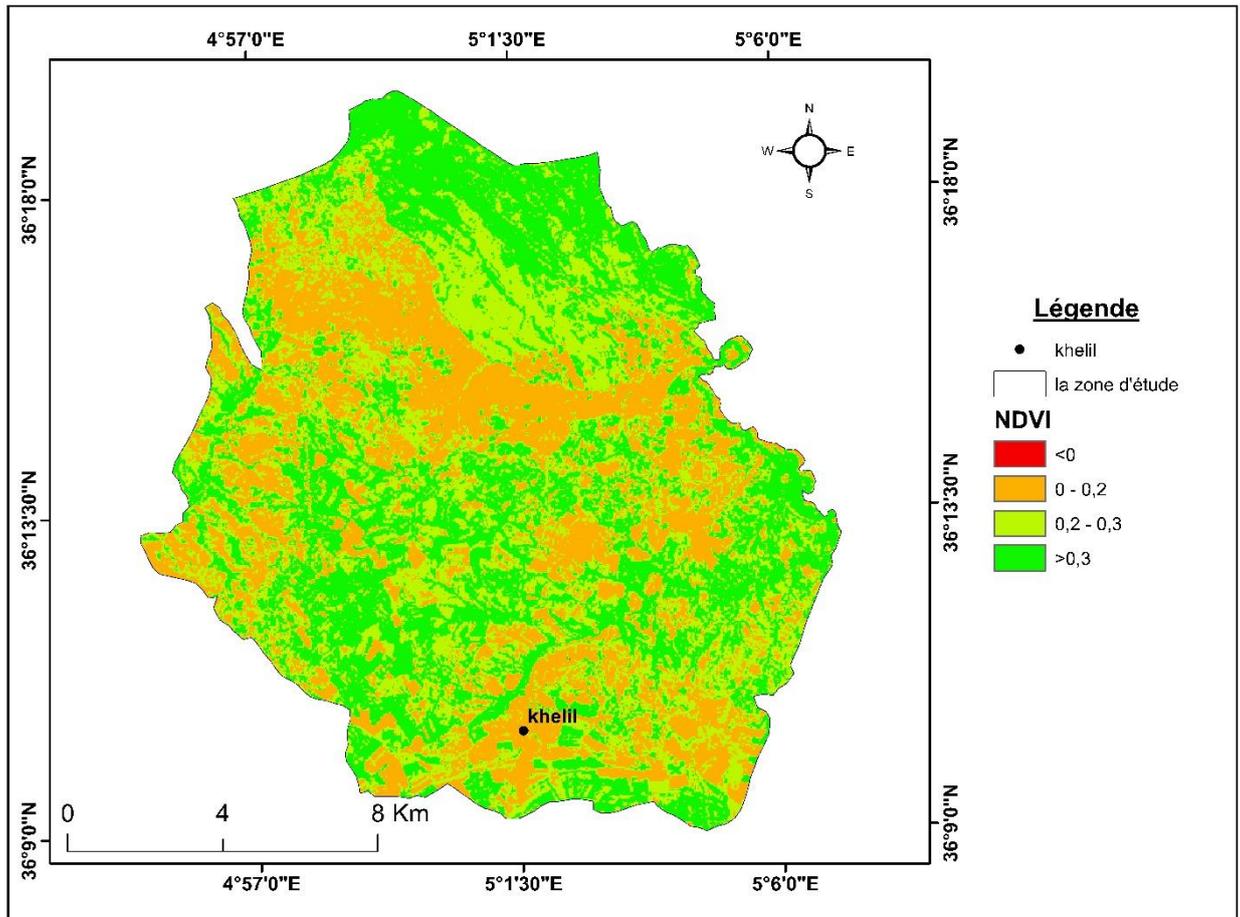


Figure 47 : Indice NDVI de la zone d'étude.

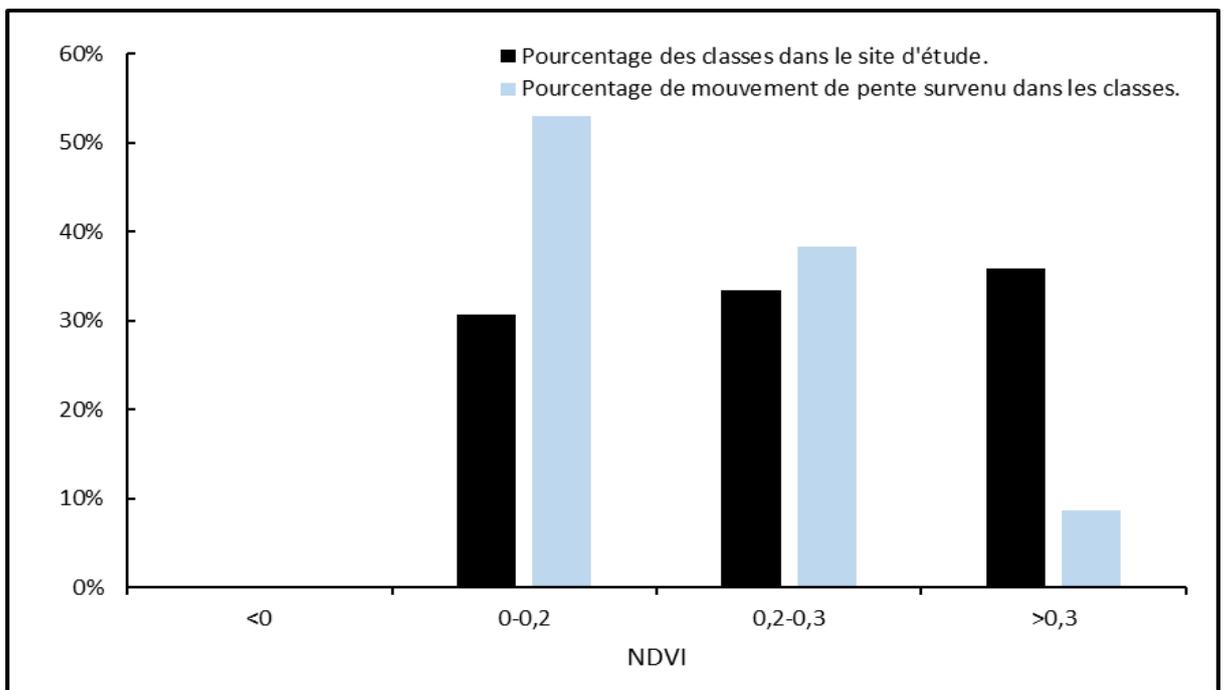


Figure 48 : Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de l'indice NDVI et le pourcentage de mouvement de pente survenus dans ces classes.

## 5.6 Occupation de sols

Pour réaliser la carte d'occupation des sols, nous avons eu recours à la conception d'une base de données multisources . Celle-ci se compose de plusieurs couches, à savoir :

- Les terrains agricoles, roche et sols, ont été reconnus par classification multispectrale supervisée par des données Landsat 8.
- Les zones urbaines, et le réseau routier ont été digitalisés à partir de la couverture topographique imagerie ESRI.

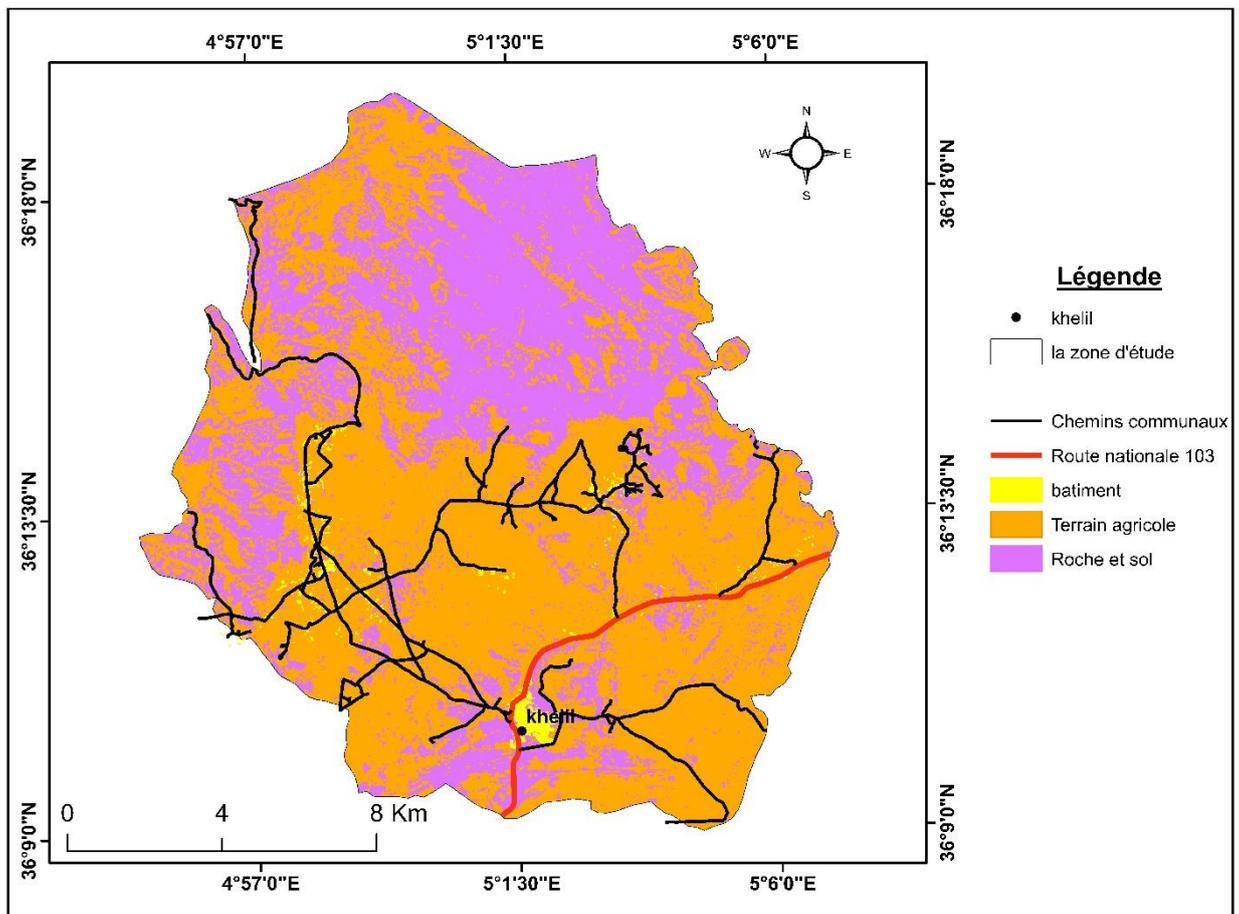


Figure 49 : Carte d'occupation des sols de la zone d'étude.

