

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université d'Oran2 MOHAMED BEN AHMED



Faculté des Sciences de la Terre et de L'univers
Département des Sciences de la Terre
Rapport en vue de l'obtention du
DIPLÔME de Master
OPTION : Risques Géologiques et Gestion

Thème

« Cartographie algébrique de la susceptibilité aux glissements de terrain de la région d'Echorfa (NW de l'Algérie) par les méthodes statistiques et SIG. »

Présenté par :

- **Oukil Cilia**
- **Bouchiba Meryama Amani**

Soutenu le : 11/09/2019 Devant la commission d'examen :

Président: Mr MANSOUR .H
Examineur: Mr FOUKRACHE. Med
Encadreur: Mr NADJI. A M
Invité d'honneur: Mr ROUKH . Za

Oran, 2018/2019

Dédicace

Je remercie ALLAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment mes parents, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.

*Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère Laila, qui m'a accompagné durant les moments les plus pénibles dans ma vie, celle qui a fait preuve de ces plus copieux desseins pour me permettre de goûter le fardeau de ce monde et de chercher la voie de ma vie avec ses précieux conseils, donc je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant. Je prie ALLAH le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète,
Et te protège et te garde en bonne santé.*

A mon chère papa mouloud qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments rudes de ma vie

A mon grand chère frère Lyes qui a été toujours à mes côtés

A plus chère et plus compréhensif frère du monde Toufik

A mes petites chères sœurs numidia, feriel et Fatiha

A la plus chère amie et sœur mina

A ma grande sœur Amina

A monsieur roukhi zin alabidin qui ma guidée pour faire ce modeste travail.

A mon oncle Mr moukhtar oukil

A tous mes amis

Enfin : A tous ceux qui m'aiment.

Cilia oukil

Dédicaces

A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que Dieu te protège, à toi mon père. A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur : ma très chère maman que j'adore. A la prunelle de mes yeux, ma très chère sœur Kheira. Aux personnes dont j'ai bien aimé la présence dans ce jour, à mes frères Oussama et abd Nouret mes belles-sœurs Samia et Siham. Au cœur si grand Amina, Aicha la douce et Saliha l'adorable que j'aime profondément, A ma chère binôme Cilia pour son entente et sa sympathie Je vous dédie ce travail dont le grand plaisir vous revient en premier lieu pour vos conseils, aides, et encouragements.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force, la santé, et la patience pour arriver là où nous sommes. A l'issue de ce travail, il nous est agréable d'adresser nos remerciements à tous ceux qui ont contribué, à ce qu'il prenne forme, et s'achève en ayant atteint les objectifs tracés et ces quelques phrases ne sont pas suffisantes pour exprimer notre gratitude et reconnaissance.

Ainsi c'est à Monsieur Roukh Zin Abidin que nous devons en tout premier lieu notre reconnaissance. Il a dirigé magistralement la mise en oeuvre des différentes étapes du travail, un grand merci à monsieur Nadji nous avons bénéficié de leurs très grande expérience, de leurs remarques avisées et toujours pertinentes. Nous remercions les membres du jury Mr mansour .H et Mr Foukrach Med qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous leur présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département de géologie qui nous ont suivis durant notre cursus.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tout le monde pour tout.

Cilia et meryama amany

Sommaire

I. Introduction générale.....	01
Chapitre 01 : généralité sur mouvements de terrain	
I.1. Introduction.....	02
I.2. Définition des mouvements de terrain.....	03
I.2.1. Les mouvements lents continus.....	03
I.2.2. Les mouvements rapides discontinus	03
I.2.3. L'érosion littorale.....	03
I.3. Les différents types des mouvements de terrains	
I.3.1. L'écroulement.....	04
I.3.2. La chute de blocs et Eboulement.....	04
I.3.3. Le fluage.....	05
I.3.4. La coulée boueuse.....	06
I.3.5. Solifluxion.....	06
I.3.6. Le fauchage.....	07
I.3.7. Les glissements de terrain.....	08
I.3.7.1. Morphologie générale d'un glissement de terrain.....	09
I.3.7.2. Nature des matériaux géologiques concernés par le glissement.....	10
I.3.7.3. Classification de glissement.....	10
I.3.7.4. Les type de glissements de terrain.....	11
a. Le glissement planaire (translatif).....	12
b. Le glissement rotationnel simple.....	12
c. Le glissement rotationnel complexe.....	14
I.3.7.5. Causes des glissements de terrain.....	14
➤ Les facteurs permanents.....	14
➤ Les facteurs dynamiques et déclenchant.....	14
a. Les facteurs permanents.....	15
a.1 La géologie et géomorphologie :	15
a.2. La pente :.....	15
a.3. La couverture végétale.....	15
b. Les facteurs dynamiques et de déclenchement.....	15
b.1. Le climat :.....	15
b.2. L'action anthropique.....	16
b.3. Le séisme.....	16
I.3.7. 6. Exemples réels des glissements des terrains en Algérie.....	16

I.3.7.7. Exemples réels des glissements des terrains dans le monde.....	19
--	-----------

Chapitre 02 : méthodes de résolution de cartographie

II.1. Introduction.....	23
II.2. Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.....	24
II.2.1. L'approche directe (qualitative).....	24
II.2.1.1. cartographie d'inventaire.....	24
II.2.1.2. L'analyse géomorphologique.....	25
II.2.1.3. Méthode par combinaison de carte d'index.....	25
II.2.2. L'approche indirecte (probabiliste).....	26
II.2.2.1. L'analyse bivariée.....	27
a. Théorie de l'évidence.....	27
b. L'analyse bivariée par régression logistique.....	28
II.2.2.2. Méthode multi variée.....	29
II.2.3. L'approche déterministe ou physique.....	30
Conclusion.....	32

Chapitre 03 : acquisition et traitement des données

III.1. Introduction.....	33
III.2. Méthodes et technique d'inventaire des glissements de terrain.....	33
III.2.3.1 Acquisition de l'information avec Google Earth.....	33
III.2.2 Approches GPS disponibles.....	34
III.2.3 L'inventaire par L'apport de la télédétection : L'utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain.....	35
III.2.3.1 la localisation et l'inventaire.....	36
a. Méthode géomorphologique	36
b. Méthode de traitement d'images semi-automatiques et automatiques.....	37
III.2.3.2 Caractérisation.....	39
III.2.3.3 Suivi des déformations.....	39

III.3 Processus d'étude d'un glissement de terrain.....	40
III.3.1 Repérage topographique d'une zone instable.....	40
III.3.2 L'enquête historique.....	40
III.3.3 Etude géologique et géomorphologique.....	41
III.3.4 Etude hydrogéologique.....	41
III.3.5 Etude géotechnique.....	42
III.4 Les factures de prédispositions.....	42
III.4.1 L'occupation du sol.....	43
III.4.2 La pente.....	44
III.4.3 Lithologie.....	44
III.4.4 L'hygrométrie.....	44
III.4.5 L'exploitation humaine.....	45
Conclusion.....	45

Chapitre 04 : caractérisation des facteurs

IV.1 Description de la zone d'étude.....	46
IV.1.1 Situation géographique.....	46
IV.1.2 Cadre Géologique.....	48
IV.1.2.1 Cadre géologique général.....	48
IV.1.2.2 Géologie du secteur d'étude.....	50
IV.1.3 La morphologie de la zone d'étude.....	53
IV.1.4 Caractéristiques hydrologique.....	58
IV.1.5 La climatologie de la zone d'étude.....	60
IV.1.6. Sismicité de la zone d'étude.....	66
IV.2 Inventaire des glissements de terrain.....	69
IV.3 Les facteurs causatifs des glissements de terrain.....	75
IV.3.1 La pente.....	75
IV.3.2 Direction de la pente.....	77

IV.3.3 Lithologie.....	79
IV.3.4 La densité des linéaments.....	82
IV.3.5 Précipitations.....	87
IV.3.6 Distance par rapport au cours d'eau.....	89
IV.3.7 Occupation des sols.....	91
IV.3.8 L'altitude.....	93
IV.4 Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain et interprétations des résultats.....	95
IV.4.1. Les méthodes statistiques.....	95
IV.4.1.1Lavalueur informative.....	95
IV.4.1.2 Ratio de fréquence.....	96
IV.4.1.3LaThéorie de l'évidence.....	97
IV.4.1.4 Analyse Hiérarchique des procédés(AHP).....	97
IV.4.2 Interprétation des résultats.....	101
IV.5 Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.....	106
IV.6 Validation des résultats.....	109
Conclusion générale	113

Résumé :

L'étude de l'instabilité des terrains en zones accidentées sub telliennes de la Wilaya d'Oran a connu ces dernières années un retentissement notable envers la communauté scientifique et les collectivités locales pour mieux cerner les paramètres intrinsèques d'une prévention contre les mouvements de terrain et de planifier le plan de prévention régional des glissements de terrain (PPRG). Comme le secteur d'Echorfa se situe sur les versants septentrionaux des chaînons sub-telliens du faisceau 'Tessala- Oulad Ali' souvent exposé aux manifestations sismiques, l'établissement de la cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain devient ainsi nécessaire. Dans cette étendue de terrains où se croisaient plusieurs contraintes naturelles pour engendrer un écosystème vulnérable à plusieurs paramètres causatifs des glissements de terrain qui font l'objet de cette modeste recherche sur le risque géologique et ces répercussions sur l'environnement; en l'occurrence la composante hydrique du barrage d'Echorfa. Vue sa position de piedmonts des reliefs et l'assistance des changements de faciès entre les terrains sédimentaires et métamorphiques, la densité du chevelu hydrographique, les variations climatiques à potentiel d'érosion notable additivement aux sollicitations des tremblements de terre plus ou moins modérées l'état de consistance de ces terrains ne peut être qualifiée de zone stable.

L'objectif de notre travail est focalisé sur la résolution géo spatiale de ces différents paramètres, par l'utilisation des approches statistiques sous l'environnement de SIG. Une première ébauche de notre travail intéressait l'établissement d'un inventaire des glissements de terrain lors des sorties sur sites pour distinguer le type et l'ampleur du phénomène envisagé. Une seconde phase est consacrée surtout au travail géomatique dont nous avons apprécié, sous l'encadrement de nos enseignants, la valeur informative de chaque approche envisagée et la qualité de résolution des produits thématiques livrés par l'outil informatique ; notamment les résultats obtenus par le logiciel Arc Gis (V. 10.1)

A ce stade de réalisation de cartes thématiques, la carte de synthèse (susceptibilité) du secteur d'Echorfa a fait l'objet de l'application de plusieurs approches statistiques telles que : Ratio de Fréquence (RF), Valeur Informative (IV), la Théorie de l'Evidence (WOE) et la méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) qui ont donné le meilleur classement des poids des différents paramètres introduits dans cette étude multicritère. L'utilisation des équations algébriques, sous l'environnement SIG, nous a permis de calculer l'Indice Global de la Susceptibilité (IGS) pour chaque méthode statistique utilisée. Une attribution qualitative en nombre de cinq catégories de susceptibilité a été imposée pour distinguer les zones faibles à très faible des modérées, des zones fortes à assez forte vulnérabilité.

Une dernière étape de validation a approuvé que les trois approches statistiques indexées par IV, WOE et AHP sont jugées adéquates pour une meilleure cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain étudiés. Vue ces résultats, le présent constat sur IGS porte une somme d'information objective pour être exploiter par les collectivités locales et les organismes de développement d'environnement et des écosystèmes ruraux.

Mots Clés : Secteur d'Echorfa; susceptibilité aux glissement de terrain; Cartographie thématique de l'indice global de susceptibilité (IGS); SIG; RF; IV ; WOE et AHP approche statistique.

Summary:

The study of the instability of terrains in hilly Sub-Saharan areas of the Wilaya of Oran has in recent years a significant impact on the scientific community and local communities to better understand the main parameters of a prevention against the movements of field and plan the regional landslide prevention plan (PPRG). As the Echorfa sector is located on the northern slopes of the sub-tellic chains of the 'Tessala- Oulad Ali' beam often exposed to seismic events, the establishment of the landslide susceptibility mapping becomes necessary. In this expanse of land where several natural constraints met to create an ecosystem vulnerable to several causative parameters of the landslides that are the object of this modest research on the geological risk and these repercussions on the environment; in this case, the water component of the Echorfa dam. View its position of piedmonts reliefs and assistance facies changes between the sedimentary and metamorphic terrains, the density of the hairy hydrographic, climatic variations with erosion potential significant additive to the solicitations of earthquakes more or less moderate the state of consistency of these lands can not be described as a stable zone. The objective of our work is focused on the geo spatial resolution of these different parameters, through the use of statistical approaches under the GIS environment. A first draft of our work concerned the establishment of an inventory of landslides during field trips to distinguish the type and extent of the phenomenon envisaged. A second phase is devoted mainly to the geomatic work which we have appreciated, under the guidance of our teachers, the informative value of each approach envisaged and the quality of resolution of the thematic products delivered by the computer tool; in particular the results obtained by the Arc Gis software (V. 10.1)

At this stage of realization the thematic maps, the map of synthesis (susceptibility) of the sector of Echorfa was the object of the application of several statistical approaches such as: Ratio of Frequency (RF), Information Value (IV), the Evidence Theory (WOE) and the Hierarchical Process Analysis (AHP) method which gave the best ranking of the weights of the different parameters introduced in this multicriteria study. The use of the algebraic equations, under the GIS environment, allowed us to calculate the Global Index of Susceptibility (IGS) for each statistical method used. A qualitative allocation in number of five categories of susceptibility was imposed to distinguish the weak zones with very weak from the moderates, zones strong with rather strong vulnerability.

A final validation step approved that the three statistical approaches indexed by IV, WOE and AHP are considered as adequate for a better mapping of susceptibility to landslides studied. In view of these results, the present report on IGS provides an objective amount of information for use by local authorities and rural environmental development organizations and ecosystems.

Key words: Echorfa; susceptibility to landslides; Thematic mapping of the global susceptibility index (IGS); GIS; RF; IV; WOE and AHP statistical approach.

ملخص

الانهيار الأرضي هو ظاهرة جيولوجية حيث تتحرك كتلة من الأرض على طول المئانة أو سطح التمزق تحت تأثير الجاذبية ، وتتسبب حركات الأرض في حدوث أضرار مادية كبيرة وخسائر بشرية سنويًا أهمية. الهدف من هذا العمل هو تطبيق الأساليب الإحصائية وبيئة نظام المعلومات الجغرافية (GIS) من أجل تحديد مدى التعرض للانهيئات الأرضية في منطقة Echorfa (شمال غرب الجزائر) . أولاً ، يتم إنشاء خريطة جرد ساحلي عن طريق استطلاعات التضاريس وصور Google Earth. ثانياً ، تم دمج تسع معلمات مثل الميل والجانب والليثولوجيا وكثافة النسبية وهطول الأمطار وقرب التيار واستخدام الأرض والارتفاع لتقييم الفهرس. قابلية الانهيار الأرضي. ثالثاً ، تطبيق الأساليب الإحصائية نسبة التردد (RF) ، القيمة الإعلامية (VI) ، نظرية الأدلة (WOE) وطريقة تحليل العملية الهرمية (AHP) على أساس نظام المعلومات الجغرافية GIS لتقييم الترجيح لكل فئة من المعلمات المتكاملة التسعة. يسمح استخدام المعادلات الجبرية في نظام GIS بحساب المؤشر العالمي لمدى القابلية للتأثر (IGS) لكل طريقة إحصائية ، والتي تصنيفها في خمس فئات (خالية ، ضعيفة ، معتدلة ، قوية وقوية) ينتج أربع خرائط لل قابلية الانهيارات الأرضية. أخيراً ، توضح عملية التحقق من الصحة أن الطرق الإحصائية الثلاثة VI و WOE و AHP قادرة على تحديد مدى قابلية الانهيارات الأرضية في منطقة Echorfa. تأتي هذه الدراسة بنتائج مهمة ، واستغلالها من قبل السلطات المحلية ، وخدمات التخطيط الحضري والأشغال العامة ، مما يجعل من الممكن وضع خطة للوقاية من أخطار الانهيارات الأرضية في منطقة Echorfa.

الكلمات المفتاحية: قابلية الانهيارات الأرضية ، نظم المعلومات الجغرافية ، RF ، VI ، WOE ، AHP ، Echorfa ، الجزائر.

Introduction General

Introduction générale :

Les glissements de terrain sont des phénomènes géodynamiques qui se produisent dans plusieurs parties du monde et souvent les plus graves sur la surface de la terre. Ils provoquent des modifications sur le paysage et peuvent détruire des édifices et des constructions et causent parfois des décès. Ces phénomènes se développent dans un massif de sols meubles ou de roches argileuses tendres et se produisent dans des circonstances très variées (Smahi .A et all 2015)

Ces mouvements se produisent lors des tremblements de terre (séismes, explosions souterraines ou sous-marines, etc.), et/ou lors des périodes pluvieuses intenses avec des précipitations prolongées, de l'action conjuguée de facteurs géologiques et géomorphologiques divers . Ces phénomènes naturels souvent catastrophiques engendrent des instabilités de terrains et parfois des effondrements de structures se trouvant dans le voisinage immédiat (Ramos1.A et all 2014).

Ce problème constitue actuellement l'une des préoccupations majeure des ingénieurs chargés de la gestion des risques naturels. La susceptibilité représente la prédisposition d'une zone à être touchée par certains phénomènes dangereux, en un temps indéterminé, évaluée à l'aide de critères de prédisposition à ces phénomènes ou actions, sans prendre en compte sa période de retour ou la possibilité de se reproduire (Ramos1.A et all 2014).