## 6. Conclusion

Ces données spatiales ont été obtenues, traitées et cartographiées à l'aide d'ArcGIS pour obtenir les cartes des dix paramètres de prédisposition. Dans l'ensemble, la carte d'inventaire (cf chapitre 03) des mouvements de pente constitue l'information de base

pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvement des pentes dans cette étude. Les facteurs de prédisposition utilisés dans cette étude se distinguent selon quatre catégories principales :

- o Données topographiques ;
- o Données géologiques ;
- o Données sur l'occupation du sol ;
- o Données hydrologiques .

Ces différents jeux de données ont été constitués en fonction de l'échelle de travail visée pour la cartographie de la susceptibilité dans le secteur d'étude. Par ailleurs, dix couches de données ont été construites pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvement des pentes.

## **Chapitre 05 : Méthodologies d'évaluation et de cartographie de la susceptibilité aux mouvement de pente**

---

### **Résumé du chapitre**

Ce chapitre a été focalisé sur l'analyse de la susceptibilité aux mouvements de pente à une échelle moyenne dans le commun de khelil par deux approches : l'approche quantitative bi-variée basée sur le théorème de Bayes (rapport de fréquence ou frequency ratio) et l'approche semi-quantitative fondée sur la hiérarchisation (AHP – Analytic Hierarchy Process). Les résultats obtenus par les deux approches sont ensuite comparés entre eux, ce qui nous permis de constaté que les deux approches sont performant pour prédire la susceptibilité aux mouvements de pente à échelle moyenne dans la zone d'étude.

## 1. Introduction

A l'instar des différents aléas, la gestion des mouvements de terrain est une étape indispensable qui doit précéder tout projet d'aménagement s'inscrivant dans le cadre d'un développement durable. Une de ces étapes, est l'évaluation de la susceptibilité. Elle présente une composante indispensable et inévitable dans le processus de gestion interactive centré sur la prévention du risque mouvements de terrain, via la création de cartes de susceptibilité. Ces cartes permettront d'évaluer le risque par l'intégration de la vulnérabilité et ses différentes dimensions.

Pour cela on a utilisé deux méthode pour notre cas pour évaluation de susceptibilité soit : une approche semi-quantitative sur la base de règles d'analyse Hiérarchique et une approche probabiliste représentée par une méthode bi-variée dite : rapport de fréquence. Le choix d'une méthode d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrains est lié à l'échelle de la zone étudiée : soit l'échelle moyenne d'un site instable ou d'un versant, utilisée pour définir le fonctionnement d'un phénomène et simuler des scénarios d'évolution ; soit l'échelle large du bassin versant pour évaluer et cartographier la susceptibilité selon des critères morphologiques avec la production d'une cartographie prévisionnelle et préventive (Maquaire, 2002).

Cependant, quel que soit l'échelle de la zone d'étude, la qualité des résultats dépend avant tout de la **qualité des données d'entrée**. L'objectif de ce dernier chapitre est d'élaborer deux cartes de susceptibilité aux glissements de terrain pour la zone d'étude.

## 2. Application de la méthode rapport de fréquence ( Frequency Ratio )

Le rapport de fréquence (FR) est une méthode statistique bivariée qui est simple à mettre en œuvre avec des résultats précis. FR est largement utilisé dans la cartographie de la susceptibilité aux mouvement de pente (Choiet al. 2012 ; Ehret et al. 2010 ; Lee 2014 ; Lee et Pradhan 2006 ; Mezughi et al. 2011 ; Mohammady et al. 2012 ; Torizin 2011 ; Yalcin et al. 2011 ; Yilmaz 2009), et il est très compatible avec la technologie SIG (Lee 2014 ; Yilmaz et Keskin 2009 ; Yalcin et al. 2011).

La susceptibilité aux mouvement de pente par FR a été créée à l'aide de la fonction de superposition dans le SIG, qui est utilisée pour fusionner les différents facteurs attribués au ratio. Si la probabilité est élevée (la valeur  $> 1$ ), il y a une plus grande susceptibilité

aux mouvement de pente. Une valeur plus faible indique un susceptibilité plus faible de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région (la valeur<1).

La formule est la suivante (Ehret et al. 2010) :

$$F_{ri} = (M_i / M) / (N_i / N)$$

Où  $M_i$  est le nombre de pixels présentant des mouvements de pente pour chaque facteur conditionnel de sous-classe,  $M$  est le nombre total des mouvements de pente dans la zone d'étude,  $N_i$  est le nombre de pixels dans la zone de sous-classe de chaque facteur et  $N$  est le nombre total de pixels dans la zone d'étude (Ehret et al. 2010).

### a) Résultats et discussions

Pour effectuer la modélisation par cette méthode, chaque thème a été croisé avec la carte d'inventaire des mouvements de pente dans un environnement SIG par la commande 'Tabulate Area' implémenté dans (ArcGIS). Puis les rapports de fréquence dans chaque classe ont été calculées. Les poids de chaque classe de chaque facteur sont présentés dans le tableau 12.

**Tableau 12** : les poids des différents facteurs de prédisposition par la méthode (FR)

Couches	Classe	Classe pixel	MP pixel	FR	poids
Lithologie	UG 01	141170	213	1,61	1,699199
	UG 02	35778	7	0,21	
	UG 03	17582	12	0,728	
	UG 04	52967	0	0	
Aspect	Flat (-1)	2	0	0	1,145161
	North (0-22,5 and 337,5-360)	14960	69	4,920	
	North-east (22,5-67,5)	33924	28	0,881	
	East (67,5-112,5)	32837	12	0,390	
	South-east (112,5-157,5)	37777	8	0,226	
	South (157,5-202,5)	46767	4	0,091	
	South-west (202,5-247,5)	36306	12	0,353	
	West (247,5-292,5)	22431	23	1,094	
	North-west (292,5-337,5)	22494	76	3,604	
Elévation	710-800 (m)	9790	0	0	0,433
	800-900 (m)	46758	19	0,433	

CHAPITRE V : METHODOLOGIES D'EVALUATION ET DE CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX  
MOUVEMENT DES PENTES.

	900-1000 (m)	102753	208	2,159	
	1000-1100 (m)	61568	5	0,087	
	1100-1200 (m)	15208	0	0	
	1200-1300 (m)	8847	0	0	
	1300-1439 (m)	2573	0	0	
					2,166667
Gradient de pente	<5	66103	1	0,016	
	5-10	97096	7	0,077	
	10-15	51314	58	1,206	
	15-20	21392	81	4,039	
	20-30	10490	71	7,220	
	>30	1103	14	13,541	
					1,393548
TWI	<-6	38589	114	3,152	
	(-6)-(-2)	161899	102	0,672	
	(-2)-0	46638	16	0,366	
	>0	371	0	0,000	
					2,021505
NDVI	<0	4	0	0	
	0-0,2	75818	123	1,731	
	0,2-0,3	82806	89	1,147	
	>0,3	88871	20	0,240	
					1,491935
POS	Terrain agricole	153260	99	0,689	
	Roche et sol	94213	133	1,506	
					1
Densité des failles	Très faible	156477	204	1,391	
	Faible	44454	18	0,432	
	Moyen	13961	10	0,764	
	Elevée	20373	0	0,000	
	Très élevée	12232	0	0,000	
					1,446237
Densité RH	Très faible	28171	11	0,417	
	Faible	69556	50	0,767	
	Moyen	77122	130	1,798	
	Elevée	55373	41	0,790	
	Très élevée	17275	0	0,000	
					1,282258
Précipitation	650-655	15754	0	0,000	
	655-660	231746	232	1,067	
					2,688172

D'après le tableau 12, les rapports de fréquence obtenues augmentent progressivement avec l'augmentation de la pente. À partir de ces observations, il est clair que la probabilité d'occurrence de mouvement de pente est élevée dans les zones où l'angle de pente est élevé.