Dans littérature, plusieurs méthodes sont utilisées pour cartographier de la susceptibilité aux glissements de terrain, (Chen, W et all 2014) utilisent la méthode statistique valeur informative, la théorie de l'évidence et aussi utilisé pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain (Regmi, N.R et all. 2010 ; Lee, S. et Choi, J. 2004.), la méthode AHP est appliquée dans plusieurs partie du monde pour estimer le degré de susceptibilité (Pourghasemi, H. R et all, 2012 ; Kayastha, P et all, 2013) ainsi que la régression logistique utilisée par (Ayalew, L et Yamagishi, H. 2005 ; Ohlmacher, G. C et Davis, J. C. 2003 ; Das, I et all. 2010) pour cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Récemment, et avec le développement scientifique plusieurs chercheurs utilisant différents méthodes statistiques pour cartographie la susceptibilité aux glissements de terrain (Chen, W., et all. 2019 ; Arabameri, A et all, 2019) la comparaison des résultats permettant de choisir le meilleur model pour la région étudié.

En Algérie, quelque tentatives sont publiées récemment contient des études sur les glissements de terrain (Hallal, N et all 2019 ; Bouhadad, Y et all 2010 ; Guemache, M. A et all 2011) ainsi que la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain est spécialement dans l'Est du payé (Achour, Y et all 2017 ; Merghadi, A et all ; Hadji, R et all 2013 ; Roukh, Z. A. et Nadji, A. 2019).

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est d'identifier les zones exposées aux glissements de terrain par la cartographie algébrique de la susceptibilité au glissement de terrain de la

région d'Echorfa (Nord ouest de l'Algérie) par les méthodes statistiques et le système d'information géographique (SIG).

De ce fait notre travail se divise en quatre parties, qui sont les suivantes :

- La première partie est consacrée à l'étude bibliographique, qui est une étude théorique, sur les mouvements de terrain (leurs circonstances, leurs caractéristiques, leurs types et leurs différentes causes) ainsi quelques exemples de glissements dans le monde et en Algérie.
- La deuxième partie contient les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dont on cite l'approche directe qualitative et l'approche indirecte probabiliste qui se divise en plusieurs méthodes d'analyses de la susceptibilité.
- La troisième partie décrit les paramètres d'entrée dans l'évaluation de la susceptibilité qui représente les différentes méthodes et techniques d'inventaire des glissements de terrain et les facteurs de prédisposition environnementale.
- la dernière partie porte une méthodologie adéquate à notre recherche dont la quelle une démarche analytique est appliquée. Premièrement, une présentation de la zone d'étude contient la situation géographique de la zone, la morphologie, les caractéristiques géologique et structurale, hydrologique, climatiques et enfin les caractéristiques sismotectonique.

Ensuite, l'établissement d'une carte d'inventaire contient la position des glissements de terrain affectant la zone d'étude par différents techniques on se base sur l'outil informatique et le SIG. Le croisement de la carte d'inventaire avec les facteurs causatifs nous a permis d'établir une analyse statistique de la distribution spatiale de ce phénomène.

Huit facteurs sont jugés insuffisants pour évaluer la susceptibilité telle que, la pente, la direction de la pente, la lithologie, la densité des linéaments, les précipitations, la distance par rapport aux cours d'eau, l'occupation du sol et l'altitude.

Une évaluation de l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain est entamée par l'intégration de quatre méthodes statistiques couplées avec le SIG. Trois méthodes statistiques quantitatives bivariées dites Ratio de Fréquence (FR), la Valeur informative (IV) et la théorie de l'évidence (Weight Of Evidence -WOE) sont utilisées pour calculer la pondération de chaque classe des facteurs utilisés, ces techniques sont basées sur le croisement de l'inventaire des glissements de terrain avec les différents facteurs causatifs. Une quatrième méthode semi-quantitative dite Analytical Hierarchy Process (AHP) basée sur la prise de décision est utilisée pour estimer le poids de chaque paramètre utilisé.

La classification de l'indice global de la susceptibilité permettant d'établir quatre cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. Le croisement de ces dernières avec celle de l'inventaire de glissement de terrain nous a permis d'entamer une validation et comparaison entre les différentes méthodes utilisées.

Chapitre I

Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier peuvent mobiliser les glissements et de citer différentes informations nécessaires pour identifier le type de glissement lieu les mouvements de terrain, les différents types selon leur vitesse, volume et taille (lent et rapide) telle que (les écoulements, les coulées, le fluage et les glissements, les affaissements, et solifluxion, etc.) et selon la morphologie de leur surface de rupture et d'envisager en second lieu les principaux types et causes qui de terrain probable et son degré de danger vis-à-vis à son intensité et en dernier lieu des exemples de glissements de terrain dans le monde et en Algérie.

I.2. Définition des mouvements de terrain

Les mouvements de terrains sont des phénomènes géologiques qui évolue dans le temps qui correspond à un déplacement, plus ou moins brutal, du sol ou du sous-sol sous l'effet d'influences naturelles (agents d'érosion, pesanteur, séisme, etc.) Ou anthropiques (exploitation de matériaux, déboisement, terrassement...etc.) (Cherboul ; F. 2016).

Ce phénomène comprend diverses manifestations, lentes ou rapides, en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure géologique, plus généralement on considère trois types de mouvements :

I.2.1. Les mouvements lents continus

Résulte d'une déformation progressive des terrains, pas toujours perceptible par l'homme. Ils regroupent les affaissements, les glissements, la solifluxion, le fluage, et le fauchage.

I.2.2. Les mouvements rapides discontinus

Se propagent de manière brutale et soudaine. Ils regroupent les effondrements, les chutes de pierres et de blocs, les éboulements et les coulées boueuses. Les mouvements de terrain, qu'ils soient lents ou rapides, peuvent entraîner un remodelage des paysages. Celui-ci peut se traduire par la destruction de zones boisées, la déstabilisation de versants ou la réorganisation de cours d'eau (Alp'Géorisques ; 2004).

I.2.3. L'érosion littorale

Il existe des mouvements causé par l'érosion littorale qui se matérialisent par l'effondrement de falaises a cause de travail des vagues et des courants mari

I.3. Les différents types des mouvements de terrains

I.3.1. L'éroulement

Il s'agit de la chute soudaine des masses rocheuses importantes, Il est spectaculaire et dangereux (fig.1). Le mécanisme initial d'éroulement s'explique par le développement d'une surface de glissement inclinée et par la topographie, de même que par l'interaction marquée entre les composantes de la masse éroulée et par leur fragmentation intense. (VARNE, 1978).



Figure 01 : Eroulement d'Aokas (2015) (Hadji, R.2016).

I.3.2. La chute de blocs et Eboulement

Ce sont des mouvements rapide discontinue et brutaux résultant de l'action de la pesanteur et affectant des matériaux rigides et fracturée tels que calcaire, grès, roche cristallines ...etc (fig.02). Ces chutes sont caractérisées par une zone de départ, une zone de propagation et une zone d'panages.

Les blocs décrochés suivent généralement la ligne de la plus grande pente .les distance parcourue sont en fonction de la position de la zone de départ, la pente, la forme et le volume du vessant ([www. observatoire-risques@brgm.fr](mailto:observatoire-risques@brgm.fr)).



]

 (

 (

 €

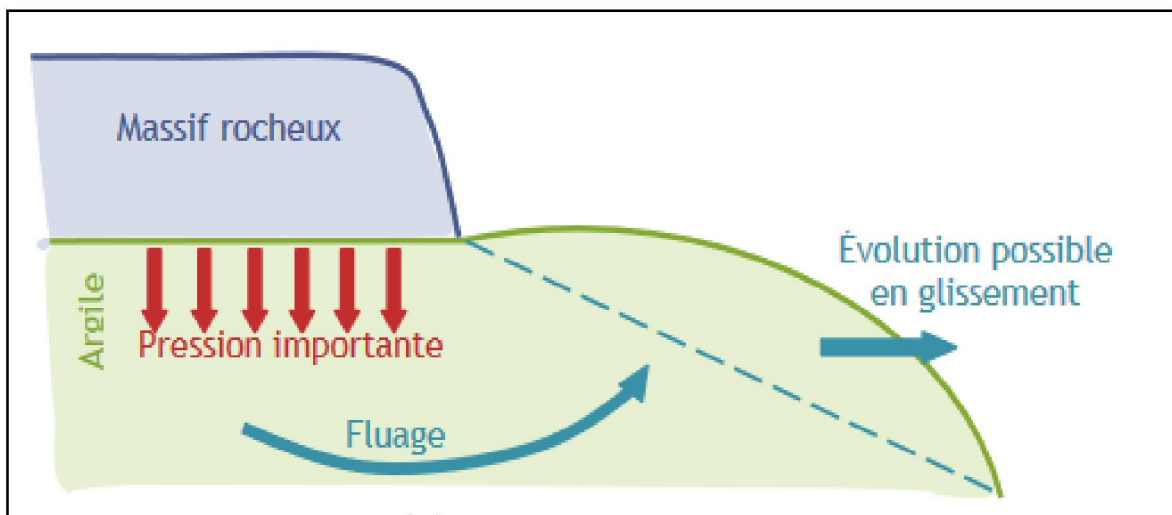


Figure 03 : Aspect de fluage (Clément DESOD et all, 2017).

I.3.4. La coulée boueuse

La coulée boueuse est due à des infiltrations d'eau (la matrice fine atteint une teneur en eau très élevée), provoquant des mouvements des sols dans lesquels les matières glissées se comportent comme un liquide. Elle se produit généralement en montagne (fig.4) (Philipponat. G et Hubert. B, 1998).

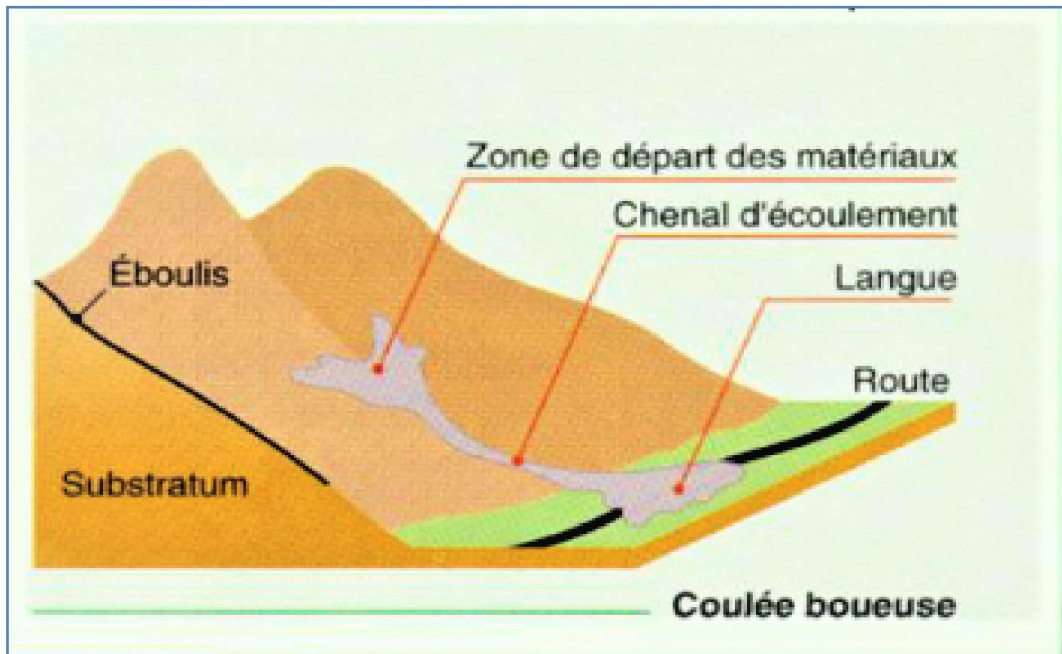


Figure 04 : coulée de boue (Gilles,SP. 1998)

I.3.5. Solifluxion

C'est un mouvement lent affectant des terrains superficiels meubles sur des pentes très faibles. La solifluxion peut s'étendre à des versants entiers. Il peut être dû à une alternance gel/dégel, au passage d'animaux et/ou à l'action des racines. Cependant, elle n'affecte que de faibles épaisseurs (DSPR, 2008).

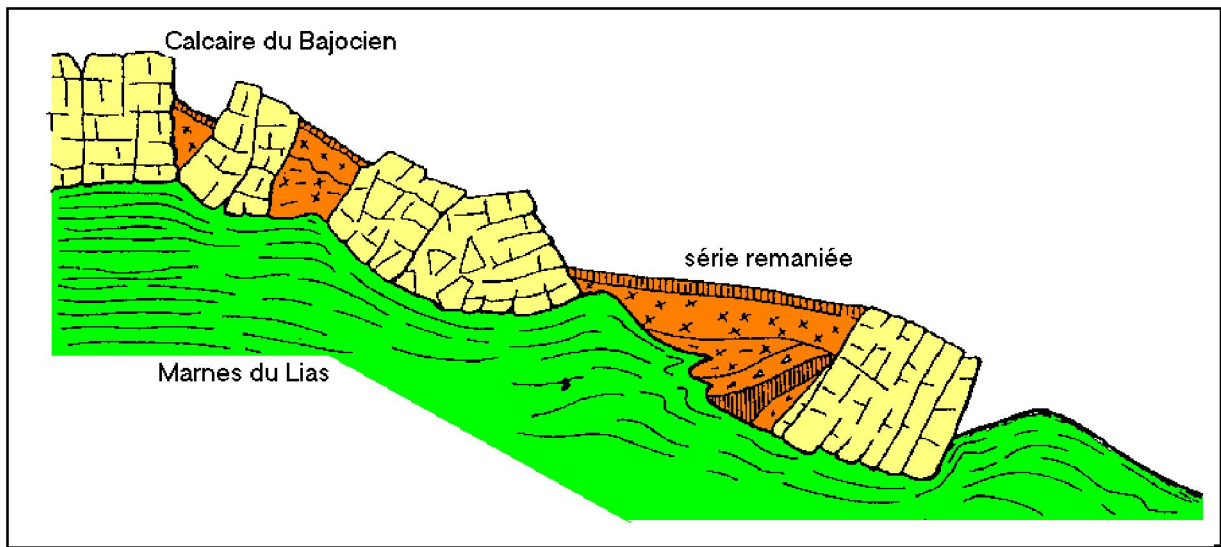


Figure 05: Phénomène de solifluxion coulée de boue (Beauchamp J. 2003)

I.3.6. Le fauchage

Il s'agit d'un processus de basculement d'une unité sur un pivot situé en dessous ou sur une unité inférieure, sous l'action de la gravité et de forces exercées par des blocs adjacents ou des pressions de fluides. C'est une déformation superficielle traduite en mouvement lent qui affecte des roches stratifiées redressées à la verticale, et entraîne un basculement vers l'aval des couches sur une épaisseur très variable. Des ruptures brutales se produisent et les matériaux se désagrègent et passent à l'état de rochers disloqués puis d'éboulis. Le phénomène de fauchage résulte suite à une action conjuguée entre une disposition structurale et une composition lithologique particulière (fig.06) (DSPR.2008).



Figure 06 : Phénomène de fauchage . (www.geologie-patrimoine-matheysine.fr)

I.3.7. Les glissements de terrain

Un glissement de terrain est un phénomène géologique ponctuel à effets limités qui regroupe l'ensemble du déplacement plus ou moins brutal du sol sur un plan de rupture incliné. (Varne, David J., 1958) sous l'action directe de la gravité, des forces extérieures (hydrauliques ou sismiques). Cependant, par leur diversité et leur fréquence, ils restent responsables de dommages importants et coûteux car ils affectent des ouvrages construits par l'homme.

Les volumes de sol mis en jeu sont très variables, ils dépendent de la profondeur de la surface de glissement, allant de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur.

Ainsi l'extension des glissements de terrain peut varier du simple glissement de talus très localisé, au mouvement de grande ampleur concernant l'ensemble d'un versant (Varne, 1996).

I.3.7.1. Morphologie générale d'un glissement de terrain

Lors de ses travaux pour l'UNESCO, Varnes en 1978 a élaboré un bloc diagramme idéal mettant en exergue les caractéristiques d'un glissement de terrain complexe. On y observe une surface de rupture très nette le long de laquelle les matériaux impliqués dans le glissement de terrain se déplacent au-dessus de matériaux que le phénomène n'affecte pas (fig.07). Le diagramme montre également que la surface de rupture s'étend sur une profondeur considérable de sorte qu'un glissement de terrain ne saurait être considéré comme un phénomène superficiel (Varne, 1978).

- **Escarpement principal** : surface inclinée ou verticale, souvent concave limitant le glissement à son extrémité supérieure et prolongée en profondeur par la surface de glissement.
- **Couronne** : zone située au dessus de l'escarpement principal souvent peu affectée par le désordre. Seules quelques fissures ou crevasses témoignant de la mise en traction des terrains dans ces zones.
- **Tête** : c'est la limite amont du glissement et plus précisément partie où le matériau glissé se trouve en contact avec l'escarpement principal.
- **Escarpement secondaire** : circulaire semblable à l'escarpement principal, mais visible dans la masse remaniée. Ces escarpements confèrent à la masse en mouvement une structure en escalier.
- **Élément** : fraction de la masse glissée entre deux escarpements.
- **Flan** : limite latérales du glissement prolongeant l'escarpement principal.
- **Pied** : correspond à l'intersection aval de la surface topographique initiale. Le pied est souvent masqué par le bourrelet.
- **Extrémité inférieure (pouce)** : zone aval du mouvement du terrain ou extrémité du bourrelet.
- **Rides transversales** : elles se forment dans le bourrelet du mouvement du terrain, témoins d'effort de compression pouvant aboutir à des chevauchements dans le matériau.
- **Surface de glissement ou de rupture** : c'est une surface qui sépare la masse glissée des terrains en place.