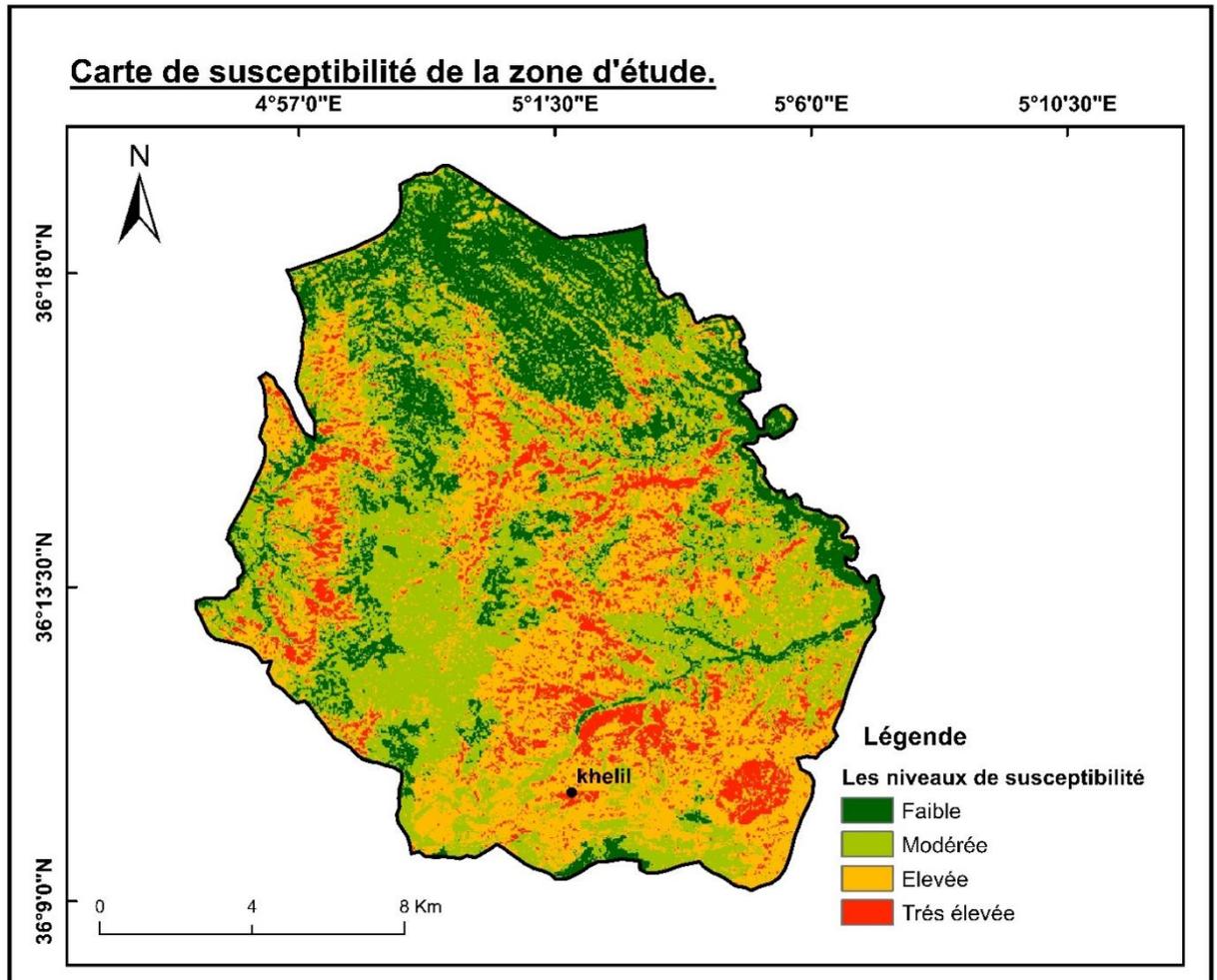
Dans le cas de l'exposition des versants, la plupart des mouvements de pente se produisent dans les versants orientés vers le Nord (FR=4,920), Nord-Ouest (FR=3,604) et Ouest (FR = 1,094). Les pentes orientées vers l'Est sont moins sensibles aux mouvements de terrain car elles ont la plus basse valeur.

Concernant la lithologie, les formations les plus susceptibles aux mouvement de pente sont : les formations de UG 01 avec une FR de 1.61.

Enfin, tous les poids de chaque classe calculée avec cette méthode ont été analysés en additionnant l'information de la couche retenue pour produire la carte finale de susceptibilité aux glissements de terrain par l'équation suivante :

$$\text{LSI}_{\text{FR}} = 1,2359 \times \text{Lithologie} + 1,137097 \times \text{Aspect} + 2,166667 \times \text{Elévation} + 1,393548 \times \text{Gradient de pente} + 2,021505 \times \text{TWI} + 1,491935 \times \text{NDVI} + 1 \times \text{POS} + 1,094086 \times \text{Densité des failles} + 1,099462 \times \text{Densité RH} + \text{précipitation}$$

La carte de susceptibilité produite à partir de la méthode du rapport de fréquence (Figure 50) a été subdivisée en quatre classes (très élevée, élevée, modérée et faible) en utilisant la méthode de Jenks (Pourghasemi et al., 2012) implémenté dans (ArcGIS 'Natural Breaks').



**Figure 50 :** Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par FR.

### b) Evaluation de la robustesse du modèle

Le modèle qui a servi à l'élaboration de la carte de susceptibilité a été validé grâce à la courbe de réussite qui juge la robustesse de ce modèle (Figure 51).

La valeur « AUC » inscrite sur la figure 51 est une valeur sans unité qui donne une idée sur la robustesse du modèle ; plus sa valeur est importante, plus le modèle est robuste. Sa valeur de 83,64%, pouvant être considérée comme un résultat acceptable suivant la classification proposée par Metz (1978).

L'intersection de la couche raster de 30% des mouvements de pente avec la couche de susceptibilité (100 classes de susceptibilité) elle nous donne des surfaces calculées à l'aide de logiciel ArcGis par la commande (Tabulate Area), à partir de ces résultats on

calcule le AUC pour chaque classe de susceptibilité par la formule suivante ( $AUC = \sum \frac{Cumule MP_N\% + Cumule MP_{N+1}\%}{(N+1) - N}$ ).

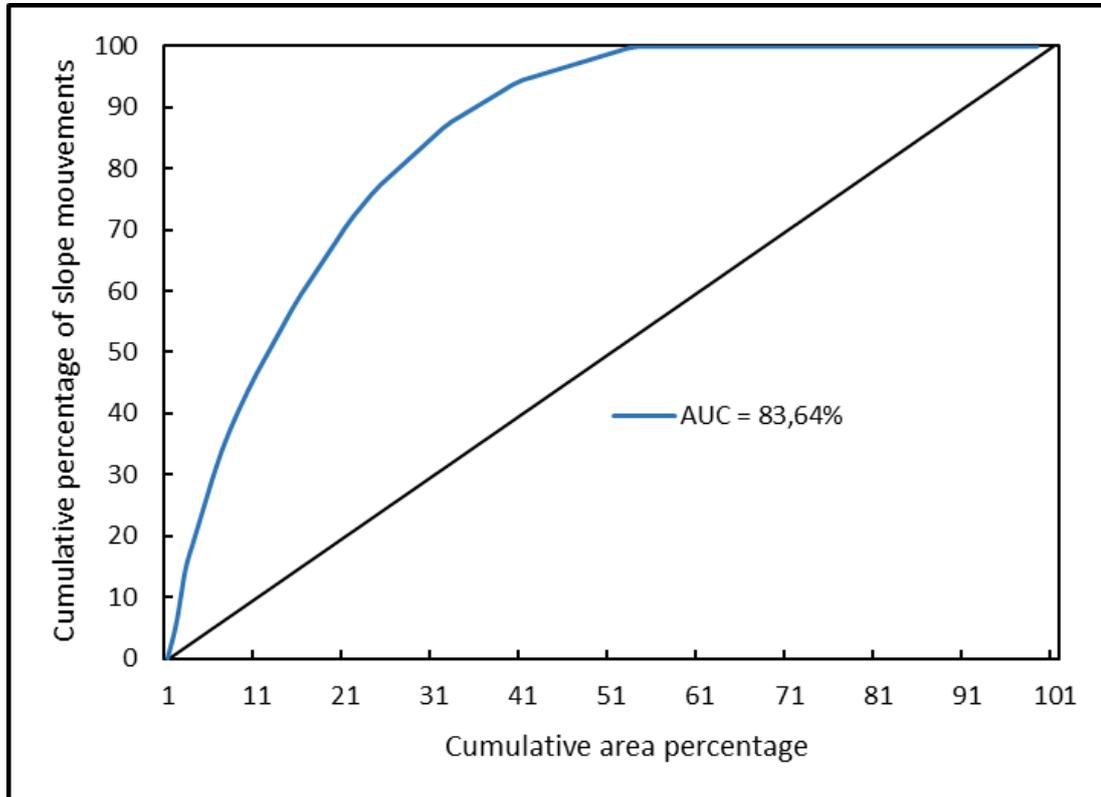


Figure 51 : Taux de réussite du modèle construit par FR.

### 3. Application de la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (Analytic Hierarchy Process, AHP)

Afin d'élaborer la carte de probabilité de glissements, nous avons suivi la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP – Analytic Hierarchy Process). Cette méthode, créée par Saaty (1991), est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération. Elle a déjà été utilisée avec succès par exemple dans l'application à l'étude de 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 (Tableau 13), 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 Tableau 14. 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.

**Tableau 13 :** Matrice de comparaison et calcul de son vecteur propre.

Critères	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	..	C <sub>n</sub>	W <sub>i</sub>
C <sub>1</sub>	$\frac{1}{\sum C_1}$	$\frac{W_{21}}{\sum C_2}$	$\frac{W_{31}}{\sum C_3}$	..	$\frac{W_{n1}}{\sum C_n}$	$\frac{C_1}{\sum n}$
C <sub>2</sub>	$\frac{W_{12}}{\sum C_1}$	$\frac{1}{\sum C_2}$	$\frac{W_{32}}{\sum C_3}$	..	$\frac{W_{n2}}{\sum C_n}$	$\frac{C_2}{\sum n}$
C <sub>3</sub>	$\frac{W_{13}}{\sum C_1}$	$\frac{W_{23}}{\sum C_2}$	$\frac{1}{\sum C_3}$	..	$\frac{W_{n3}}{\sum C_n}$	$\frac{C_3}{\sum n}$
..	..	..	..	..	..	..
C <sub>n</sub>	$\frac{W_{1n}}{\sum C_1}$	$\frac{W_{2n}}{\sum C_2}$	$\frac{W_{3n}}{\sum C_3}$	..	$\frac{1}{\sum C_n}$	$\frac{C_n}{\sum n}$
	$\sum C_1$	$\sum C_2$	$\sum C_3$	..	$\sum C_n$	

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  $W_{ij}=\alpha$ , alors  $W_{ji}=\frac{1}{\alpha}$ ,  $\alpha \neq 0$
2. Si  $C_i$  est considéré comme étant d'une importance relative égale à celle de  $C_j$ , alors  $W_{ij}=1, W_{ji}=1$  et  $W_{ii}=1$ , pour tout  $i$ .

Le vecteur propre de la matrice peut être trouvé par la formule suivantes :

$$W_{ji}=(\prod_{j=1}^n W_{ij})^{1/n}$$

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.

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

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 :

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

où w est calculé par l'addition des colonnes de la matrice de comparaisons. On calcule, alors, l'indice de cohérence (IC) :

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

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

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

RC est le ratio entre IC et un indice de cohérence aléatoire (CA). L'indice CA, présenté dans le Tableau 15, 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.

**Tableau 14 :** Echelle proposée par [Saaty \(1991\)](#).

Degrés d'importance de chaque caractéristique	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristique 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 fort 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.

**Tableau 15 :** 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

**a) Résultats et discussions**

**Tableau 16 :** Matrice de comparaison par paire des différents facteurs utilisés.

<i>Facteurs de prédisposition.</i>	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	Poids
[1]lithologie	1										0,050641
[2]Aspect	1	1									0,050641
[3]Elévation	2	2	1								0,092526
[4]Pente	5	5	4	1							0,317393
[5]TWI	3	3	2	1/2	1						0,141516
[6]NDVI	2	2	1	1/4	1/2	1					0,096246
[7]Pos	1/3	1/3	1/7	1/9	1/8	1/7	1				0,01815
[8]Densité des failles	1/2	1/2	1/5	1/8	1/7	1/6	2	1			0,02669
[9]Densité Réseaux hydrographique	3	3	4	1/2	1	2	9	7	1		0,151126
[10]Précipitation	1	1	1/3	1/7	1/5	1/3	5	3	1/5	1	0,055071
$\lambda_{\max} = 103,1437$ $CI=0,035$ Ratio de Cohérence = 2.3% < 10%											

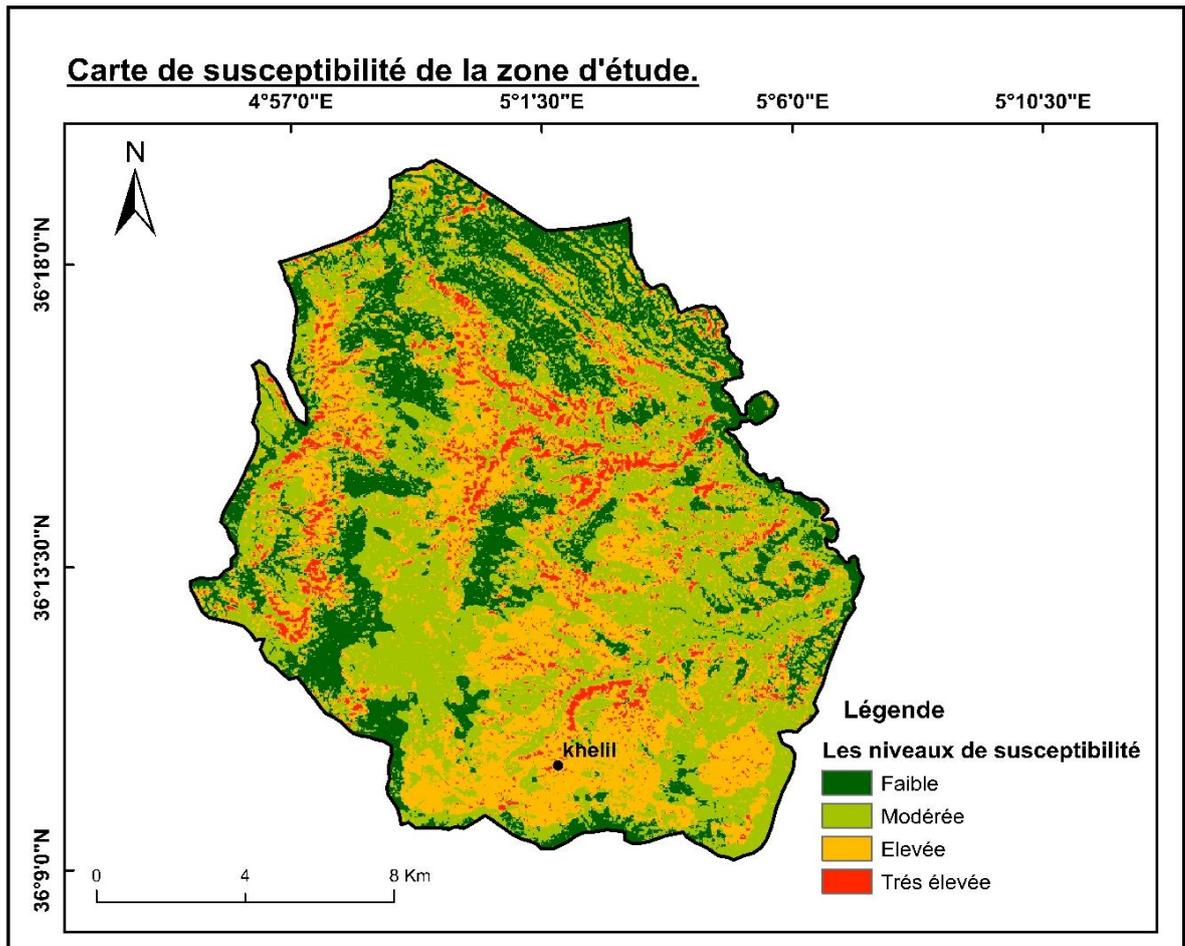
Le tableau 16 donne les poids relatifs pour chaque facteur de prédisposition. Ces poids ont été obtenus à partir de la matrice de comparaison par paire. Les valeurs obtenues indiquent que la pente est le paramètre le plus important avec une valeur de 0,317, suivi par la densité du réseaux hydrographique 0,151126, NDVI avec, 0,141516, respectivement. Alors que les autres facteurs sont moins importants.

Dans cette étude, le ratio de cohérence (CR) est de  $0.023 < 0.1$  ; cette valeur indique un degré de cohérence approprié, adéquat pour accorder le poids de chaque facteur.

L'intégration des différents facteurs dans une seule carte d'index de susceptibilité aux glissements de terrain est donnée par une procédure basée sur la somme linéaire pondérée équation suivantes :

$$LSI_{AHP} = 0,050641 \times \text{Lithologie} + 0,050641 \times \text{Aspect} + 0,092526 \times \text{Elévation} + 0,317393 \times \text{Gradient de pente} + 0,141516 \times \text{TWI} + 0,096246 \times \text{NDVI} + 0,01815 \times \text{POS} + 0,02669 \times \text{Densité des failles} + 0,151126 \times \text{Densité RH} + 0,055071 \times \text{précipitation}$$

La carte de susceptibilité aux mouvements de pente générée par la méthode AHP est montrée dans la figure 52 Elle a été reclassée en quatre zones de susceptibilité : faible, modérée, élevée et très élevée selon la méthode de classification de Jenks (Pourghasemi et al., 2012).



**Figure 52 :** Carte de susceptibilité de la zone d'étude obtenue par AHP

### b) Evaluation de la robustesse du modèle

La valeur « AUC » inscrite sur la figure 53 est une valeur sans unité qui donne une idée sur la robustesse du modèle ; plus sa valeur est importante, plus le modèle est robuste. Son pourcentage de 83.05%, pouvant être considérée comme un résultat acceptable suivant la classification proposée par Metz (1978).

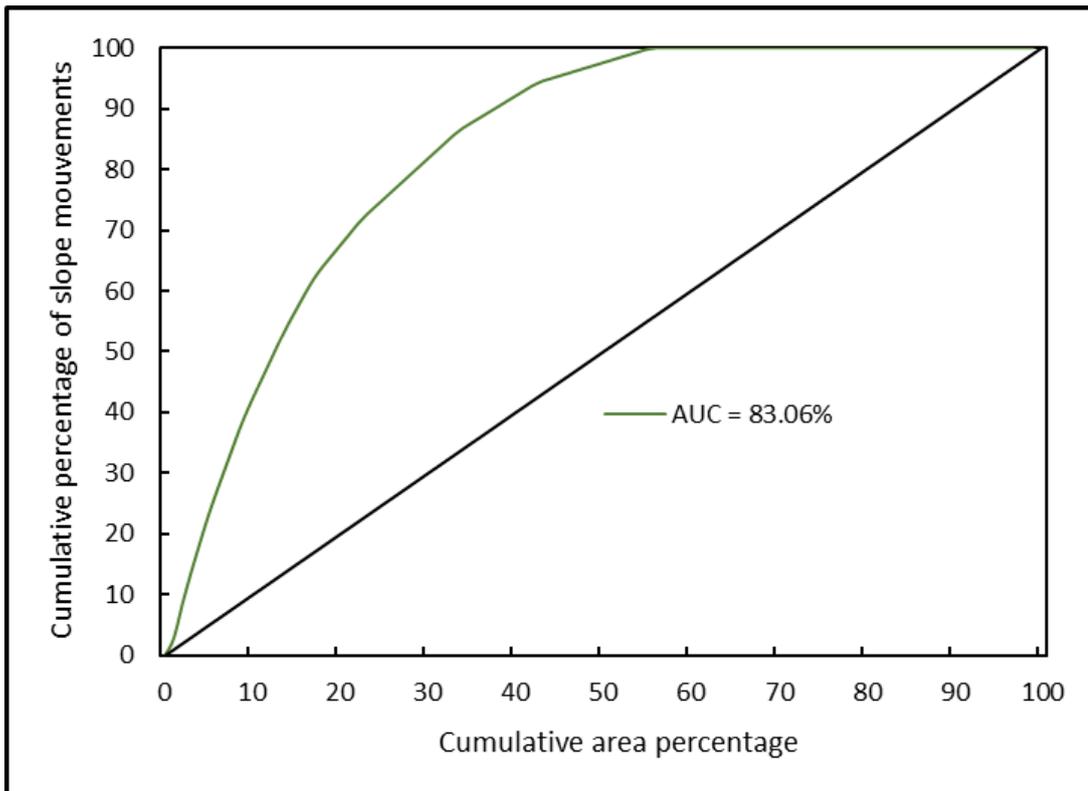


Figure 53 : Taux de réussite du modèle construit par AHP.