- **Corps** : partie centrale du glissement recouvrant la surface de rupture.
- **Fissures et crevasses** : rupture au sein du matériau se manifestant par des fentes d'importance et de formes diverses suivant leur position.

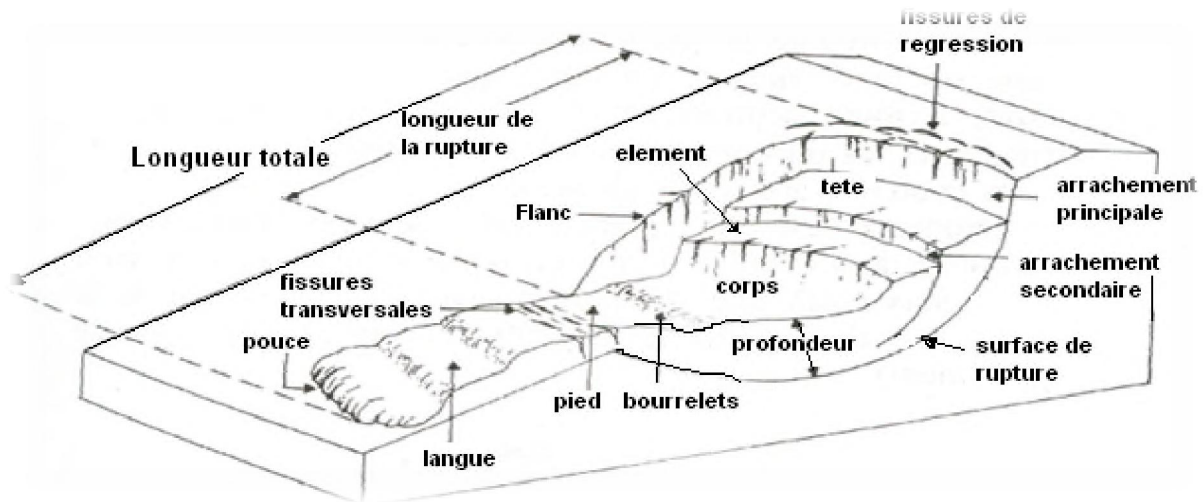


Figure 07 : Eléments descriptifs d'un glissement de terrain (Chirboul F. 2013).

I.3.7.2. Nature des matériaux géologiques concernés par le glissement

- **Le Rocher** : c'est une masse dure ou ferme qui était intacte et dans son milieu naturel avant le déclenchement du mouvement.
- **Le Sol** : il s'agit d'un agrégat de particules solides, en général des minéraux et des blocs qui ont été transportés où formés par l'altération d'un rocher sur un site. Les gaz et/ou liquides occupant les pores et espaces interstitiels du sol font partie du sol.
- **La Terre** : elle décrit le matériau dont 80% ou plus des particules qui composent sa structure ont une taille inférieure à 2 mm, valeur maximale atteinte par les grains de sable.
- **Les Débris** : ils contiennent une proportion importante de matériaux grossier ; 20% à 80% des particules ont une taille qui dépasse les 2 mm, les particules restantes sont plus petites que 2 mm (Chiroual F .2013).

I.3.7.3. Classification de glissement

Les glissements de terrain se différencient par leur vitesse et par leur profondeur estimée de la surface de glissement :

a. Profondeur de glissement : Le tableau suivant présente les différentes valeurs de Classification selon la profondeur de la surface de glissement (Cherboul F.2016).

Tableau 1 : Classification d'après la profondeur de la surface de glissement (Benouis Dj. 2010).

Glissement	Surface de glissement
Superficiel	0-02
semi-profond	02-10
Profond	>10

b. Vitesse moyenne de glissement de terrain : Le tableau suivant présente les classifications selon l'activité en fonction de l'évaluation de la vitesse moyenne de glissement à long terme.

Tableau 2 : Classification selon l'activité (en fonction de la vitesse moyenne de glissement) (Benouis, Dj. 2010).

Glissement	surface de glissement
sub -stabilisé, très lent	0-2 cm/an
peu actif, lent	2-10 cm/an
actif (ou lent avec phases raoides	>10 cm/an

I.3.7.4. Les type de glissements de terrain

Selon la géométrie de la surface de glissement on distingue :

a . Le glissement planaire (translatif)

Où le mouvement est une translation du massif sur un plan incliné, plus au moins régulier. En général la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau (couche savon) (fig.08).

Les joints (couches minces) argileux sont particulièrement favorables aux déclenchements de glissements plans lorsque les terrains qui les surmontent sont perméables (Bendadouche. H, Lazizi. S, 2013).

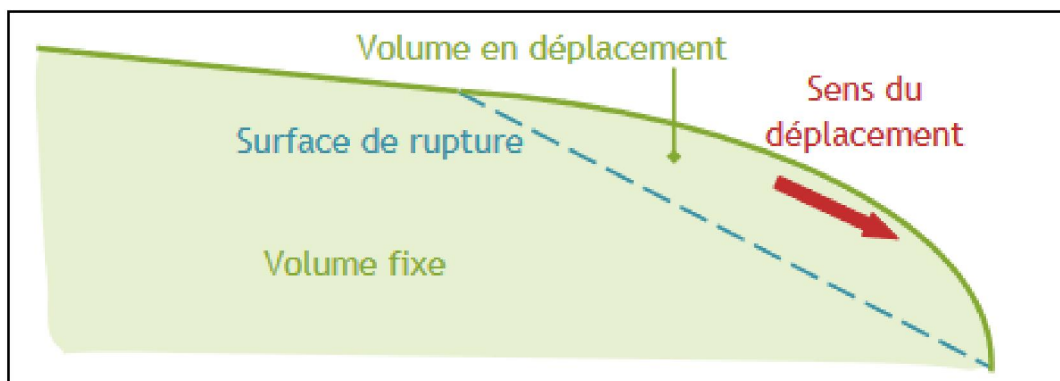


Figure 08 : schema d'un glissement planaire (Clément DESOD et all, 2017).

b. Le glissement rotationnel simple

La surface de rupture à une forme simple et peut-être assimilée à un cylindre dans la plupart des cas (fig.09).

Selon la figure 09 le glissement rotationnel comprend :

- En tête des fissures de traction,
- Un escarpement correspondant au départ de la surface de glissement.
- À la base, un bourrelet formé par des matières glissées (Bali Omar et All. 2018).

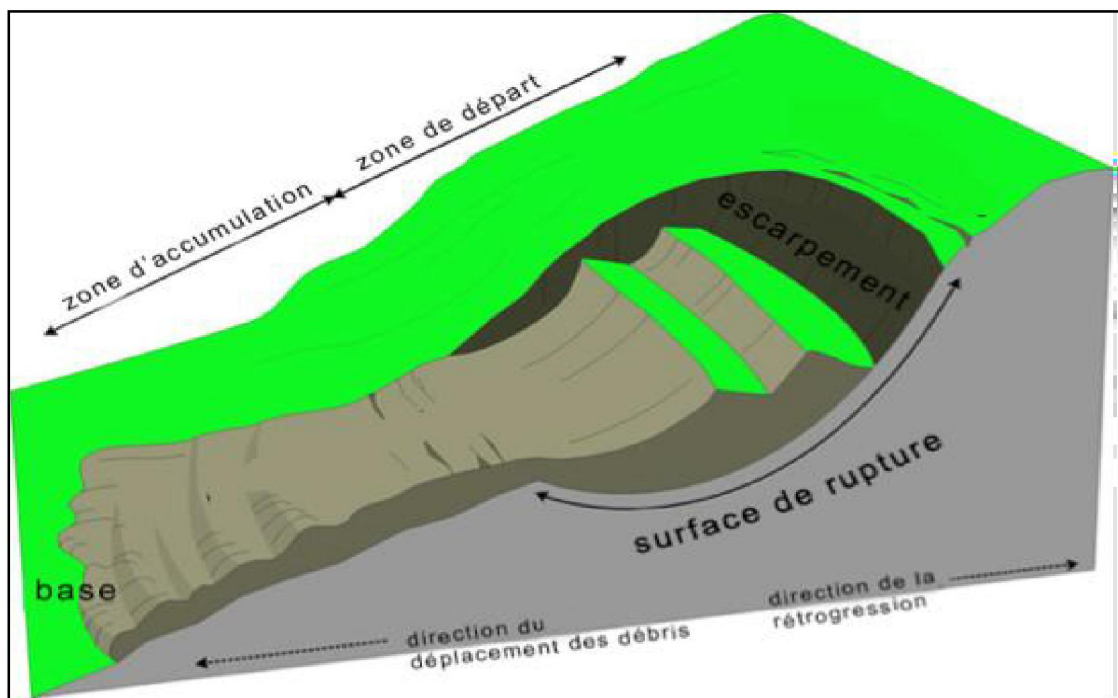
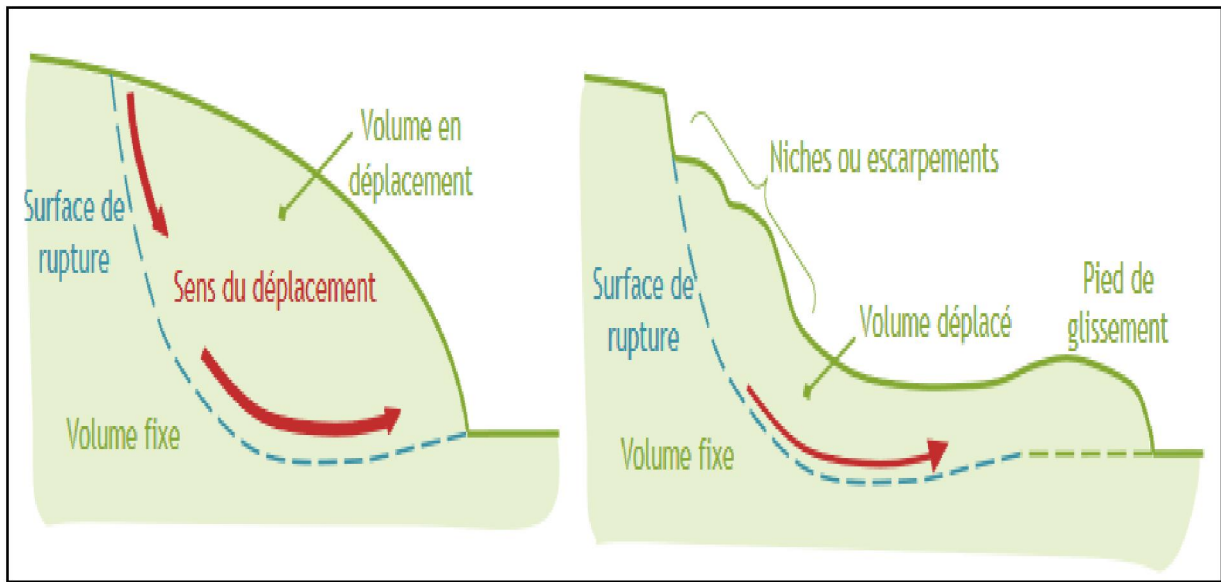


Figure 09 : (b) Le glissement rotationnel simple (Smahi. A, 2015).

c. Le glissement rotationnel complexe

C'est un glissement multiple (emboîté), l'apparition du premier glissement en bas de la pente conduit à une perte de butée pour les terres situées au-dessus, et ainsi provoquer les glissements successifs remontant vers l'amont (fig. 10).



Figure 10: Le glissement rotationnel complexe a): Mécanisme d'un glissement Rotationnel b) : Exemple d'un glissement rotationnel multiple en bordure de la rivière Chicoutimi. Complexé (Bali O. et all, 2018).

I.3.7.5. Causes des glissements de terrain

Au cœur du processus de formation d'un mouvement de terrain, le passage de l'état de stabilité de la masse de sol à l'état d'instabilité relève de causes nombreuses et variées. Certaines causes sont externes, comme par exemple l'érosion d'un bas de pente par la mer ou par une rivière, par les secousses d'un tremblement de terre, par la surcharge d'une construction, etc. D'autres causes sont considérées comme internes, telles que l'augmentation de la pression interstitielle après de fortes pluies, l'accumulation d'eaux usées rejetées dans le sol, le développement de l'altération de la roche...etc. (Slimi., A. 2008).

Les principaux facteurs qui son à l'origine du mouvement et de son évolution sont les suivants :

➤ **Les facteurs permanents**

- La morphologie et La nature lithologique ;
- La pente et le dénivelé ;
- La couverture végétale.

➤ **Les facteurs dynamiques et déclenchant**

- Le climat ;

-L'action anthropique ;

-Le séisme.

a. Les facteurs permanents

a.1 La géologie et géomorphologie :

La lithologie constitue le matériau original du sol et présente une sensibilité à l'altération différenciée selon sa composition minéralogique, sa structure primaire (schistosité, stratification, taille des grains, etc.) et secondaire (fissuration par des diaclases ou des failles). La lithologie peut avoir des conséquences hydrologiques importantes, notamment la relation pluie-débit et l'évolution des écoulements en période de crue (El Mimouni A. et Al 2005).

a.2. La pente :

Elle est le résultat d'une longue histoire morphologique, sa connaissance est nécessaire pour comprendre le sens de la dynamique actuelle. Le rôle de la pente dans la genèse des mouvements de terrains s'associe avec d'autres facteurs tels que la nature lithologique, la structure et la présence d'eau. La raideur de cette pente joue donc un rôle capital dans la distribution géographique des mouvements de terrains. La topographie exerce une influence très grande sur l'intensité des ruissellements et de l'érosion (Slimi. A. 2008).

a.3. La couverture végétale

D'un côté les racines des arbres peuvent contribuer à la stabilité des pentes par l'absorption d'une part de l'eau souterraine, d'un autre côté les racines ont une énorme force d'écartement qui provoque un élargissement des fissures (Slimi. A. 2008).

b. Les facteurs dynamiques et de déclenchement

b.1. Le climat :

Les mouvements de terrain sont intimement liés à une pluviométrie particulièrement importante. Il est difficile de connaître avec précision le seuil pluviométrique à partir duquel les risques de mouvements sont les plus grands. Une averse brutale de forte intensité mais de durée réduite, exerce le plus souvent un effet érosif par ruissellement, alors qu'une averse de plus longue durée sur un horizon superficiel moyennement perméable provoque un fluage de couches superficielles. Ces mouvements sont déclenchés fréquemment, notamment par des surplus de la pluviométrie. Le facteur climat est souvent assimilé aux variations de la température, le vent, l'eau de surface et souterraines, la pluie, la neige...etc.

b.2. L'action anthropique : L'homme, par ses nombreuses interventions lors de travaux d'aménagement, intervient surtout dans la modification morphologique des massifs rocheux et des conditions hydrauliques initiales. L'action anthropique peut être distinguée :

- Par l'activité humaine : surexploitation ;
- Par l'urbanisation.

b.3. Le séisme : Les séismes sont souvent à l'origine du déclenchement des glissements de terrains. Ils peuvent intervenir en modifiant temporairement le champ gravitaire appliqué au versant. Les vibrations entraînent l'apparition d'une force proportionnelle en module du poids du volume du sol considéré et dont la direction varie selon le type de vibration. (Bali, O. 2018).

I.3.7. 6. Exemples réels des glissements des terrains en Algérie

Le problème des glissements de terrain est couramment rencontré en Algérie, et ce, depuis fort longtemps. On rappelle :

➤ Glissement des abattoirs Ténès (Chlef)

Le glissement des abattoirs Ténès, se trouvant sur un talus de 10 m environ de hauteur (fig. 11). Ce glissement a été provoqué dans les années 80 sous l'effet des infiltrations souterraines ayant fait déplacer la masse de remblai composée d'alluvions récentes (Charboul.F 2016).

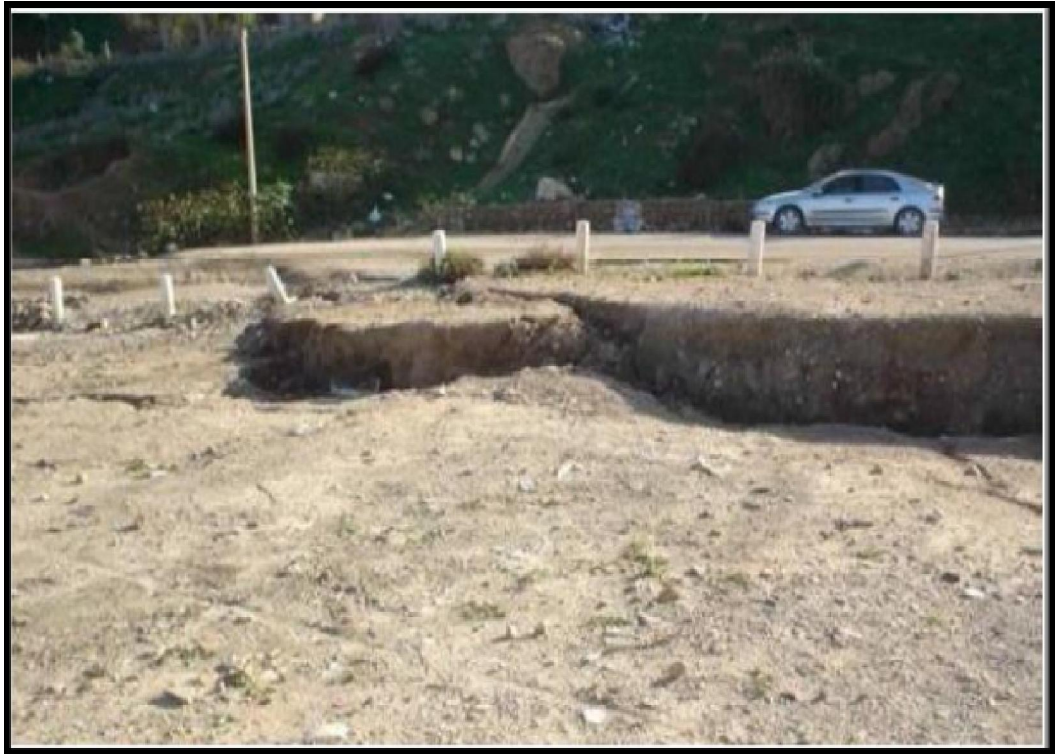


Figure11: Le glissement de la route des abattoirs. (Benuis Dj. 2010).

L'étude a été réalisée par la DTP (Antenne de Chlef), où une solution a été dégagée consistant à recharger le pied du talus tout en proposant des murs de soutènement reposant sur des pieux ancrés à plus de 25 m de profondeur, mais cette solution n'a pas été réalisée.

Par conséquent, de graves préjudices ont été observés sur le terrain, dont la partie se trouvant en haut du talus a été complètement déplacée et touchant même les fondations des bâtiments se trouvant à côté de l'emprise (Bouguerra. A 2014).

➤ **Le glissement de Constantine**

Le premier glissement de terrain à Constantine remonte à l'année 1972. Les glissements affectent plusieurs quartiers de la ville (Belouizdad, l'avenue Kitouni, Kaidi Abdellah, Bellevue, CILOC, Boussouf, Zaouch, Boudraa Salah, Benchergui, Bardo, Place Krikri, chemin forestier, le pont de Sidi Rached et même l'université Mentouri), soit 120 ha de sa superficie, et menacent près de 15 000 habitations abritant une population estimée à 100 000 habitants. Ces glissements ont des causes aussi bien anthropiques que physiques. L'urbanisation parfois anarchique sur les versants à la limite de la stabilité, les spécificités du sol, les pertes hydriques dues essentiellement à la vétusté du réseau d'alimentation en eau potable est à l'origine du phénomène (Bali .O et All 2018).

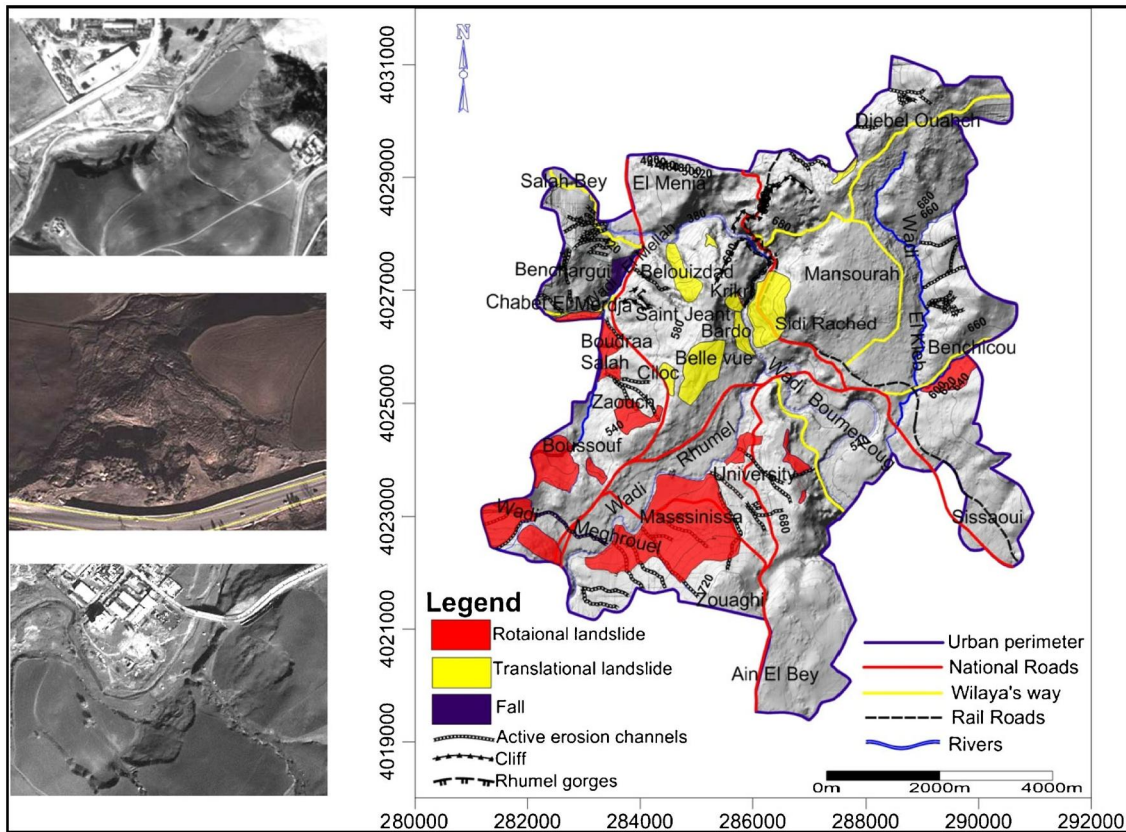


Figure 12 : Principaux sites de glissements de terrain à Constantine Ville (Bourenane et al 2016).

➤ **Le glissement de Bejaia**

Comme le montre la figure (13), le terrain concerné par le glissement de terrain présente une forte pente supérieure à 60° et qui est sujette à un glissement certain, compte tenu de la forte pluviométrie affectant la région de Bejaia.

Il a concerné une route avec un profil mixte déblai-remblai dans une zone montagneuse. La zone s'étend sur une longueur de 80m. Les investigations géotechniques ont mis en évidence depuis la surface, des éboulis gréseux, des bancs gréseux et des alternances de marnes schisteuses et degrés. (Bali, O. et All).



Figure 13 : Route affecté par le glissement (adekar).

I.3.7.7. Exemples réels des glissements des terrains dans le monde

- 1943, France, par une pluie abondante, un énorme glissement de terrain provenant du lieu-dit Vallonet, emportant au passage de nombreuses maisons, a bloqué l'écoulement du Brevon, donnant ainsi naissance au lac en même temps qu'il engloutissait des habitations, dont les ruines sont visibles en s'approchant du lac.
- Le 4 mai 1971, le village de Saint-Jean-Vianney au Québec est emporté dans la boue de la rivière Saguenay.
- 5 mai 1998, Italie : une coulée de boue due à de fortes pluies tue 137 personnes à Sarno dans le sud du pays.
- 15 décembre 1999, Venezuela : tragédie de Vargas, des pluies torrentielles provoquent des glissements de terrains dans les favelas de la banlieue de Caracas avec un lourd bilan d'au moins 15.000 morts.
- 17 février 2006, Philippines : Une coulée de boue traverse un village dans l'est du Pays faisant 1106 morts.
- 6 septembre 2008 : Égypte : Un gigantesque glissement de terrain dans une bidon ville à l'est du Caire fait 69 morts.

➤ **Glissement de la Clapière dans les Alpes maritimes en France**

Le glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France) particulièrement surveillé depuis 1970, par le centre d'études techniques de l'Équipement (CETE) d'Aix-en-Provence, atteint une hauteur de plus de 650 mètres faisant de lui le plus grand glissement actif d'Europe (Fig. 14)

L'écoulement, amorcé depuis quelques années est dû à une masse instable de l'ordre de 50 millions de m³, qui glisse de 1 à 10 m par an. Spectaculaire et très connu dans la région, ce glissement est susceptible de barrer la vallée de la Tinée provoquant alors l'inondation en amont de la ville de Saint-Étienne-de-Tinée et éventuellement la destruction des villages avoisinants.

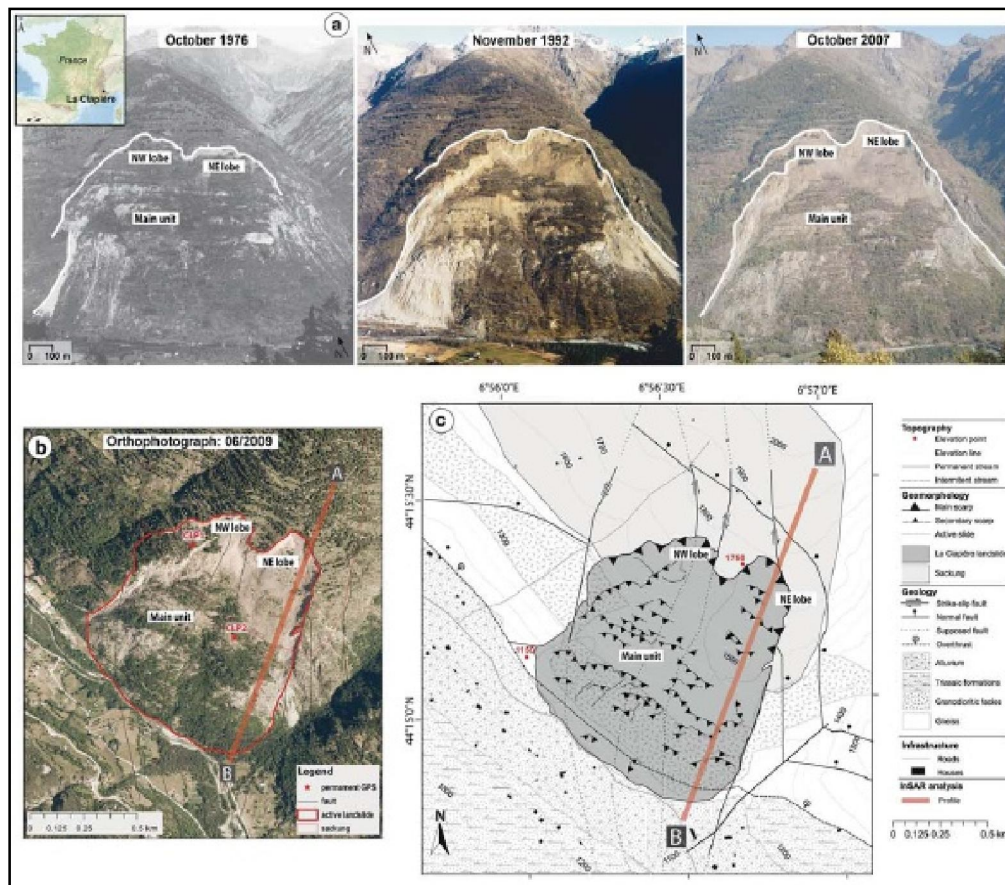


Figure 14 : Le glissement de La Clapière dans les Alpes-Maritimes en France. (Schlögel, ET ALL 1018).

➤ **Glissement Au sud du Mexique**

Un glissement a provoqué la disparition de 145 personnes et a enseveli plus de 300 maisons Le mardi 28-09-2010 dans le sud-est du Mexique. Les habitations touchées ont été recouvertes par la boue et les pierres qui se sont précipitées à l'aube sur la localité de Santa

Maria Tlahuitoltepec. Un pan de colline s'est effondré, sur une largeur de 200 mètres, a déclaré à la télévision le gouverneur de l'état d'Oaxaca, Ulises Ruiz (Fig. 15).



Figure 15 : glissement de terrain d'Oaxaca, Ulises Ruiz (Sediki. A ,2008).

➤ **Glissements de La Leona et de Las Collinas au Salvador**

A la suite d'un tremblement de terre de magnitude 7.6 à l'échelle Richter survenu en 2001 au large des côtes du Salvador, deux glissements de terrain se sont produits : le glissement de La Leona près de San Vicente et le glissement de Las Collinas (Fig. 16). (Boudreau, 2005)



Figure 16 : Morphologie de la zone de glissement de Villatina Medellín en Colombie (Jean-Michel Jaquet, SIG Genève, 1994) (Ahmed, S . 2008).

Conclusion

Dans cette partie une recherche bibliographique a été entamé portant une description détaillée de différent type de mouvements de terrain ainsi leurs mécanismes et ces causes naturelles et/ou anthropiques.

Quelques exemples sont décrits dans ce chapitre, montre que les glissements de terrain présentes l'un des aléas naturelles le plus répandue dans le monde, ils provoquent annuellement des dégâts humains et matérielles importante.

Dans la littérature, quelques études montrent que plusieurs zones du nord Algérien sujettes aux différents types de mouvements de terrain. Ces études restent toujours insuffisantes par rapport à la superficie et le développement important de cette partie du payé.

En effet, il est nécessaire d'établir des documents portant la cartographie des zones susceptibles aux phénomènes des mouvements de terrain avant tous projets, surtout en zones montagneuses.

Chapitre II

II.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les méthodes de la cartographie les plus pertinentes permettant de réduire les incertitudes liées aux données, aux différentes approches.

Le risque se définit par le nombre potentiel de personnes tuées ou blessées, les dégâts aux propriétés et les perturbations potentielles aux activités économiques en raison de l'occurrence d'un phénomène destructeur particulier pour un secteur donné et une période de référence. (Varnes 1978).

La cartographie du risque glissements de terrain, nécessite l'évaluation du niveau de l'aléa et d'enjeux humains ou la vulnérabilité des éléments exposés.

Malgré de nombreuses recherches, l'évaluation du risque "glissement de terrain" souffre d'un manque d'études sur la vulnérabilité qui correspond au niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux qui sont les éléments exposés (Glade .2003) rassemblent tous les éléments anthropiques qui peuvent être touchés par l'aléa: la population, les bâtiments et ouvrages d'art, les activités économiques, services et infrastructures ainsi que le patrimoine environnemental et culturel présents à un moment donné sur la zone potentiellement affectée par l'aléa (Si-Ali Bakhta 2012) qui est définie par une intensité, une probabilité dépend de facteurs de prédisposition et de facteurs déclenchant. D'occurrence spatiale et temporelle qui Pour évaluer cet aléa nécessite au préalable d'apprécier la susceptibilité des terrains à un type de glissement, c'est à dire la possibilité qu'un glissement se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Cela revient à répondre à trois questions : quel type de glissement de terrain est susceptible de se produire ? Quels sont les facteurs de prédisposition ? Où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

Plusieurs approches d'évaluation de la susceptibilité des versants, fondées sur l'outil SIG dont on cite trois approches principales une approche directe (ou qualitative) ou une approche indirecte (fondée sur des modèles spatiaux statistiques) et un troisième approche déterministes ou (physiques) (Thierry M.Y. ; 2007).

II.2. Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

II.2.1. L'approche directe (qualitative)

L'approche la plus classique, il se base sur les informations qui sont collectées sur le terrain avec l'aide de topographie aériennes et a travers des documents existants (cartes topographique, cartes géomorphologique, cartes géologique...). (Van Weston, 2000). Ce type d'analyse peut donner des résultats très différents selon l'expert. Trois méthodes sont détaillées ci-après : la cartographie d'inventaire et ses dérivées, la méthode géomorphologique et la méthode par combinaison de cartes d'index. (Thierry M.Y.,; 2007).

II.2.1.1. cartographie d'inventaire

Elle est considérée comme la base indispensable pour toute évaluation à l'échelle du bassin versant elle est rapide à mettre en œuvre, nécessite un relevé de terrain, une photo-interprétation, le recueil et l'analyse de documents historiques ainsi que des témoignages fournissant des informations sur le type, l'occurrence et/ou l'activité des phénomènes.

A titre d'exemple, les cartes d'activité dérivées de cet inventaire sont une première source d'information sur les secteurs soumis à rupture. La figure présente un exemple de cette cartographie. On distingue deux zones avec : la zone de glissement actif (Z1), considérée comme la plus dangereuse, et une zone autour du phénomène (Z2), considérée comme une extension possible du phénomène. La zone Z2 est accompagnée d'une interdiction de construction (fig. 17) (Thierry M.Y.,; 2007).

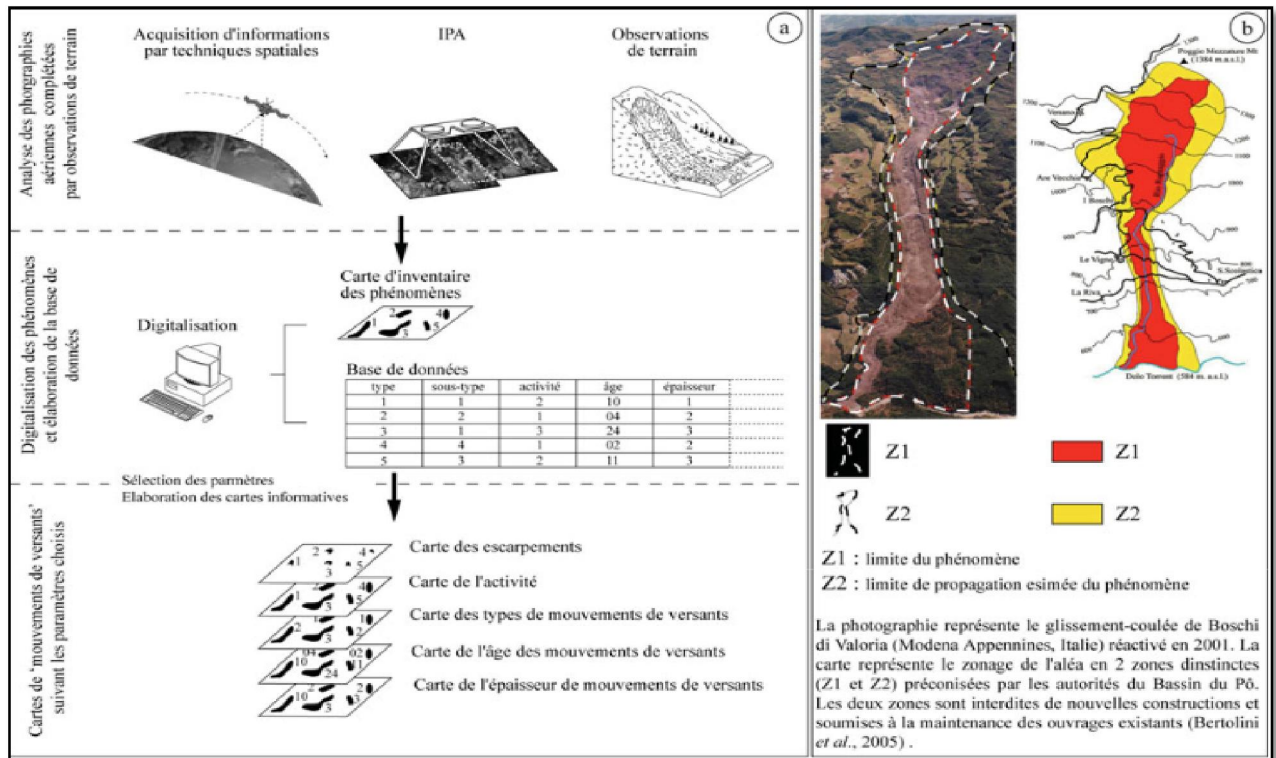


Figure 17 : Cartographie d'inventaire des mouvements de versant (Thierry M.Y., ; 2007).