#### 4. Comparaison entre les deux approches cartographiques

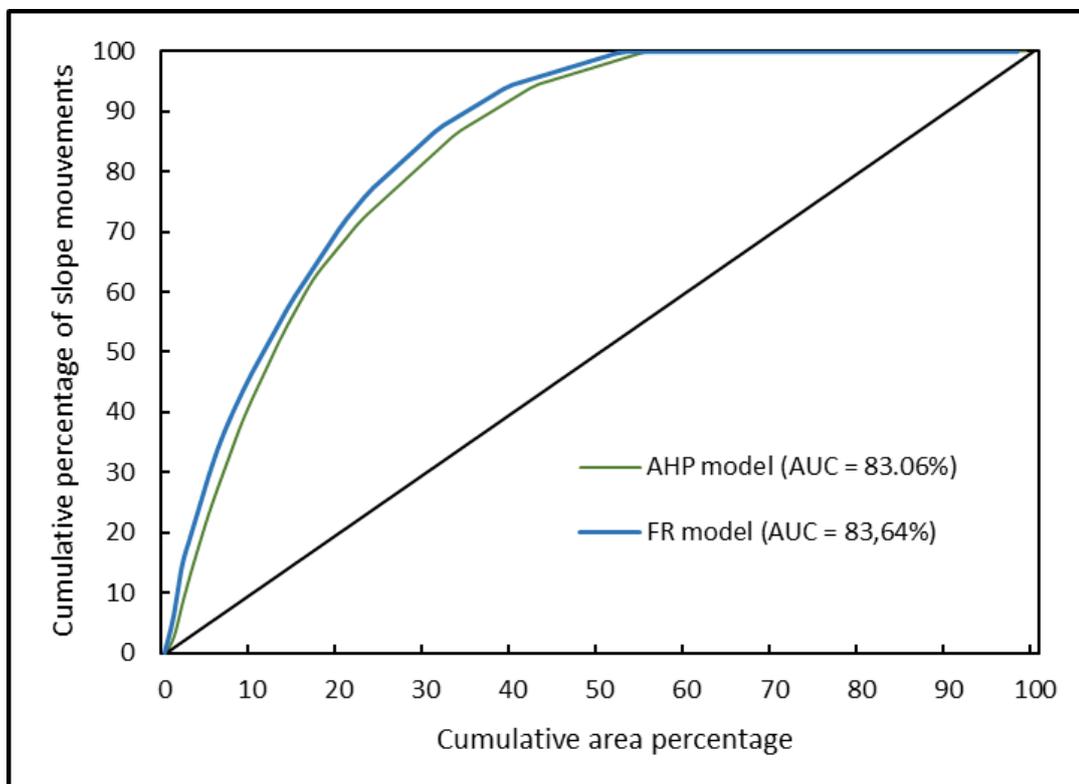


Figure 54 : Comparaison statistique entre les courbes de réussites calculées à partir des deux approches.

Cette comparaison repose sur l'analyse des courbes de réussite, d'après la figure 54 qui présente les deux courbes de réussite obtenues pour les deux approches. Le rapport de fréquence a un pouvoir prédictif supérieur comparativement avec l'analyse multicritères hiérarchique ( $AUC_{FR} \geq AUC_{AHP}$ ).

## **5. Conclusion**

Ce chapitre avait pour objectif d'analyser la susceptibilité des terrains aux mouvement de pente par deux approches, au degré de subjectivité différent : l'approche semi-quantitative reposant sur l'Analyse Multicritère Hiérarchique et une approche probabiliste (Rapports de fréquence), afin de déterminer le modèle le plus propice pour l'évaluation de la susceptibilité dans la zone d'étude.

Les résultats des deux modèles sont plus ou moins similaires. Les simulations par rapport de fréquence apparaissent plus performantes et plus adaptées, à l'échelle de travail considérée, pour obtenir un bon modèle en adéquation avec la réalité comparativement avec l'autre méthode. La carte construite via la méthode de rapport de fréquence donne une excellente cohérence avec les observations de terrain. En ce qui concerne la gestion du territoire, les décideurs peuvent, à partir de ce modèle et de la carte de susceptibilité qui en est issue, choisir de focaliser leurs efforts pour diminuer le risque sur la partie du territoire le plus susceptible. En interdisant par exemple la construction sur les zones du territoire les plus susceptibles, afin d'éviter les futurs mouvements de pente de créer des dommages dans le site d'étude.

## Conclusion générale

La zone d'étude est caractérisée par une moyenne densité de mouvements de pente. De ce fait, et dans le cadre du développement des wilayas du Nord Algérienne, l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de pente constitue une étape nécessaire pour l'aide à la prise de décision, et aussi pour le bien-être des habitants de la commune. Ainsi, le présent travail s'organise en 5 chapitres :

- **Le premier** : porte sur le cadre géographique, géomorphologique, géologique et sismique détaillé de la zone d'étude dans le cadre de l'évolution de la nappes telliens.
  - Il en ressort que l'état de structuration de la chaîne met en contact des formations géologiques variées avec de fréquentes alternances de matériaux de comportements mécaniques contrastés (calcaires, dolomies, grès, marnes, argiles...). Quant à la morphologie, elle est caractérisée par des reliefs très accidentés et de fortes dénivellations.
  - Cette situation est essentiellement la conséquence de l'activité tectonique de la nappes telliens qui résulte de l'effet conjugué, de la convergence Afrique-Europe, et des phénomènes de réajustement isostatique qui ont accentué du Pliocène à l'Holocène des mouvements verticaux différentiels, essentiellement le long des principaux accidents à activité récente N – S, N040 – 070 et N090 – 120.
  - Ce système compressif (surrection) résulte en grande partie de la position du secteur d'étude en zone de collision, là où les deux plaques continentales Afrique-Europe se rapprochent l'une de l'autre. Cette position particulière se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète la poursuite de la convergence entre ces deux plaques lithosphériques, et dont les contraintes sont principalement absorbées par la nappes telliens. De ce fait, les différentes unités géologiques se trouvent fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation et deviennent très susceptibles aux mouvements de pente.
- **Le deuxième chapitre** : consacrer à l'évaluation des facteurs hydroclimatologiques (climats et réseau hydrographique) pour leur contribution à des mouvements de pente dans la zone d'étude.

- Les précipitations ont été cartographiées par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles calculées sur les derniers 32 ans, et de réseau hydrographique obtenue à partir des modules spatiaux dans le logiciel ArcGis . Ils en ressorts que les précipitations et le réseau hydrographique jeu un rôle majeur dans la dégradation des terrains par leur implication dans l'apparence des phénomènes géologiques peut conduire à des glissements ou coulées importants.
- **Le troisième chapitre** : correspond à une grande partie du travail réalisé, matérialisé par l'inventaire, la cartographie, la classification, et la caractérisation des mouvements de pente, correspondant à un des éléments cruciaux pour mener à bien notre recherche. Cette étape a permis de :
  - Reconnaître cinq grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit, des glissements, des écroulements, des coulées boueuses, des sapements de berges, et des badlands.
  - Cartographier 82 mouvements de pente, qui couvrent une superficie de, soit 0,408155Km<sup>2</sup>, soit 0,184% de la superficie globale de la zone d'étude (222,754169 Km<sup>2</sup>).
- **Le quatrième chapitre** : illustre le travail réalisé pour l'acquisition, la description, la mise en forme et l'analyse des facteurs de prédisposition disponibles pour notre zone d'étude, toute en examinant dans le détail via une étude statistique leur relation avec les mouvements de terrains inventoriés.
- Dans **Le cinquième chapitre** deux méthodes de cartographie sont appliquées : une méthode semi-quantitative fondée sur l'Analyse Multicritère Hiérarchique et une méthode probabiliste (Rapport de fréquence). Les deux ont été testées sur un site représentatif. Les différents tests proposés au cours de cette recherche sont bons à très bons. Ils ont montré que la carte simulée par approche probabiliste bivariée est meilleure que celle simulée par approche semi-quantitative, en terme de reconnaissance des phénomènes et des classes de susceptibilité identifiées de manière statistique et experte.

Références

---

Bibliographiques

# A

**A.N.R.H., 1993**, Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une notice de 49 p.), Ministère de l'Équipement, Alger, Ed. I.N.C.

**Achour Y., Boumezbeur A., Hadji R. et al., 2017**, Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in constantine, Algeria, Arab. J. Geosci, 10, 194.

**Achour Y., Garçia S., Cavaleiro V., 2018**, GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Zêzere River basin and its surrounding area, Northwest Covilhã, Portugal, Arab. J. Geosci., 11(18), 550.

**Ait Brahim, L. (1991)** Tectonique cassante et état de contraintes récentes du Maroc Nord, contribution à l'étude du risque sismo-tectonique au Maroc. Thèse de doctorat d'état, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat.233p.