II.2.1.2. L'analyse géomorphologique

C'est la méthode de cartographie directe ou dite 'experte'. (Soeters et van Westen, 1996 ; Cardinali et al. 2002 ; Hervàs et al. 2002 ; van Westen et al. 2000, 2003). L'aléa est directement défini par le géomorphologue sur le terrain par une analyse simple fondée sur son expérience et qui par analogie, avec des environnements similaires, caractérise les secteurs en zone d'aléa fort, moyen, faible ou nul. L'analyse géomorphologique fournit donc une évaluation rapide de l'aléa pour un secteur donné en tenant compte d'un très grand nombre de facteurs. Les cartes fournissent toutes les informations nécessaires pour définir les conditions de stabilité ou d'instabilité d'une aire donnée. (Thierry M.Y., ; 2007).

II.2.1.3. Méthode par combinaison de carte d'index

Cette méthode, se base sur la cartographie des facteurs que l'expert considère comme étant les plus influents pour la stabilité des versants. La méthode de combinaison qualitative indexée, dans laquelle le scientifique hiérarchise chaque classe de facteurs de prédisposition suivant sa connaissance avant de les pondérer et de les combiner (Wachal et Hudak, 2000). Chaque carte est additionnée afin d'obtenir un document avec des valeurs 'brutes' qui sont ensuite regroupées pour obtenir des classes homogènes d'aléa (fig. 18) (Thierry M.Y., ; 2007).

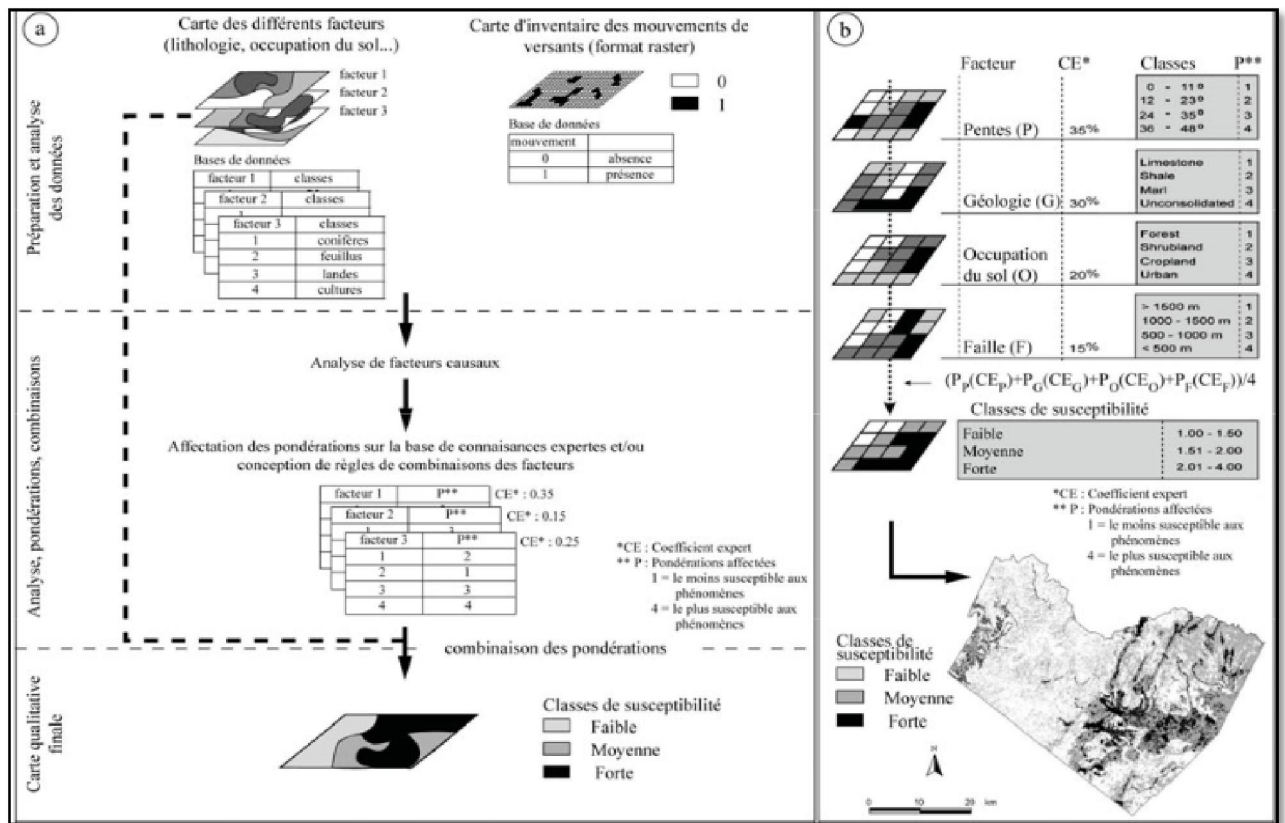


Figure 18 : Cartographie qualitative indexée (Thierry M.Y. ; 2007).

L'approche qualitative indexée a été remplacée peu à peu par les approches Statistiques, plus objectives ou par des techniques tenant compte de l'incertitude des pondérations en utilisant, par exemple, des règles de combinaisons fondées sur la théorie des Logiques floues (Thierry M.Y. ; 2007).

II.2.2. L'approche indirecte (probabiliste)

L'approche indirecte est la plus utilisée dans l'évaluation de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. En effet, ce type d'approche, qui évite l'avis subjectif de l'expert, permet d'obtenir à court terme des cartes fiables et réalistes. Plusieurs techniques d'analyse peuvent être appliquées (bi variées, multi variées (Thierry M.Y. ; 2007). Il est fondé sur des règles de calculs statistiques et sur le concept d'unités homogènes. (Carrara . A et al. 1997 ;). Ces méthodes permettent de limiter le problème associé à la subjectivité de l'expert. (Soeters et Van Westen, 1996) Le principe consiste à définir des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition et l'occurrence spatiale de glissements de terrain afin d'évaluer quantitativement la probabilité de rupture pour des régions non affectées par des glissements de terrain. Utiliser ces méthodes suppose trois hypothèses :

- les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé,
- l'ensemble des facteurs de prédisposition sont connus a priori et introduits dans l'analyse,
- l'ensemble des glissements de terrain sont inventoriés sur l'aire d'étude. (Maquaire O. et al ; 2003)

Les méthodes d'analyses peuvent être bivariées ou multi variées. Pour obtenir de bons résultats (Carrara et al. 1997) ça nécessitent un nombre exhaustif de variables prédictives, ce qui implique des efforts démesurés de collecte de données. L'avantage des procédures bi variées réside alors dans la détermination d'une combinaison optimale de variables indépendantes. Parmi les analyses bivariées, deux méthodes déjà testées sur des sites d'études (Thiery et al ; 2004) :

II.2.2.1. L'analyse bivariée

a. Théorie de l'évidence

La procédure statistique bivariée utilisée dans cette étude est connue sous le nom de méthode d'indice statistique, cette approche est basée sur les relations observées entre chaque facteur prédisposant et la distribution des glissements de terrain (Bourenane H et al; 2014) Où chaque classe de facteurs de prédisposition est combinée avec une carte d'inventaire des glissements de terrain, puis pondérée par la densité de glissements de terrain dans la région considérée. Les probabilités pour chaque classe de facteurs sont additionnées une à une. Le calcul final attribue plusieurs probabilités par combinaison de classes. L'analyse bivariée par la théorie de l'évidence est statistiquement la technique la plus robuste (Thiery et al ; 2004).

➤ Principes de l'analyse spatiale bivariée par la théorie de l'évidence

L'analyse spatiale bivariée par la théorie de l'évidence, déjà appliquée en médecine et en géologie, (Bonham-Carter, 1994) est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité a priori et de probabilité a posteriori. La probabilité a priori, qui est la probabilité qu'une unité de terrain (un pixel) contienne une variable dépendante (Vd, dans notre cas les glissements de terrain), est calculée suivant la densité sur la zone d'étude.

La probabilité a posteriori est estimée après le calcul de la probabilité a priori selon la densité de Vd pour chaque variable considérée comme prédictive (Vp, dans notre cas chaque facteur de prédisposition). La méthode est fondée sur le calcul d'un poids positif (W+ ; [1]) et d'un poids négatif (W- ; [2]), dont les valeurs dépendent de l'association entre Vp et Vd. (Thiery et al ; 2004).

$$W+ = \ln \frac{P\left(\frac{B}{Vd}\right)}{P\left(\frac{B}{-Vd}\right)} \quad [1]$$

$$W- = \ln \frac{-P\left(\frac{B}{Vd}\right)}{-P\left(\frac{B}{-Vd}\right)} \quad [2]$$

Dans les équations [1] et [2], B est la classe de Vp et le symbole « _ » représente l'absence de Vp et/ou de Vd. Le ratio représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène. Les pondérations sont additionnées en utilisant le logarithme naturel des ratios appelé logit. Les calculs des valeurs de W+ et de W- pour toutes les Vp permettent de calculer la probabilité a posteriori, qui actualise la probabilité a priori. Lorsque plusieurs Vp sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de Vd (Thiery et al ; 2004).

b. L'analyse bivariée par régression logistique

Le modèle logistique binaire, en tant que modèle de régression non linéaire, est un cas particulier d'un modèle linéaire généralisé (Schumacher et al. 1996). La régression logistique a pour objectif de trouver le meilleur modèle pour décrire la relation entre une variable dépendante et de multiples variables indépendantes. L'avantage de la régression logistique est que, grâce à l'ajout d'une fonction de lien appropriée au modèle de régression linéaire habituel, les variables peuvent être continues ou discrètes, ou n'importe quelle combinaison des deux types et qu'elles n'ont pas nécessairement une distribution normale. L'algorithme de régression logistique applique l'estimation du maximum de vraisemblance après transformation de la variable dépendante en une variable logique représentant la valeur naturelle. (Pourghasemi H. R et al., 2013) L'analyse bivariée par régression logistique est plus souple à mettre en œuvre car elle ne suppose pas une hypothèse d'indépendance conditionnelle, ce qui peut réduire considérablement le temps d'analyse en amont (Thiery et al ; 2004).

➤ Principes de l'analyse spatiale par régression logistique

C'est un modèle non-linéaire, fondée sur une fonction de répartition sigmoïdale entre la probabilité de présence d'un glissement de terrain (Vd) et différents facteurs de prédisposition. Le modèle logistique pour la présence ou l'absence de glissements de terrain est défini par :

$$\text{Pr (Vd)} = \frac{1}{1+e^{-z}} \quad [3]$$

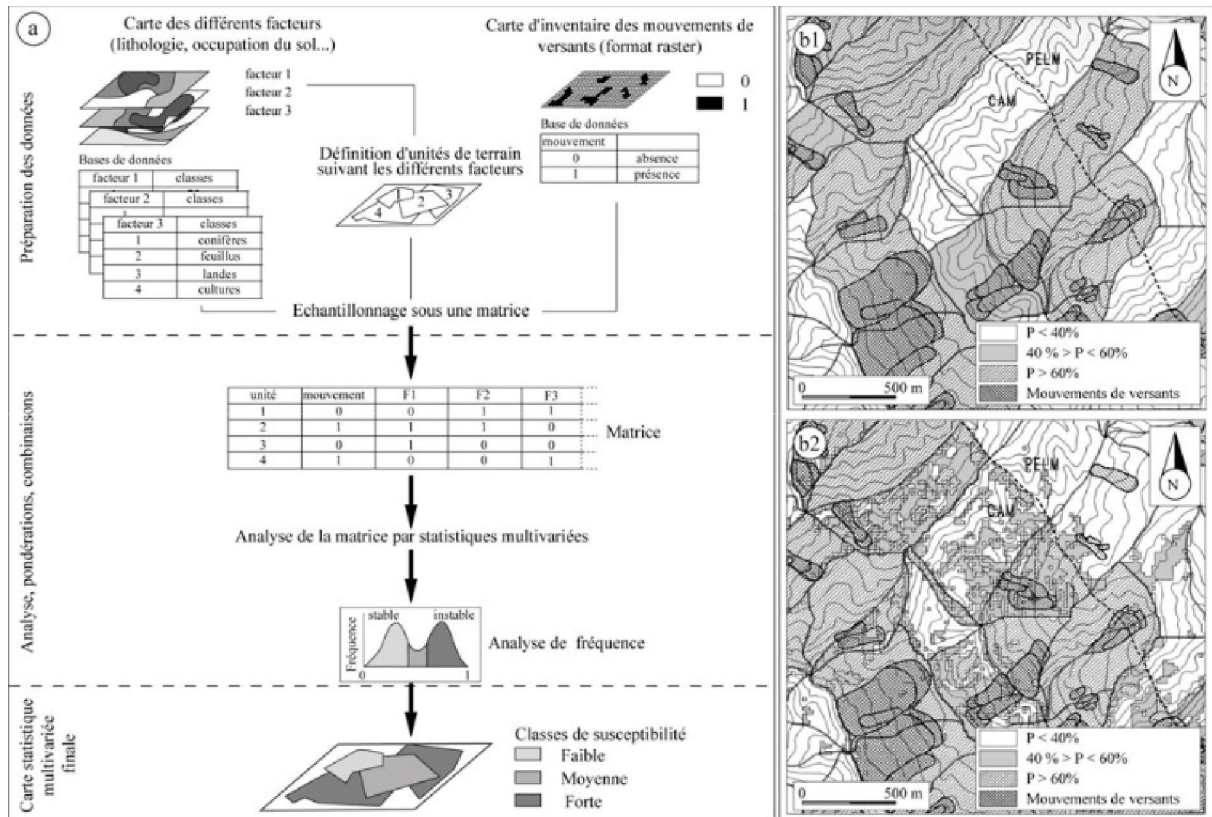
Où Pr (Vd) est la probabilité que la variable dépendante soit présente et Z est une combinaison linéaire de Vp. Comme Z varie de $-\infty$ à $+\infty$, le codage de la probabilité varie de 1 à 0, et la probabilité de présence de Vd correspond à son espérance conditionnelle. Comme pour l'analyse bivariée par théorie de l'évidence, lorsque plusieurs Vp sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de Vd (Thiery et al ; 2004).

II.2.2.2. Méthode multivariée

Une analyse statistique multivariée permet l'emploi de plusieurs variables. L'analyse statistique qui s'ensuit se fait via une analyse discriminante ou une analyse régressive multiple. La première s'emploie dans le cas de variables discontinues et la seconde pour des variables nominales ou continues. Le concept de calcul est différent des techniques bivariées : les statistiques multivariées analysent la contribution relative de chaque facteur à l'occurrence des mouvements de versant à l'intérieur d'unités de terrain homogènes. Les calculs sont fondés sur la présence ou l'absence de phénomènes pour chaque unité de terrain. (Van Westen, 2001). Plusieurs techniques ont été utilisées, les plus communes étant les techniques discriminantes et les techniques de régressions multiples. Ces techniques requièrent un large nombre de facteurs pour obtenir des résultats cohérents. Cinq étapes communes sont définies pour les méthodes multivariées (fig. 18).

- 1) **Détermination des facteurs** pour l'analyse et recodification des données alphanumériques en données numériques (comme la lithologie les formations superficielles, etc...
- 2) **Combinaison via le SIG des unités homogènes** avec l'inventaire des phénomènes et la division des unités obtenues en surface stable ou instable.
- 3) **Exportation de la matrice vers un logiciel de traitement statistique** et obtention des coefficients ;

- 4) **Importation des résultats** pour chaque unité de terrain homogène dans le *SIG* et recodification.
- 5) **Analyse des fréquences des coefficients** et classification de la carte finale représentant les unités homogènes en classes d'aléa.



II.2.3. L'approche déterministe ou physique

Pour obtenir une information sur la stabilité réelle des versants, il est nécessaire de calculer la probabilité à la rupture par un coefficient de sécurité FS se définissant ainsi : Le coefficient de sécurité est un indicateur de la stabilité mécanique d'un versant, défini comme le facteur par lequel les paramètres de résistance au cisaillement peuvent être réduits afin d'amener la pente dans un état d'équilibre limite ». Ce facteur définit la stabilité d'une pente selon des conditions requises : il est fonction des forces résistantes et des forces motrices. Le zonage déterministe nécessite des données supplémentaires comme :

- ✓ Les caractéristiques géométriques et structurales des phénomènes.

- ✓ Les caractéristiques géotechniques des formations (poids spécifique, cohésion, angle de frottement interne)
- ✓ Les précipitations.
- ✓ La teneur en eau des formations.
- ✓ Le niveau de nappe phréatique et les pressions interstitielles (Thiery et al ; 2004).

Ces données sont acquises généralement à l'échelle du phénomène ou du versant par instrumentation (sondages, piézomètres, essais en laboratoire etc.). Jusqu'à présent, il était difficile de transposer les résultats du site à un bassin versant entier. Depuis quelques années, grâce notamment au développement des SIG, il est possible, en prenant quelques précautions, de générer de véritables cartes d'aléas sur de petits bassins-versants.

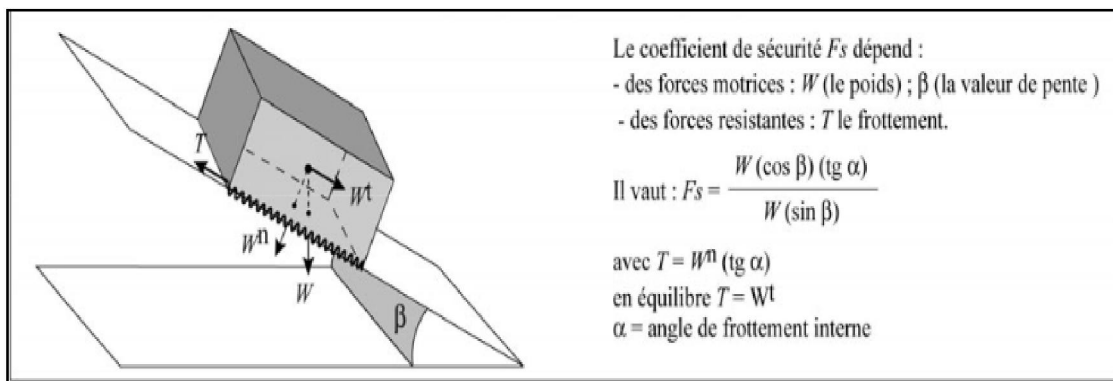


Figure 20 : Schématisation du calcul du coefficient de sécurité pour un bloc rocheux (Thiery et al ; 2004).

Conclusion

Plusieurs méthodes de cartographie alternative existent, permettant d'obtenir des résultats performants et terme de qualité de zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain.

L'application de ces méthodes requièrent une longue procédure ainsi des données telles que l'inventaire des glissements de terrain et les facteurs de prédisposition

L'utilisation du Système d'information géographique (SIG) et les méthodes statistiques permettant d'aboutir une analyse de la distribution spatiale des phénomènes étudiés, leur densité et la pondération de chaque facteur.

La validation des résultats permet de sélectionner le modèle le plus adapté pour chaque zone d'étude.

Chapitre III

III.1. Introduction

Les glissements de terrain apparaissent lorsque les sols ou des roches se déplacent, fragilisés par les activités humaines ou par des phénomènes naturels qu'ils soient climatiques, géologiques ou encore géomorphologiques. Ils représentent une menace sérieuse pour les vies et les activités humaines,

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différentes méthodes et techniques d'inventaire des glissements de terrain et en deuxième lieu les facteurs de prédispositions, la Collecte et l'inventaire des données sur l'occurrence et l'activité des mouvements de terrain sur de grandes zones constitue un point crucial pour la gestion des risques liés aux mouvements de terrain (Hervas, 2003).

Les mouvements de terrain sont particulièrement difficile à localiser, présents en grand nombre, sur de larges étendues et souvent situés dans des endroits difficiles d'accès.

L'inventaire des glissements de terrain basé sur de différents critères morphologiques (forme de la niche d'arrachement, trace de coulée, déplacement superficiel, bourrelet, drainage superficiel, forme générale du glissement, position sur le versant, dimensions) et de l'aspect de la couverture végétale.

III.2. Méthodes et technique d'inventaire des glissements de terrain

III.2.3.1 Acquisition de l'information avec Google Earth

Les méthodes employées pour la récolte, le traitement et l'analyse des données sont basées sur l'analyse des images Google Earth. Depuis 2005, Google Earth fournit en libre accès une couverture dans le monde entier d'images à haute et très haute résolution spatiale. Cette mine d'informations a fourni de nouvelles possibilités d'exploiter les images satellites pour la détection et la cartographie de glissements de terrain notamment en exploitant la visualisation en 3D et les couvertures multi-temporelles (FISHER et al. 2012 ; GUZZETTI et al. 2012 ; COROMINAS et al. 2014). Il faut cependant reconnaître quelques difficultés dues au fait que les images peuvent être de qualité variable et que des décalages peuvent exister au niveau des jointures (FISHER et al. 2012).

La reconnaissance de différents processus de mouvement gravitaire n'est pas aisée d'autant qu'il existe de nombreux types de mouvements ayant chacun des caractéristiques morphologiques plus ou moins différentes (HUNGR et al. 2013). Même si l'interprétation

d'images satellitaires ne permet pas une identification rigoureuse de tous les types de processus, il est important d'en différencier au minimum les grandes catégories. Chaque type de glissements de terrain répond à des conditions environnementales qui ne sont pas nécessairement identiques et leurs impacts peuvent être très différents (CRUDEN & VARNES, 1996 ; GLADE & CROZIER, 2005). Dans l'analyse des risques liés aux glissements de terrain, COROMINAS et al. (2014) recommandent de prendre en compte les éléments à risque qui peuvent être affectés par l'apparition de phénomènes dangereux, tels que la population, les biens ou l'environnement. Les images Google Earth sont utilisées pour l'identification de ces éléments.

III.2.2 Approches GPS disponibles

L'observation des déplacements en surface représente le moyen le plus simple et le plus utilisé pour la surveillance des zones de glissement. Le développement et la standardisation fulgurants au cours des deux dernières décennies de l'outil GPS (Global Positioning System) ont permis d'accroître considérablement les potentialités de mesures de positionnement.

La facilité d'acquisition et la précision se sont en effet trouvées accrues et un enregistrement automatique et continu s'est avéré possible. Les résultats escomptés des mesures GPS pour l'étude des glissements de terrain sont rentables et efficaces du point de vue des temps et coûts de mesure ainsi que des délais d'accès aux données, par rapport à d'autres méthodes ayant même vocation. Cet outil permet de recueillir une quantité importante de données, en particulier lors de l'installation de stations permanentes. Une longue chronique du déplacement au niveau de points d'un glissement de terrain améliore la connaissance de la cinématique de la zone sur le long terme.

Au cours des années 2000, les techniques GPS ont été largement appliquées pour surveiller les mouvements superficiels de zones instables, ceci en complément ou en guise d'alternative aux méthodes conventionnelles (théodolites, inclinomètres, ...). Les résultats de différents travaux portant sur la surveillance par GPS de glissements de terrain mettent en évidence l'aide précieuse de cet outil dans le cadre des mouvements de surface d'une vitesse de quelques cm par mois à plusieurs cm par jour (*Mora et al, 2003*).

III.2.3 L'inventaire par L'apport de la télédétection : L'utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain

Jusqu'à présent, la méthode de télédétection la plus utilisée pour l'étude des mouvements de terrain a été la **photo-interprétation visuelle d'ortho photographies** pour localiser les mouvements déclarés ou des zones susceptibles d'avoir été affectées (fig. 20). Du fait du développement de nouvelles techniques d'observation par télédétection, de la disponibilité d'images satellites à très haute résolution (VHR, Very High Résolution) proposées par les nouveaux satellites tels que Ikonos (1999, résolution de 1m), SPOT 5 (2002, résolution optimale de 2,5m) ou Quickbird (2001, résolution optimale de 0,61m) et du développement de nouvelles méthodes de traitement d'images (méthode d'analyse 'orientée

Les techniques de télédétection, les supports images et les méthodes de traitement utilisés pour l'étude des glissements de terrain vont dépendre du **domaine d'application**.

On relève trois grands domaines d'application de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain :

- **la localisation et l'inventaire**
- **la caractérisation**
- **le suivi des déplacements et des volumes.** (Monique. M 2008)

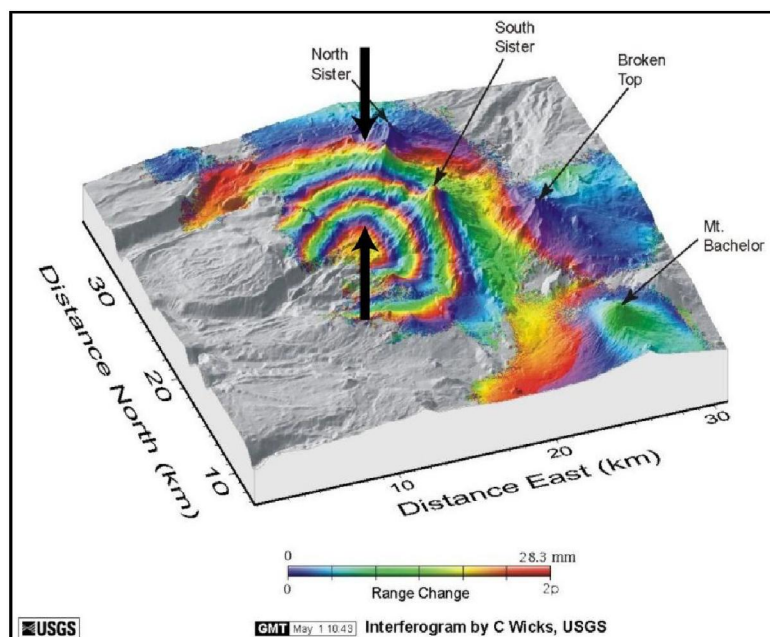


Figure 21 : Déformations par imagerie InSAR, les zones rouges ont subis des déplacements de l'ordre de 20mm, image C Wicks, USGS (hélène H 2017).

III.2.3.1 la localisation et l'inventaire

a. Méthode géomorphologique (dite 'experte')

La méthode d'inventaire des glissements de terrain la plus classique est la méthode dite 'experte' consistant à faire des prospections de terrain dans les zones les plus susceptibles d'être touchées par des instabilités de versant pour y repérer les signes géomorphologiques de la présence de glissements de terrain. Cela nécessite une connaissance experte des caractéristiques spécifiques des mouvements de terrain et beaucoup de temps ainsi que des financements. Cependant, avec l'arrivée des premières photographies aériennes, les prospections de terrain ont été combinées à l'analyse d'orthophotographies, celles-ci permettant de repérer les zones d'instabilités à l'avance et ainsi de cibler les sites à prospector. Ainsi, jusqu'au années 90, la technique de télédétection la plus utilisée pour la cartographie et le suivi des caractéristiques (distribution et classification) et des facteurs de déclenchement (pente, lithologie, structure géologique et géomorphologique, occupation du sol, anomalies géologiques) des glissements de terrain était **l'interprétation visuelle de photographies aériennes**, et plus particulièrement l'interprétation de photographies aériennes par stéréoscopie l'utilisation de l'imagerie stéréoscopique est très importante pour la détection de morphologies caractéristiques créées par les glissements de terrain et qu'à ces unités géomorphologiques peuvent être associées des éléments caractéristiques tels que les escarpements, les discontinuités du couvert végétal, les perturbations de l'humidité des sols ou des conditions de drainage(Mantovani et al. (1996).

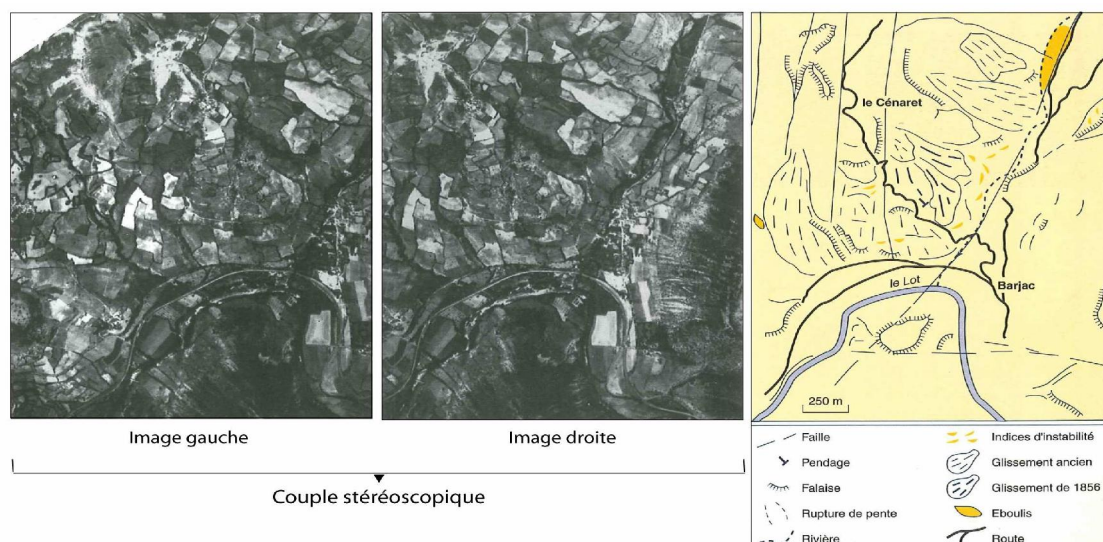


Figure 21 : Identification visuelle de glissements de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes. Exemple des glissements de terrain du versant rive droite de la Ginèse au niveau de Barjac (Lozère).

b. Méthode de traitement d'images semi-automatiques et automatiques

Un des grands avantages des méthodes d'identification semi-automatiques est qu'elles permettent de s'affranchir de la subjectivité imposée par les méthodes expertes. De plus, elles apportent un gain de temps considérable par rapport aux méthodes manuelles longues à mettre en œuvre.

Les méthodes semi-automatiques de classification d'images satellites à moyenne résolution basées sur le pixel, très utilisées pour les analyses d'occupation des sols par exemple, n'ont pas, ou très peu, été appliquées à l'identification des mouvements de terrain.

Ces techniques de traitements d'images classiques basées sur les valeurs spectrales des pixels et qui ont fait leurs preuves sur des images satellites à moyenne résolution (> à 5 m) se trouvent remises en cause avec l'avènement d'images à très haute résolution spatiale (50 cm à 2,5 m) (Boulaassal, 2008).

En effet, la classification d'images THR, du fait de la précision et du grand nombre de pixels, qui enlève tous ses avantages à la classification supervisée.

Cependant, l'avènement de nouvelles techniques de traitement dites 'orientées objets' donne de nouvelles perspectives en ce qui concerne la classification des images THR. Ces nouvelles méthodes d'extraction automatique passent par une étape de segmentation, c'est-à-dire un découpage de l'image en zones homogènes de pixels selon un critère spectral appelées régions. Ces régions peuvent être ensuite utilisées comme 'régions d'intérêt' dans une classification classique de type supervisée (par exemple selon la méthode du plus proche voisin). Elles peuvent également être caractérisées par différents critères (taille, forme, texture, contexte, etc.) et être utilisées comme règles de classification dans un processus fondé sur des opérateurs de logiques floues.

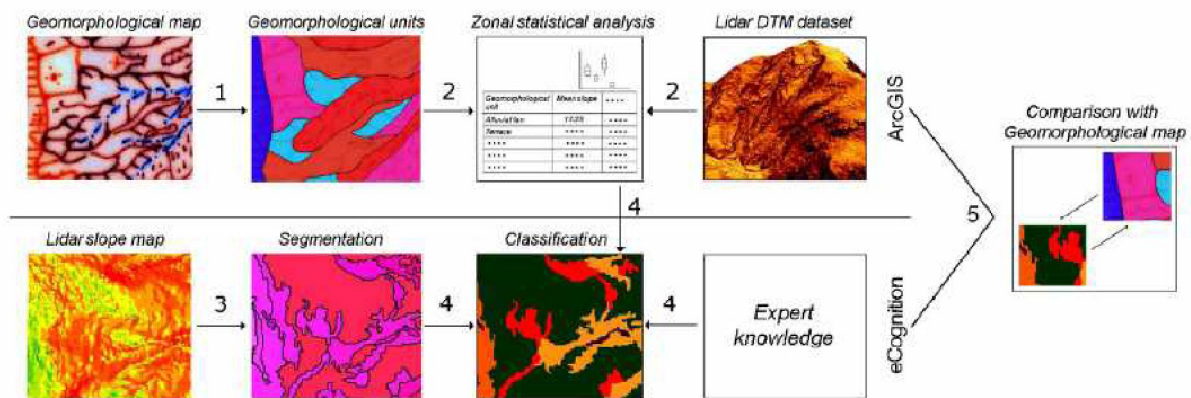
L'avantage de ce type de méthode est qu'il permet de former des régions homogènes qui serviront de base à la classification. Plusieurs essais de mise au point de méthodes de reconnaissance semi-automatique d'unités géomorphologiques en utilisant la méthode d'analyse 'orientée objet' ont déjà été réalisés en utilisant le logiciel ECognition. Les données source utilisées sont de trois types:

- (1) données externes, i.e. cartographiques (carte géomorphologique ou topographiques (MNT, Lidar)) (Van Asselen 2006)
- (2) ortho photographies (Molenaar, 2005),
- (3) images satellite (Argialas et Tzotsos, 2006).