**Ait Brahim, L., Chotin, P., Tadili, B., Ramdani, M. (1990)** Failles actives dans le Rif central et oriental (Maroc).compte Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, tome II, n°310, p. 1123-1129.

**Aleotti, P. et Chowdhury, R. (1999)** Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment 58, 21–44p.

**Alexander, D.E. (1993)** Natural Disasters. Chapman & Hall, New-York, 632 p.

**Aoudia A., Vaccari F., Suhadolc P., Meghroui M. (2000)** – Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. J. of Seismology, 4, 7998.

**Atkinson, P.M., et Massari, R.(2011)** Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the central apennines, Italy, Geomorphology doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.001.

**Ayalew, L., et Yamagishi, H. (2005)** The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology, 65(1-2), 15-31p.

**Ayalew, L., Yamagishi, H., Marui, H., et Kanno, T. (2005)** Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. *Engineering Geology*, 81(4), 432-445p.

## **B**

**Bai, S., Lü, G., Wang, J., Zhou, P., Ding, L. (2010)** GIS-based rare events logistic regression for landslide-susceptibility mapping of Lianyungang, China. *Environ Earth Sci.* doi:10.1007/s12665-010-0509-3.

**Bai, S., Wang, J., Lü, G., Zhou, P., Hou, S-S., Xu, S-N. (2010)** GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping of the Zhongxian segment in the Three Gorges area, China. *Geomorphology* 115:23–31p.

**Beven, K. J. and Kirkby M. J.:** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.*, 24,43-69, 1979.

**Blahut, J., Van Westen, C-J., Sterlacchini, S. (2010)** Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology* 119, 36–5p.

**Bounif A. M. Bezzeghoud L. Dorbath D. Legard A.Deschamps L.Rivera and H.Benhallou (2003)** Seismic source study of the 1989 October 29 Chenoua (Algeria) earthquake from aftershocks broad-band and strong motion records *Ann. Geophys.* 46(4) 625-646.

**Brabb, E. E., & Pampeyan, E. H. (1972).** Preliminary map of landslide deposits in San Mateo County, California (No. 344).

**Brabb, E-E. (1984)** Innovative approaches to landslide hazard mapping. *Proceedings 4th International Symposium on Landslides*, Toronto, 1: 307-324.

**Brabb, E-E. (1984)** Minimum landslide damage in the United States, 1973-1983. U.S. Geological Survey Open-File Report, 84-486, 5 p.

# C

**Campina, B.** (2005) Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe). Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 290p.

**Carrara, A.** (1989) Landslide hazard mapping by statistical methods: a "black-box" model approach. In: Siccardi, F. and Bras, R. (eds.) International Workshop on Natural Disasters in European-Mediterranean Countries, Perugia, 27 June-1 July 1989, CNR US NFS, 427- 445p.

**Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F.** (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk". ITC Journal, 2: 172-183p.

**Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, F., Pasqui, V., Reichenbach, P.** (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms 16, 427-445p.

**Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, V., Reichenbach, P.** (1995) GIS-based techniques for mapping landslide hazard. In "Geographical Information System in assessing natural hazard" A. Carrara & F. Guzzetti (èds), Kluwer AcadPubl., Dodrecht, pp. 135-176p.

**Chadi, M.,** (2004) : Cadre géologique et structurel des séries crétacées néritiques du Constantinois (Algérie NE). Thèse Doctorat. Univ. Constantine.

**Chalouan, A.,** Michard, A., El Kadiri, Kh., Negro, F., Frizon de Lamotte, D., Soto, J-I., Saddiqi, O (2008) The Rif Belt, 100p; in Continental Evolution: The Geology of Morocco Structure, Stratigraphy, and Tectonics of the Africa-Atlantic-Mediterranean Triple Junction; Series: Lecture Notes in Earth Sciences, Vol. 116 Michard, A., Saddiqi, O., Chalouan, A., Frizon de Lamotte, D. (Eds.) 2008, XVIII, 426 p. 235 illus. in color.

**Chang, K. T., & Tsai, B. W.** (1991). The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping. Cartography and geographic information systems, 18(1), 69-77.

**Chaouki, A.** (1991) Les mouvements de terrain et les risques associés dans la région de Bab Taza (Rif occidental), thèse de l'université de Strasbourg, 211p.

**Choi J, Oh HJ, Lee HJ, Lee C, Lee S (2012)** Combining landslide susceptibility maps obtained from frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models using ASTER images and GIS. *Eng Geol* 124:12–23.

**Chouabi A., 1987** : Etude géologique de la région de Hammam N'abil's (SE de Geulma, Constantine) , Algérie .Thèse science. Univ. Toulouse, 123p.

**Colas, G., et Pilot G. (1976)** Description et classification des glissements de terrain. *Bull. Liaison Lab. P. et Ch.*, n° spécial, 21-30p.

**Corominas J, van Westen C, Frattini P et al. 2014.** Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ* 73: 209–263.

**Corominas, J. (1989)** Clasificación y reconocimiento de los movimientos de ladera, En: J. Corominas (Ed.) Estabilidad de taludes y laderas naturales, Monografía n° 3, Sociedad Española de Geomorfología, Barcelona, 1-30 p.

**Correia, R. B. 2007** - Modelação cartográfica em ambiente SIG de suscetibilidade à erosão hídrica dos solos, caso da bacia da Ribeira dos Picos, Santiago (Cabo Verde). Tese de Mestrado. Universidade de Coimbra. 162 p.

**Cote, M., 1998a (in Mébarki Azzedine., 2005),** Les régions bioclimatiques de l'Est algérien, *Rhumel*, n° 6, pp. 57-71.

**Crozier, M-J. (1986)** Landslides: causes, consequences et environment. Croom Helm Pub., London.

**Crozier, M-J., et Glade, T. (2005)** Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 1-40p.

**Cruden, D-M, et Varnes, D-J. (1996)** Landslide types and processes. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds.) *Landslides, Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board Special Report 247, Washington D.C., 36-75p.

**Cruden, D-M. (2003)** The shape of cold, high mountains in sedimentary rocks. *Geomorphology* 55 249-261p.

# D

**Dahoua L., Yakovitch S.V., Hadji R., Farid Z., 2017,** Landslide Susceptibility Mapping Using Analytic Hierarchy Process Method in BBA-Bouira Region, Case Study of East-West Highway, NE Algeria, [in:] A. Kallel, M. Ksibi, H. Ben Dhia, N. Khélifi (Eds.), Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology and Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development), Springer, Cham

**Dahoua.L., Savenko V.Y., Hadji R., 2017,** GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-west highway, North Algeria, Mining Science, 24, 81–91.

**Dai, F. C., & Lee, C. F. (2001).** Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case study. Canadian Geotechnical Journal, 38(5), 911-923.

**Delouis B.M** Valée M. Megharoui E. Calais S . Maouche K. Lammali A. Mahsas P. Briole F. Benhamouda and K. Yelles (2004) Slip distribution of the 2003 Boumerdes Zemouri earthquake Algeria from teleseism GPS and coastal uplift data Geophys. Res. Lett. 31 L 18607 doi : 10.1029/2004GL020687.

**Dietrich, E-W., Reiss, R., Hsu, M-L. and Montgomery, D-R. (1995)** A process based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. Hydrological Process, 9: 383-400p.

**Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L. and Ibsen, M.-L. (eds.) (1996)** Landslide Recognition. Identification, Movements and Causes. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 251 p.

**Dong, J.J., Li, Y.S., Kuo, C.Y., Sung, R.T., Li, M.H., Lee, C.T., Chen, C.C. (2010)** The formation and breach of a short-lived landslide dam at Siaolin village, Taiwan - Part I: Postevent reconstruction of dam geometry. Engineering Geology, doi: 10.1016/j.enggeo. 2010.10.004.

**Durand-Delga, M. (1980)** La Méditerranée occidentale : Etapes de sa genèse et problèmes structuraux liés à celle-ci, Mémoire Hors-Série de la Société Géologique. France, N°10, P203-224.

## E

**Ehret D, Rohn J, Dumperth C, Eckstein S, Ernstberger S, Otte K, Rudolph R, Wiedenmann J (2010)** Frequency ratio analysis of mass movements in the Xiangxi Catchment, Three Gorges Reservoir Area, China. *J Earth Sci* 21:824–834.

**El Khattabi, J. (2001)** Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse de Doctorat, Université d'Artois. 258 pp.

## F

**Faver J.L., Gervreau E., Durville J.L (1992)** " Prévoir l'évolution des mouvements de terrain". *Rev. Franç. Géotech.* n° 59, pp. 65-73 (avril 1992)

**Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., & Savage, W. Z. (2008).** Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3), 99-111.

**Figueiredo, R. F. 2001** – Modelação cartográfica em ambiente SIG para apoio à decisão: aplicação ao estudo da afectação potencial de usos do solo no sector Norte do Maciço Marginal de Coimbra. Dissertação de Mestrado. Univ. Coimbra. 204p.

**Flageollet, J.-C., Maquaire, O., Weber, D. (1996)** Evolutionship between landslides and climatic conditions. TESLEC, programme DG XII Thematic Report, 49-58p.

**Flageollet, J.-C. (1989)** Les mouvements de terrain et leurs préventions. Paris, masson, 320 p.

## G

**Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., et Reichenbach, P. (2008)** Comparing landslide inventory maps. *Geomorphology* 94, 268–289. doi:10.1016/j.geomorph.2006.09.023.

**Gallousi, C., Koukouvelas, I. K. (2007)** Quantifying geomorphic evolution of earthquake-triggered landslides and their relation to active normal faults. An example from the Gulf of Corinth, Greece, *Tectonophysics*, Volume 440, Issues 1-4, 1 August 2007, Pages 85104, doi:10.1016/j.tecto.2007.02.009.

**Gausson, H., Bagnouls, F., 1953.** Saison sèche et indice xérothermique. Université de Toulouse, Faculté des Sciences, Toulouse, France.

**Gelard J.P., 1969.** Recouvrement de socle dans l'aile orientale du massif de Grand kabylie (Algérie). *C. R. Acade. Sc.*, 268, 1905.

**Glade, T. and Crozier, M.J. (2005)** A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 75-138p.

**Glade, T., et Crozier, M-J. (2005)** The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M.G., et Crozier, M-J. (eds.) *Landslide risk assessment*. John Wiley, 43-74p.

**Glangeaud A.,** Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger, 1932, 608p.

**Gorsevski, P. V., Gessler, P. E., & Jankowski, P. (2003).** Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *Journal of geographical systems*, 5(3), 223-251.

**Greco, R., Sorriso-Valvo, M., et Catalano, E. (2007)** Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: The Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology* 89(1-2), 47-66p.

**Griffiths, J.S. (1999)** Proving the occurrence and cause of a landslide in a legal context. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 75-85.

**Guzzetti, F., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1994)** The AVI Project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18:4 623-633p.

**Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., et Reichenbach, P. (1999)** Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216p.

**Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et Stark, C.P. (2007)** Rainfall thresholds for the initiation of landslides. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, 239-267p.

**Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. (2005)** Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology* 72, 272– 299p.

## H

**Hadji R., Achour Y., Hamed Y., 2017b, Using GIS and RS for Slope Movement Susceptibility Mapping: Comparing AHP, LI and LR Methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria, [in:] A. Kallel, M. Ksibi, H. BEN DHIA, N. Khélifi (Eds.), Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions. EMCEI 2017. Advances in Science, Technology and Innovation, Springer, Cham.**

**Hadji R., Limani Y., Boumazbeur A., Demdoum A., Zighmi K., Zahri F., Chouabi A., 2014a, Climate change and their influence on shrinkage-swelling clays susceptibility in a semi-arid zone: a case study of Souk Ahras municipality, NE – Algeria, Desalination and Water Treatment, 52(10–12), 2057–2072.**

**Hadji R., Limani Y., Demdoum A., 2014b, Using multivariate approach and GIS applications to predict slope instability hazard case study of Machrouha municipality, NE Algeria, 10.1109/ICT-DM.2014.6917787 Publisher: IEEE Xplore.**

**Hadji R., Raïs K., Gadri L., Chouabi A., Hamed Y., 2017a, Slope failures characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machrouha municipalities, Northeastern of Algeria, Arabian Journal for Science and Engineering, 42, 281–300**

**Hamdache M. (1998) – Seismic Hazard Assessment for the Main Seismogenic Zones in North Algeria. Pure appl. Geophys. 152, 281-314.**

**Hansen, A. (1984)** Engineering geomorphology: the application of an evolutionary model of Hong Kong's terrain. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband 51*: 39-50p.

**Hansen, A. (1984)** Landslide hazard analysis. In: Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope instability*, Wiley & Sons, New York, 523-602p.

**Hansen, M.J. (1984)** Strategies for classification of landslides. Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) *Slope Instability*. John Wiley and Sons, 1-25p.

**Hervas, J. (2003)** Lessons learnt from Landslide Disasters in Europe. European Commission, Joint Research Centre, Ispra. 91 p.

**Huabin, W., Gangjun, L., Weiya, X., & Gonghui, W. (2005)**. GIS-based landslide hazard assessment: an overview. *Progress in Physical Geography*, 29(4), 548- 567.

**Hutchinson, J. N., & Chandler, M. P. (1991)**. A preliminary landslide hazard zonation of the Undercliff of the Isle of Wight. In *Slope stability engineering developments and applications: Proceedings of the international conference on slope stability organized by the Institution of Civil Engineers and held on the Isle of Wight on 15–18 April 1991* (pp. 197-205). Thomas Telford Publishing.

**Hutchinson, J.N. (1988)** General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, 1: 3-35p.

**Hutchinson, J-N. (1995)** Keynote paper: Landslide hazard assessment. In: Bell (ed.) *Landslides*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1805-1841p.

**Hutchinson, M. F., & Dowling, T. I. (1991)**. A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes*, 5(1), 45-58.

## K

**Kanungo, D. P., Arora, M. K., Sarkar, S., & Gupta, R. P. (2009)**. Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping—a review. *J South Asia Disaster Stud*, 2(1), 81-105.

**Kienholz, H. (1978).** Maps of geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland: scale 1: 10,000. Arctic and Alpine Research, 169-184.

## L

**Lara, M., et Sepúlveda, S.A. (2010)** Landslide susceptibility and hazard assessment in San Ramón ravine, Santiago, Central Chile, from an engineering geological approach. Environmental Earth Sciences, 60(6), 1227-1243p.

**Ledoux, B. (1995)** Les catastrophes naturelles en France. Payot et Rivages, Paris. 455p.

**Lee S (2014)** Geological application of geographic information system. Korea Inst Geosci Min Resour 9–15:109–118.

**Lee S, Pradhan B (2006)** Probabilistic landslide hazards and risk mapping on Penang Islands, Malaysia. J Earth Syst Sci 115:661–672.

**Lee, S, Oh, H-J, Dong, K-K. (2010)** Statistical Spatial Modeling of Ground Subsidence Hazard near an Abandoned Underground Coal Mine Disaster Advances, 3, 11-23p.

**Leroi, E. (1996).** Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments. Landslides, 1, 35-51.

**Liu, J-P., Zeng, Z.P., Liuand, H.Q., Wang, H.B. (2011)** A rough set approach to analyzing factors affecting landslide incidence, Computers & Geosciences, doi: 10.1016/j.cageo.2011.02.010.

## M

**Malet, J.-P. (2003)** Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpes du sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique. Thèse de Doctorat, École et Observatoire des Sciences de la Terre, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364 p.

**Maquaire, O. (2002).** Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain):-processus, fonctionnement, cartographie (Doctoral dissertation).

**Mărgărint, M. C., Crozavu, A. D. R. I. A. N., Patriche, C. V., Tomaşciuc, A. M. I., Urdea, R. O. X. A. N. A., & Ungurianu, I. O. N. U. Ț. (2011)** Évaluation des risques de glissements de terrain par la méthode de la régression logistique: application à deux zones basses de Roumanie. *Dynam. Environ*, 28, 41-50.

**Metz, C. E. (1978, October).** Basic principles of ROC analysis. In *Seminars in nuclear medicine* (Vol. 8, No. 4, pp. 283-298). WB Saunders.

**Meunier, M. (1991)** Éléments d'Hydraulique Torrentielle. *Études Montagne*, N°1, Editions Cemagref, Antony, 278 p.

**Mezoghi TH, Akhir JM, Rafek AG, Abdullah I (2011)** Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model applied to an area along the E-W Highway (Gerik-Jeli). *Am J Environ Sci* 7:43–50.

**Mikoš, M., Fazarinc, R., Ribičič, M. (2006)** Sediment production and delivery from recent large landslides and earthquake-induced rock falls in the Upper Soča River Valley, Slovenia. *Engineering Geology* 86, 198–210p.

**Miles, S-B, et Keefer, D. K. (2009)** Evaluation of CAMEL, Comprehensive Areal Model of Earthquake-induced Landslides, *Engineering Geology*, 104, pp 1 - 15.

**Miles, S-B., et Keefer, D-K. (2009)** Towards a comprehensive areal model of earthquake-induced landslides (CAMEL), *Natural Hazards Review* 10(1), pp. 19 - 28.

**Millies-Lacroix, C.A. (1968)** Les glissements de terrains. Présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de masse dans le Rif (Maroc septentrional). *Mines et Géologie*, n° 27. p. 45-55.

**Millies-Lacroix, C.A. (1981)** Classification des talus et des versants instables. Risques géologiques, mouvements de terrain. – *Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées*, 55-62 p.

**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* 61:221–236.

**N**

**Nandi, A., Shakoor, A. (2010)** A GIS-based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Eng Geol* 110:11–20p.

**Nefeslioglu, H-A., Gokceoglu, C., et 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. *Engineering Geology*, Vol. 97, 171 171p.

**Nemčok, A., Pašek, J., et Rybář, J. (1972)** Classification of landslides and other mass movements. *Rock Mechanics*, 4: 71-78p.

**Nieto, A-S. (1989)** Mechanical models and geological observations: closing the prediction gap. In: Siccardi, F. and Bras, R. (eds.) *International Workshop on Natural Disasters in European-Mediterranean Countries, Perugia, 27 June - 1 July 1989, CNR US NFS*, 145- 164p.

**Nocquet J.M. (2002)** – Mesure de la déformation crustale en Europe occidentale par géodésie spatiale. Thèse Univ. Sophia-Antipolis.

## O

**Ouyed M., M. Yielding, G. Hatzfeld, G.C.P. King** An aftershock study of the El Asnam (Algeria) earthquake of 1980 October 10 *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 73 (1983), pp. 605-639  
**Meghraoui M. , Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie : Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique, thèse d'Etat, université Paris-11, 1988, 356 p.**

## P

**Parise, M., et Jibson, R-W. (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, *Engineering Geology*, 58: 251-270p.

**Pavel, M., Nelson, J-D., et Fannin, J-F. (2011)** An analysis of landslide susceptibility zonation using a subjective geomorphic mapping and existing landslides. *Computer and Geosciences*, Volume 37 issue4, 554-566p.

**Pourghasemi, H. R., Pradhan, B., & Gokceoglu, C. (2012).** Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural hazards*, 63(2), 965-996.

**Pradhan, B. (2010)** “Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches”. *J.Indian Soc. Remote Sens.*, 38: 301-320p.

**Pradhan, B. Oh, H., et Buchroithner, M. (2010)** “Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area”. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(3), 199- 223p.