Trois exemples de travaux de recherche utilisant chacun un de ces types de données source sont présentés ci-dessous :

Van Asselen et Seijmonsbergen ont utilisé l'analyse 'orientée objet' pour tester une méthode semi-automatique d'identification d'éléments du paysage (terrasses fluviales, cônes de déjection, versant touché par des mouvements de terrain, talus de versant, falaise rocheuse, formes glaciaires, chenaux) d'une région montagneuse d'Autriche à partir d'une carte géomorphologique, d'un MNT LiDaR et d'une carte des pentes dérivée du MNT LiDaR. La méthode a consisté en **5 étapes** :

1. délimiter les unités géomorphologiques à détecter sur une carte géomorphologique,
2. faire une analyse statistique des caractéristiques d'élévation et de pente de chaque type d'unité à partir de la carte géomorphologique et d'un MNT Lidar,
3. segmenter l'image des pentes extraites du Lidar,
4. classifier l'image segmentée par une classification par règles guidée par les statistiques de l'étape 2 et la connaissance experte et,
5. comparer la carte des unités géomorphologiques produite par la méthode semi-automatique à la carte géomorphologique experte de base.



X

Figure 23 : Organigramme de la méthode semi-automatique experte de classification du paysage en unités géomorphologiques mise en place par Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) (Van Asselen et All, 2006).

III.2.3.2 Caractérisation

La caractérisation des mouvements de terrain correspond à la description en détail des éléments qui le composent (escarpement, zone d'accumulation, état de dégradation des fissures).

Les méthodes classiques de caractérisation des mouvements de terrain passent par une observation directe des caractéristiques sur le terrain et/ou par l'interprétation de photographies par stéréoscopie.

Une approche complémentaire à l'approche par photo-interprétation visuelle, quantitative, en estimant les dimensions (longueur, largeur, épaisseur et pente, vitesse de déplacement, et distribution des débris) le long et en travers du glissement en utilisant le stereo SAR, l'interférométrie SAR et les profils topographiques (par altimétrie LASER) (Metternicht et al. 2005).

III.2.3.3 Suivi des déformations

Le suivi d'un mouvement de terrain peut se définir comme la comparaison de conditions telles que l'extension surfacique, la vitesse de déplacement, la topographie de surface ou l'humidité à différentes périodes pour caractériser l'activité d'un mouvement de terrain (Mantovani et al, 1996).

L'activité d'un glissement peut également être suivie et cartographiée par détection automatique des changements : les pixels ayant changé de caractéristiques entre deux images optiques de deux dates différentes peuvent être classifiés automatiquement (Hervas et al. (2003). les techniques de télédétection radar s'avèrent être le moyen le plus adapté au suivi des mouvements de terrain. Elles permettent une grande précision de suivi (de l'ordre du cm) à une résolution temporelle élevée. L'interférométrie SAR (InSAR), satellite ou terrestre, est la technique qui a été la plus étudiée durant la dernière décade pour le suivi de la déformation des versants l'interférométrie SAR est une technique potentiellement utile pour enregistrer les déplacements de mouvements de terrain ayant une vitesse de déplacement de quelques centimètres par jour.

III.3 Processus d'étude d'un glissement de terrain

III.3.1 Repérage topographique d'une zone instable

a. Etablissement d'un plan topographique à grande échelle

Vue à l'insuffisance des cartes topographique à petite échelle, il est indispensable d'entreprendre un levé topographique à grande échelle, afin de repérer la zone glissée, d'en tirer un plan en courbes de niveau, et des profils jalonnées. Les levés géométriques périodiquement réalisés, permettent de suivre l'évolution des glissements.

b. Repérage des éléments caractéristiques du glissement de terrain

Les éléments auxquels on doit prêter attention lors du levé topographique de terrain sont essentiellement :

- Les arbres, inclinés droit ou tordus constituent les repères courants souvent les seuls dans les zones non urbanisées.
- Les poteaux électriques ou téléphoniques verticaux ou inclinés.
- Les murs de soutènement ou de construction, fournissent par l'observation des divers, des ventres, des fissures, de bon repères.
- L'existence de faille de plis et d'autre indice géologique.
- Les routes et les chemins de fer dont l'état détérioration témoigne d'un mouvement actif du terrain.
- les fissures de traction. (yahiaoui A et all 2013)

III.3.2 L'enquête historique

La chronologie d'une zone instable est intéressante à reconstituer. Elle permet de mieux Comprendre les causes profondes de la pathologie du glissement. Les archives administratives constituent autant de sources documentaires pour une enquête qui peut se faire suivant différentes démarches méthodologiques. Pour les événements récents, le recueil des témoignages est souvent pratiqué, notamment dans la recherche de la vitesse et du mode de glissement de terrain. La chronologie d'une zone instable est intéressante à reconstituer, car

elle permet souvent de faire apparaître une succession d'unités glissées d'âges différents, ou à partir d'un glissement connu pour découvrir d'autres (yahiaoui A et all 2013).

III.3.3 Etude géologique et géomorphologique

La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles. Il est important que l'étude géologique s'étend sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable, ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs.

La réalisation d'une série de coupes géologiques selon les lignes de plus grande pente permet de formuler une première hypothèse sur la position en profondeur de la surface de glissement. Les éléments tectoniques qui doivent être définis sont le pendage des couches en place et la fissuration qui affecte ces couches. Ce n'est qu'ensuite après qu'on procède à l'exécution de sondage et autres investigations profondes et approfondies, implantation des sondages, essais géotechniques (yahiaoui A et all 2013).

III.3.4 Etude hydrogéologique

L'investigation hydrogéologique des glissements de terrain repose sur la définition préalable d'un schéma supposé réaliste du fonctionnement des aquifères du versant. Ce dernier tient compte des caractéristiques géométriques des unités géologiques, des conditions d'écoulement des eaux souterraines, des conditions hydrologiques et météorologiques.

Elle a pour but de connaître la répartition des pressions interstitielles dans le sol, leur évolution dans le temps, et de mettre en évidence les problèmes posés par la présence d'eaux et de fournir des éléments nécessaires à leur solution, elle conduit à localiser le niveau aquifère et à établir l'inventaire hydrogéologique.

Pour une étude hydrogéologique, les techniques utilisées généralement sont :

- Le repérage des niveaux d'eau dans les puits.
- Le recueil des données météorologiques.
- Les mesures de débits de sources.
- La piézométrie. . (yahiaoui A et all 2013)

III.3.5 Etude géotechnique

Une étude géotechnique consiste à définir toutes les caractéristiques mécaniques d'un sol à partir d'essai in-situ et au laboratoire.

Cette étude a pour but de :

- Définir avec précision la géologie du site étudié.
- Mesurer l'épaisseur des diverses formations rencontrées ainsi que leurs pendages.
- Définir la forme générale de la masse en mouvement et donc la position de la surface de glissement.
- Mesurer les caractéristiques mécaniques des couches de sol rencontrées.
- Repérer le niveau piézométrique des formations aquifères (G.Philipponnat, 1998).

III.4 Les factures de prédispositions

La stabilité d'un versant est lié d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement, ...). En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (érosion torrentielle, érosion météorique, facteurs anthropiques, etc...). Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence des matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorable à la rupture. La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles, etc. Il est important que l'étude géologique s'étende sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable ; ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs (LEBOURG, 2000).

Dans le cas de séisme, il se produit une émission d'ondes sismiques de deux types qui se propagent dans le sol : les ondes de volume dites ondes longitudinales et transversales, et les ondes de surface dites ondes de love de Rayleigh. Ces ondes sismiques provoquent des sollicitations, ce qui peut conduire à des mouvements de terrain. Les déstabilisations dues au séisme peuvent se manifester de différentes façons. Elles peuvent provoquer immédiatement

des glissements de terrain, des coulées, des chutes de blocs, et elles peuvent aussi avoir des effets à long terme, par augmentation de la fissuration du massif rocheux et diminution de sa résistance mécanique.

D'autre part les Facteurs hydrogéologiques et pluviométriques, La variation des conditions hydrauliques est l'une des principales causes de glissement de terrain et son action dans la rupture de l'équilibre se manifeste de plusieurs façons et à différents stades.

Et Facteurs anthropiques, L'aménagement de terrain provoque des déséquilibres qui généralement, à l'échelle humaine, passent inaperçus, mais lorsqu'une situation est à l'état d'équilibre précaire, la moindre intervention peut générer des désordres importants. Malgré l'état actuel des connaissances, il est encore fréquent de constater des instabilités, suite à des travaux et à une mauvaise anticipation de la stabilité.

La variation des conditions hydrauliques est l'une des principales causes de glissement de terrain et son action dans la rupture de l'équilibre se manifeste de plusieurs façons et à différents stades. Peut être considérée à la fois comme un facteur de prédisposition et comme un facteur déclenchant. La proximité au réseau de drainage, la taille ou l'ordre des bassins versants, la localisation des nappes et zones humides sont généralement attribués aux facteurs de prédisposition. Les facteurs déclenchant concernent les précipitations, les niveaux et battements de nappe, le régime des cours d'eau, etc. (Fressard.M ; 2013).

III.4.1 L'occupation du sol

Est également un facteur très important dans la genèse des processus de mouvements de versant. Différents types de données thématiques peuvent être utilisés, de la simple carte d'occupation du sol, aux cartes de densité ou de profondeur/extension racinaires des différentes formations végétales. Ces cartes nécessitent des mises à jour fréquentes, notamment dans les milieux fortement anthropisés, où l'occupation du sol est soumise à des évolutions importantes sur des pas de temps relativement courts (évolution des pratiques agricoles, urbanisation, etc.). La photo-interprétation, la classification d'images satellites, la collecte de bases de données nationales ou internationales et les levés de terrain sont les principales méthodes permettant d'obtenir des données sur l'occupation du sol. (Fressard ; M.2013) 'L'occupation du sol est un paramètre non négligeable dans l'élaboration de cartes de susceptibilité par SIG (van Westen et al. 2006). Comme pour les MNT, cette variable peut être disponible ou produite spécifiquement. (Thierry. M; 2007)

III.4.2 La pente

Est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrains, Les forces de frottement et de cohésion limitent les effets de la gravité, lorsque l'équilibre des forces change, le terrain devient instable.

En effet, pour qu'une rupture survienne sur un versant, il faut nécessairement qu'il y ait un appel de vide quelque part (Ahmed Nasreddine El FAHCHOUCHE et al.2015) Il n'y a pas de règle formelle mais on a constaté que les pentes les plus sujettes aux glissements ont une inclinaison qui va de 20 à 30° (Fiche SSGM)

III.4.3 Lithologie

La stabilité d'un versant est lié d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement, ...).

En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (érosion torrentielle, érosion météorique, facteurs anthropiques, etc...).

Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence des matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorable à la rupture.

La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles, etc. Il est important que l'étude géologique s'étende sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable ; ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs (LEBOURG, 2000).

III.4.4 L'hygrométrie

Influence directement les propriétés mécaniques du sol, en fonction de sa porosité. C'est un facteur prépondérant, lors d'averses plus importantes, le nombre de glissements de terrain augmente. Une teneur en eau élevée affaiblira généralement les propriétés mécaniques

de l'écoulement, accélérant son déclenchement ; des cycles répétés déchargement et déchargement en eau amèneront de l'érosion. En période de gel l'eau occupe plus d'espace, générant des efforts internes importants ; le dégel modifie ensuite cet équilibre, et entraîne des déplacements plus ou moins importants. L'hygrométrie peut enfin avoir des origines humaines

III.4.5 L'exploitation humaine

La présence d'arbres ou de champs agricole peut venir stabiliser la pente, la déforestation peut perturber l'équilibre. Les herbes hautes plantées sur les dunes des littoraux stabilisent par leurs racines la couche supérieure et limitent l'exposition au vent.

Conclusion

Vue la complexité et la variété des glissements de terrain, leur identification et localisation devienne difficile est surtout dans les zones inaccessible (montagne), en parallèle l'inventaire des mouvements des terrains est une opération importante pour qu'on passe à évaluer le degré de la susceptibilité aux glissements de terrain. Le développement scientifique met en face des techniques et des méthodes basées sur l'exploitation des images satellites (optique et radar), les photos aériennes, positionnement par GPS ainsi que l'exploitation des résultats réalisées par les méthodes classiques telle que les archives.

Pour mieux comprendre le mécanisme des glissements de terrain il est nécessaire d'identifier les facteurs de déclenchement et de prédispositions. Généralement, le déclenchement des mouvements des versants due à un déclenchement d'un séisme notable ou d'une forte pluviométrie. D'autres facteurs entrent aussi dans l'évolution des glissements de terrain telle que la pente, l'aspect de la pente, l'altitude, la courbure, la lithologie, densité de la fracturation, densité de réseau hydrographique et l'occupation du sol.

L'exploitation des informations collectées par l'inventaire des glissements de terrain et les différents facteurs sur un SIG permettant d'entamer une étude de zonage des sites sujettes aux glissements de terrain on se basant sur l'utilisation des méthodes statistiques (quantitative, qualitative et semi quantitative).

Chapitre IV

IV.1 Description de la zone d'étude

IV.1.1 Situation géographique de la zone d'étude :

La zone d'étude fait partie de la chaîne montagneuse des monts de Beni Chougrane (Nord ouest de l'Algérie). Elle se trouve à l'intersection de huit communes : Sig, Zahana, Echorfa, El Gaada, Ogaz (Wilaya de Mascara), Makedra (W. Sidi Bel Abbes), Oued Tlelat et Taфраoui (W. Oran) (fig 23). Cette zone couvre une superficie de 408km² et d'un périmètre total de 89.761 km. Elle se localise exactement entre quatre points, Système de projection des coordonnées (WGS_1984_UTM_Zone_30N);

Point/Coordonné	P1	P2	P3	P4
X_UTM(m)	727595,762273	727595,762273	760285,913098	760285,913098
Y_UTM(m)	3923356,604267	3937796,031039	3937796,031039	3923356,604267

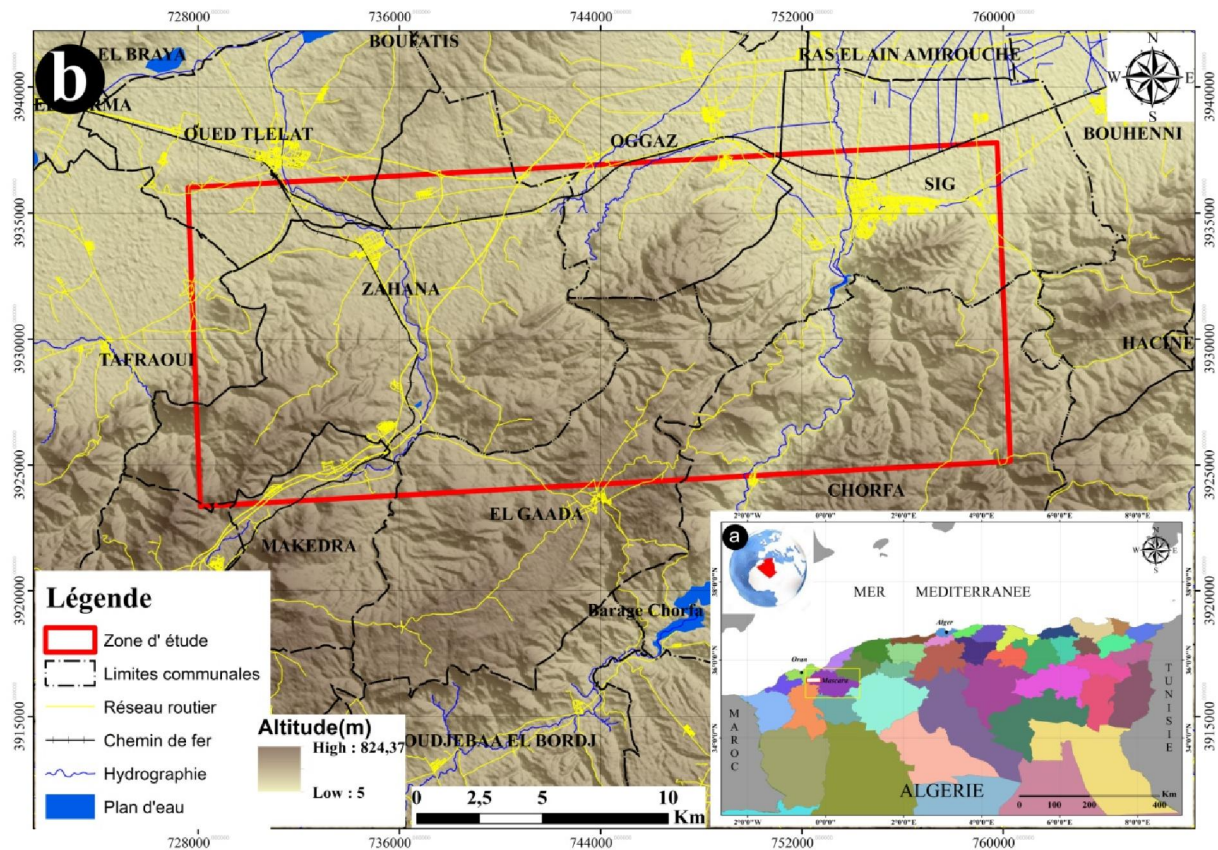


Figure 23 : localisation de la zone d'étude par rapport au magrebe et l'algérie , b) limites de la zone d'étude

IV.1.2 Cadre Géologique

IV.1.2.1 Cadre géologique général

Le bassin du Bas Chélif fait partie des bassins Néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. La partie ouest de ce bassin intra-montagneux est occupé par une importante sédimentation néogène dont le miocène constitue la plus grande partie des dépôts il est ceinturé par des piémonts du Dahra et les monts d'Arzew au Nord et au Sud par les monts de Tessala, Beni Chougrane et le massif de l'Ouarsenis d'âge secondaire qui lui fournissent un matériau par érosion (fig.24). (Thoma1985).