**Pradhan, B., et Lee, S. (2010)** Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling, *Environmental Modelling & Software* 25, 747-759p.

## R

**Radbruch-Hall, D-H., et Varnes, D-J. (1976)** Landslides: causes and effect. *International Association Engineering Geologist Bulletin*, 14: 205-216.

**Rapp A., (1972).** Conclusions from the DUSER soil erosion project in Tanzania. *Geografiska Annaler* 54 , A :377-379.

**Rapp A., Axelsson V., Berry L., Murray-Rust D ., (1972).**Soil erosion and sediment transport In the Morogordo river catchement, Tanzania.

**Regmi, N-R, Giardino, JR., Vitek, J-D. (2010)** Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology* 115:172–187p.

**Rib, H-T., et Liang, T. (1978)** Recognition and identification. In: Schuster, R.L. and Krizek, R.J. (eds.) *Landslide Analysis and Control*, National Academy of Sciences, Transportation Research Board Special Report 176, Washington, 34-80p.

# S

**Saaty, T. L. 1991** - Método de Análise Hierárquica. São Paulo, McGraw-Hill, Makron. 367p.

**Safaei, M., Omar, H., Huat, B. K., Yousof, Z. B., & Ghiasi, V. (2011)**. Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantage and limitation. *Electron J Geotech Eng*, 16, 1619-1650.

**Sassa, K. (1988)** Special Lecture: Geotechnical model for the motion of landslides. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne*, 1: 37-55p.

**Scalera G. (2005)** A new interpretation of the Mediterranean arcs: Mantle wedge intrusion instead of subduction. In *Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale n. 5 (2005)*, 129147, 12 ff.

**Selby, M-J (1993)** *Hillslope Materials and Processes*. 2nd Edition, Oxford University Press, 451p.

**Sharpe, C.F.S (1938)** *Landslides and related phenomena: A study of mass movements of soil and rock*. Columbia University Press, New York, 137 p.

**Shroder, J.J., Marston, R. & Stoffel, M., 2011**. *Mountain and hillslope geomorphology, treatise on geomorphology*, Elsevier, Amsterdam

**Soeters, R., et Van Westen, C-J. (1996)** Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Turner, K.A., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transport Research Board Special Report 247, p. 129– 177p.

**Song, R-H., Daimaru, H., Abe, K., Kurosawa, U., Matsuura, S (2008)** Modeling the potential distribution of shallow-seated landslides using the weights of evidence method and a logistic regression model: a case study of the Sabae Area, Japan. *International Journal of Sediment Research* 23, 106–118p.

**Sossey Alaoui, F. (2005)** *Traitement et intégration des données satellitaires optiques et Radar dans un SIG en vue de l'obtention de carte de l'aléa lié aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif septentrional, Maroc)*. Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. 175p.

**Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M., et Sorichetta, A (2011)** Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. *Geomorphology* 125 (2011) 51–61p.

## T

**Terzaghi K. (1925).** «Principles of soil mechanics» Eng. News. Record 95. Eight articles between pp. 742 and 1 068. Published as a book with the same title. New York : McGraw-Hill, 1926.

**Thiery , Y. (2007)** Landslide susceptibility in the Barcelonnette basin (French South Alps): morphodynamic cartography, spatial analysis and probabilistic modelling. PhD Thesis, Caen/basse-Normandie university, French. 445p.

**Torizin J (2011)** Bivariate statistical method for landslide susceptibility analysis using ArcGIS. Hannover. Project of technical cooperation “Mitigation of Georisks” in Bogor, BGR-Report: BGR, pp 34–61.

## V

**Van Den Eeckhaut, M., Marre, A., and Poesen, J. (2010)** Comparison of two landslide susceptibility assesments in the Champagne-Ardenne region (France): *Geomorphology*, volume: 115, 141-155p.

**Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Gullentops, F., Vandekerckhove, L., Hervás, J. (2011)** Regional mapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LIDAR based imagery in Southern Flanders, *Quat. Res.* (2011), doi: 10.1016/j.yqres.2011.02.006.

**Van Den Eeckhaut, M., Vanwallegem, 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), 392-410.

**Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008).** Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. *Engineering geology*, 102(3), 112-131.

**Van Westen, C-J. (1993)** Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. Ph-D Dissertation, Technical University Delft. ITC-Publication Number 15, ITC, Enschede, The Netherlands, 245 p.

**Van Westen, C-J., et Lulie G-F (2003)** Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. *Geomorphology* 54 (1 2), 77–89.

**Van Westen, C-J., Rengers, N., Terlien, M.T.J., Soeters, R.(1997)** Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86, 404–414p.

**Van Westen, C-J., Van Asch T-W-J., et Soeters R. (2006)** Landslide Hazard And Risk Zonation: Why Is It Still Sodifficult? *Bulletin Of Engineering Geology And The Environment*, 65, 167–184p.

**Varnes, D-J. (1978)** Slope Movement Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. In: Schuster, R.L., Krizek, R.J., (Eds), Transport Research Board, National Research, p11–33.

**Varnes, D-J. (1984)** Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides. UNESCO, Paris, 63 p.

**Veyret, Y., 2003.** Les risques, SEDES, Paris.

**Vila .J .M.** La carte géologique (1/50000) de Redjas El Ferada et sa notice publiée en 1977 par le ministère de l'industrie et de l'énergie, direction des mines et de la géologie, service de la carte géologique de l'Algérie,1977.

**Vila J M ., 1980 :** La chaine Alpine d'Algérie orientale et des confis Algéro Tunisiens. Thèse Sc. Univ. Paris VI, 3 vol, 633p., 199 fig., 40 pl ., 7 pl,h,t.

**W**

**Whalley, W-B. (1984)** Rockfalls. In: Brunsden, D. and Prior, D.B. (eds.) Slope Stability, Chapter 7, John Wiley & Sons, New York, 217-256.

**Whalley, W-B., Douglas, G-R., et Jonsomn, A. (1983)** The magnitude and frequency of large rockslides in Iceland in the postglacial. *Geografiska Annaler*, 65 A:1-2 99-110.

**Wildi, W. (1983)** La chaine tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie). Structure stratigraphie et évolution du Trias au Miocène - *Rev. Géol. Dyn. Géogr. Phys.*, 24, p. 201-299.

## Y

**Yalcin A, Reis S, Aydinoglu AC, Yomralioglu T (2011)** A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA* 85:274–287.

**Yao X, Tham LG, Dai FC (2008)** Landslide susceptibility mapping based on Support Vector Machine: a case study on natural slopes of Hong Kong, China. *Geomorphology*, doi: 10.1016/j.geomorph.2008.02.011.

**Yelles-Chaouch A.K, A. Deramchi, A.Ferkoul,K.Aoulaiche,** Les séismes d’Algerie du Nord de 1992-2001,Catalogue,2002,216p.

**Yesilnacar, E., et Topal, T. (2005)** Landslide susceptibility mapping: A comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey). *Engineering Geology*, 79:3-4 251-266.

**Yilmaz I (2009)** Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: a case study from Kat landslides (Tokat-Turkey). *Comput Geosci* 35:1125–1138.

**Yilmaz I, Keskin I (2009)** GIS based statistical and physical approaches to landslide susceptibility mapping (Sebinkarahisar, Turkey). *Bull Eng Geol Environ* 68:459–471.

## **Les sites**

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[www.craag.dz/index.php](http://www.craag.dz/index.php).

<https://www.brgm.fr/>

<https://www.esri.com/fr-fr/>

<https://earthdata.nasa.gov/>

# Annexes

---

## Les coordonnées géographiques Enregistré sur terrain

<i>Point</i>	<i>Longitude</i>	<i>Latitude</i>
1	36°10'39.57''N	5°03'12.60''E
2	36°10'38.25''N	5°03'10.95''E
3	36°10'38.90''N	5°03'11.07''E
4	36°11'01.96''N	5°01'52.02''E
5	36°11'09.99''N	5°01'49.20''E
6	36°11'15.07''N	5°01'51.22''E
7	36°11'26.54''N	5°01'05.66''E
8	36°11'30.87''N	5°02'13.22''E
9	36°11'31.09''N	5°02'15.15''E
10	36°11'30.46''N	5°02'20.96''E
11	36°11'19.32''N	5°02'50.80''E
12	36°11'28.81''N	5°02'02.53''E
13	36°11'20.16''N	5°03'00.54''E
14	36°14'01.02''N	5°01'57.22''E
15	36°14'26.45''N	5°02'19.71''E
16	36°14'47.62''N	5°02'58.53''E
17	36°14'49.58''N	5°03'13.32''E
18	36°14'45.21''N	5°03'27.06''E
19	36°14'59.22''N	5°01'57.81''E
20	36°13'51.53''N	5°01'32.98''E
21	36°13'59.37''N	5°01'31.95''E
22	36°13'50.46''N	5°01'36.08''E
23	36°14'54.66''N	4°58'42.25''E
24	36°14'50.26''N	4°58'45.34''E
25	36°14'56.47''N	4°58'50.27''E
26	36°15'43.49''N	4°58'27.15''E
27	36°15'43.03''N	4°57'03.03''E
28	36°15'43.30''N	4°58'19.90''E
29	36°14'47.16''N	4°58'46.37''E
30	36°11'15.53''N	5°01'50.32''E
31	36°11'00.67''N	5°01'51.71''E
32	36°14'24.09''N	5°02'15.62E
33	36°14'20.13''N	5°02'11.53''E
34	36°14'47.37''N	4°58''49.86''E
35	36°14'46.61''N	4°58'50.67''E
36	36°14'52.69''N	4°58'41.66''E
37	36°13'53.08''N	5°01'36.27''E
38	36°13'48.78''N	5°1'31.64''E
39	36°13'51.79''N	5°1'47.54''E
40	36°13'58.02''N	5°1'53.72''E

# Photographies