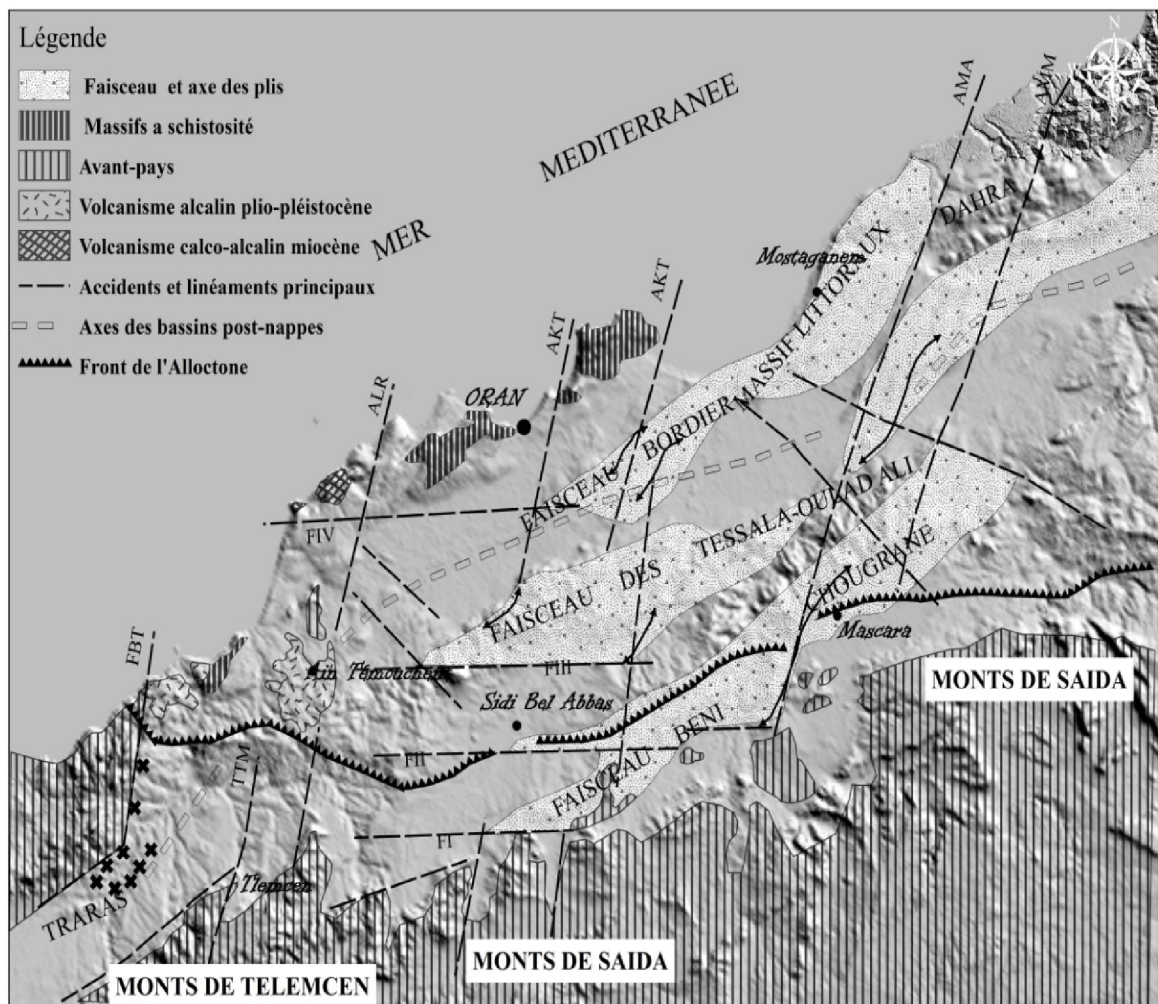


Figure 24 : cadre géologique général d'après (Thoma1985).

IV.1.2.2 Géologie du secteur d'étude

La zone d'étude fait partie du complexe sédimentaire tertiaire du bah chelif.

D'après La carte géologique (fig 24) la région présente trois domaines distincts :

- Une région montagneuse correspond à une période anténéogènes qui occupe la moitié sud-ouest de la carte.
- Une zone de plateau visible sur la partie Nord ouest de la carte occupée par la plaine de M'Léta
- Enfin la parties NE s'ouvrent sur une dépression forment la plaine de l'habra

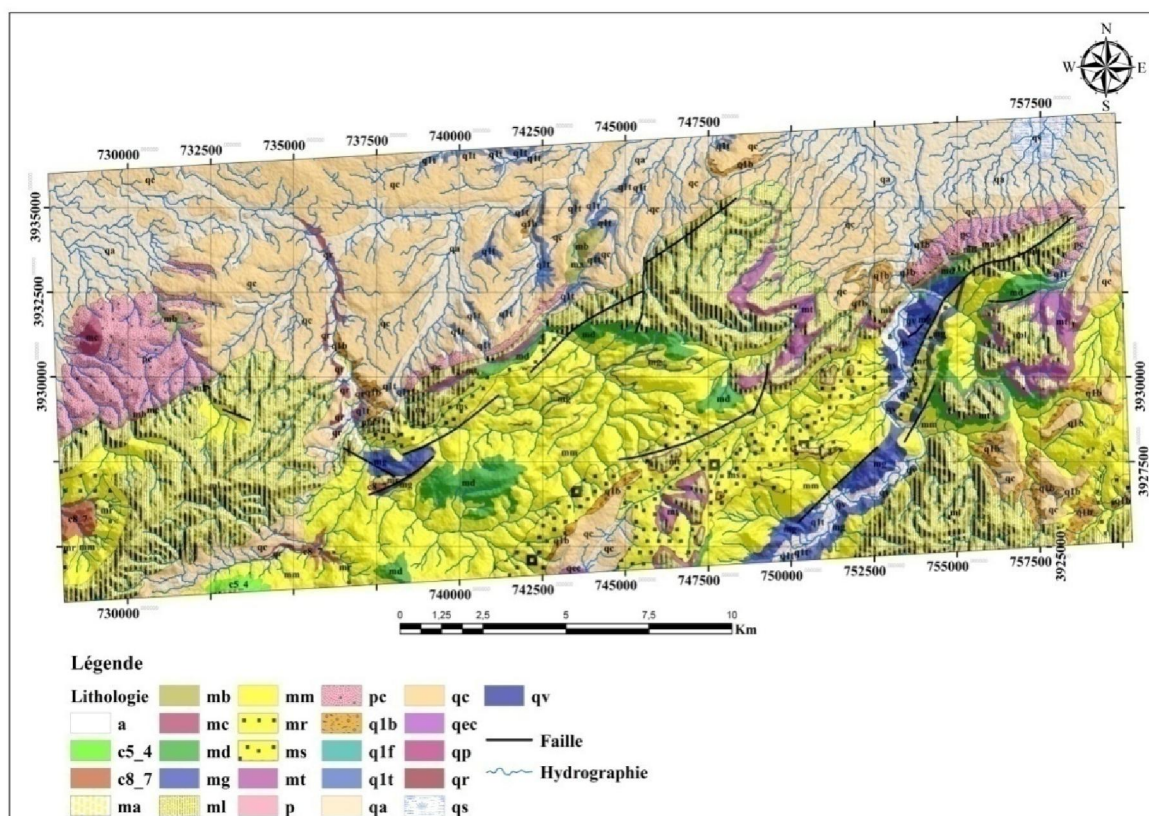


Figure 25 : carte géologique de la zone d'étude.

❖ Litho-stratigraphie

- Le Secondaire

Le secondaire représenté par des schistes et marne d'âge Crétacé constitue le substratum d'une couverture tertiaire. Ce substratum est visible dans la vallée de l'Oued Mekedra et dans la dépression située à l'Ouest des (lauriers roses).

Ce sont des marno-calcaire gris noire à intercalations avec de bancs calcaires durs à pate fine.

- le Tertiaire

Il se localise principalement dans la partie sud de la carte (fig 24), il est représenté par les formations du néogène.

- **Le Miocène** : c'est une série de dépôts généralement transgressifs sur les terrains secondaires ont distingue les formations suivants.

- Miocène moyen : une série constituée de formation détritique, limons, grés et conglomérat a passées d'agilités grises (200m d'épaisseur).
- Miocène Supérieur : les niveaux de base de la série miocène sont généralement détritique et représentés par des limons et de conglomérats rouge reposée sur une fine couche de cinérite, c'est formation sont particulièrement bien développer dans djebel Touakes, Au-dessus de ces dernier ont retrouve des marne bleues plastiques renferment une microfaune caractéristique du miocène supérieur et enfin la série ce termine avec des gypse et des marnes-gypseuse.

- **Le Pliocène** : Discordant sur les formations précédentes apparaît-le :

- Pliocène inférieur / moyen (Calabrien) :
Représenté par des grés roux bien cimentés passant par le bas à des calcaires tendres et à des marnes sableuse dont ces dernières font partie à des formations marine.
- Pliocène supérieur :
C'est une alternance hétérogène de marne de limons de sable et de conglomérats sont des formations continentales.

- Le Quaternaire

Les formations quaternaire occupent toute nord-ouest et nord-est de la carte elles sont représentées par :

- Quaternaire ancien correspondant à une carapace calcaire masquant les terrains sous-jacente.

- Quaternaire récent ou postérieur à la dernière carapace calcaire représenté par des alluvions argilo-limoneuse non rubéfiée dites alluvions récent.
- Actuel forme le lit majeur des oueds vases et sables

❖ Structurale

La partie méridionale de la carte est occupée par une série de plis en direction ENE-WSW. Les anticlinaux les plus marqués dessinent la limite Nord de la région montagneuse.

Au sud de la ville de SIG le Djebel Touaka correspond à un anticlinal aigu faillé longitudinalement et ouvert sur les formations continentale du Pliocène de la basse du miocène, l'axe de cet anticlinal s'infléchit vers le sud pour se prolonger par une zone faillée qu'emprunte la vallée de l'oud Mébtouh.

Un autre axe anticlinal bien marqué dans le Miocène à l'Ouest de la ville et au sud d'Oggaz est qui caractérise le Djebel Haoudh El Kebir.

Ces plis se situent dans une zone de variation d'épaisseur et de faciès des séries néogène indiquant la continuité de l'instabilité de cette région tout au cours du néogène.

L'ampleur et la rapidité des variations des faciès prouvent que des mouvements verticaux n'ont cesse de jouer pendant tout la sédimentation Miocène.

Il convient enfin de signaler que la région a également été l'objet de mouvements importants durant le quaternaire.

IV.1.3 La morphologie de la zone d'étude

L'étude des formes du relief est une science revendiquée à la fois par les géographes et les géologues. Ces formes sont en effet, le résultat après l'action de plusieurs agents érosif (le vent, l'eau, etc.), et d'action internes (plissements, etc.). L'Oranie septentrionale représente un domaine important du Moi-pliocène dont fait partie de la zone d'étude. La zone d'étude est située dans un sillon qui s'étend selon une direction tellienne NE-SW marqué par des piedmonts qui longent la partie sud de la plaine (fig.26) montre l'existence de quatre unités morphologiques :

- une zone montagneuse au sud de la plaine représentée par les monts de Tassala et ceux de Beni Chougrane

- -une zone de dépression située dans le Nord Ouest représentée par la plaine de Mleta.
- -une autre zone de dépression situé dans Nord Est représentée par la plaine d'El Habra.
- -une zone des plateaux située dans le centre représentés par les plateaux de Zahana et Sig.

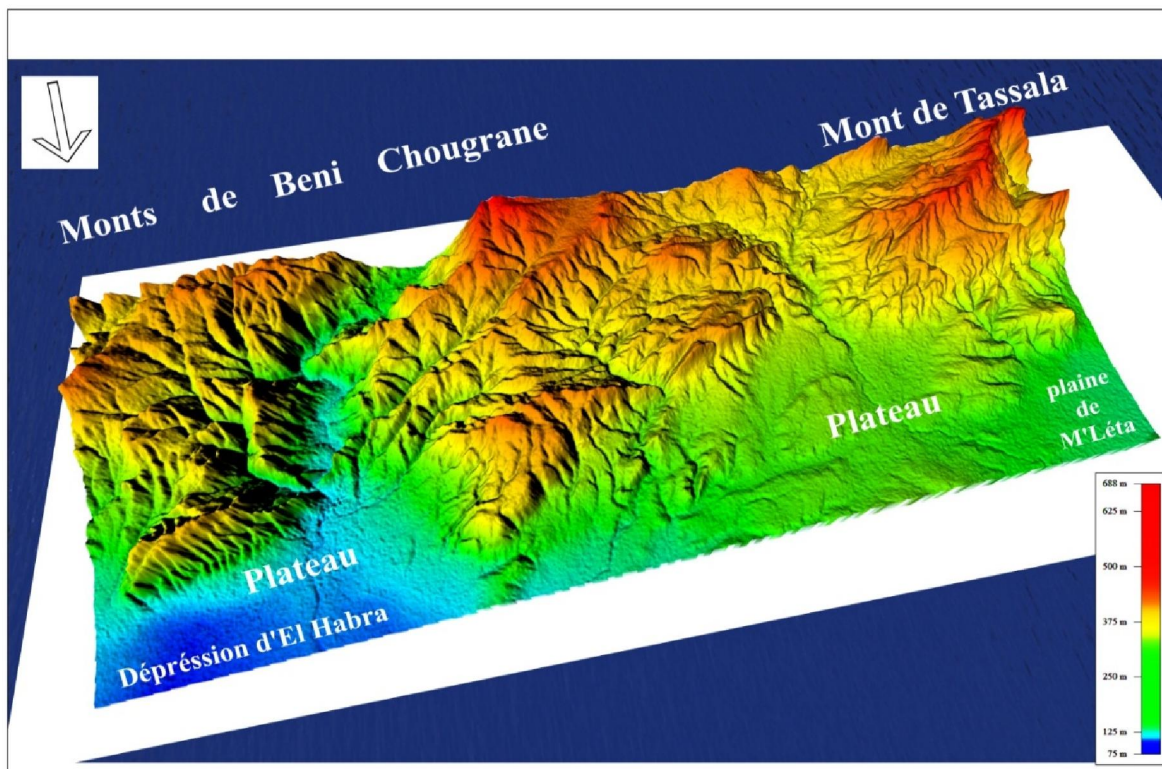


Figure 26 : géomorphologie de la zone d'étude

L'altitude de la zone d'études variée entre 75 et 688 m ainsi que la pente varie entre une pente minimale de 0° et une pente maximale de 57.18° (fig.26).

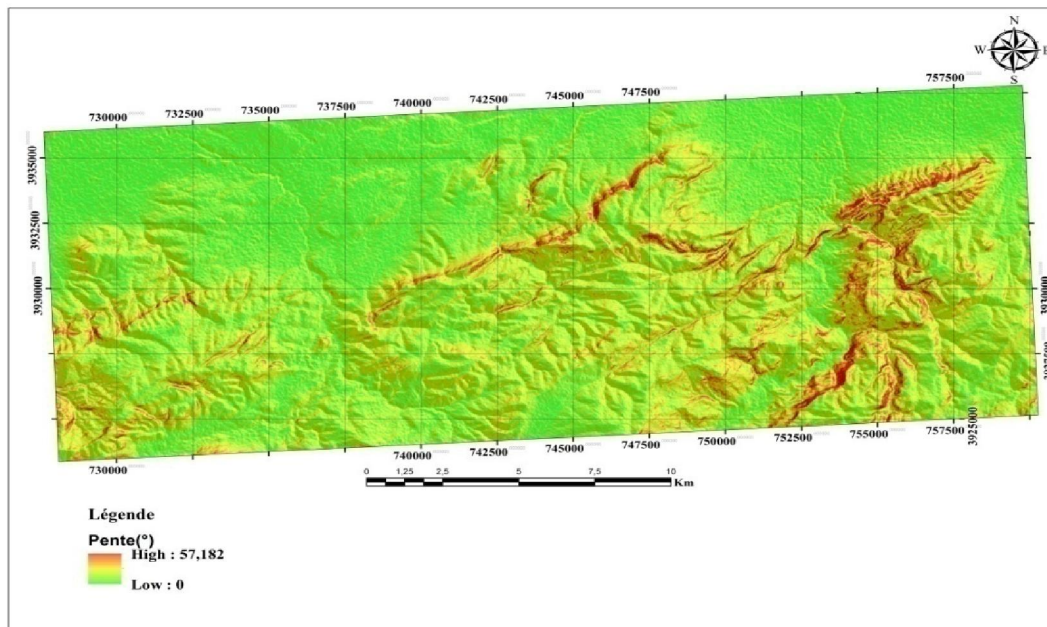


Figure 27 : carte des pentes de la zone d'étude

IV.1.4 Caractéristiques hydrologique

La zone d'étude située entre trois sous bassin versant (fig. 28) bassin versant de grand sebkha d'Oran code 04-04, bassin versant d'El Habra code 11-16 et le bassin versant d'Echorfa code 11-04. le chevelue hydrographique caractérisé par une densité assez importante. Les deux principaux cours d'eau celle de oued El Mabtouh qui alimente les marais de la Mactaa, et le deuxième cours d'eau celle d'oued Tlélet dont les eaux de ruissèlement atteignent dhaya Oum Ghhelaz.

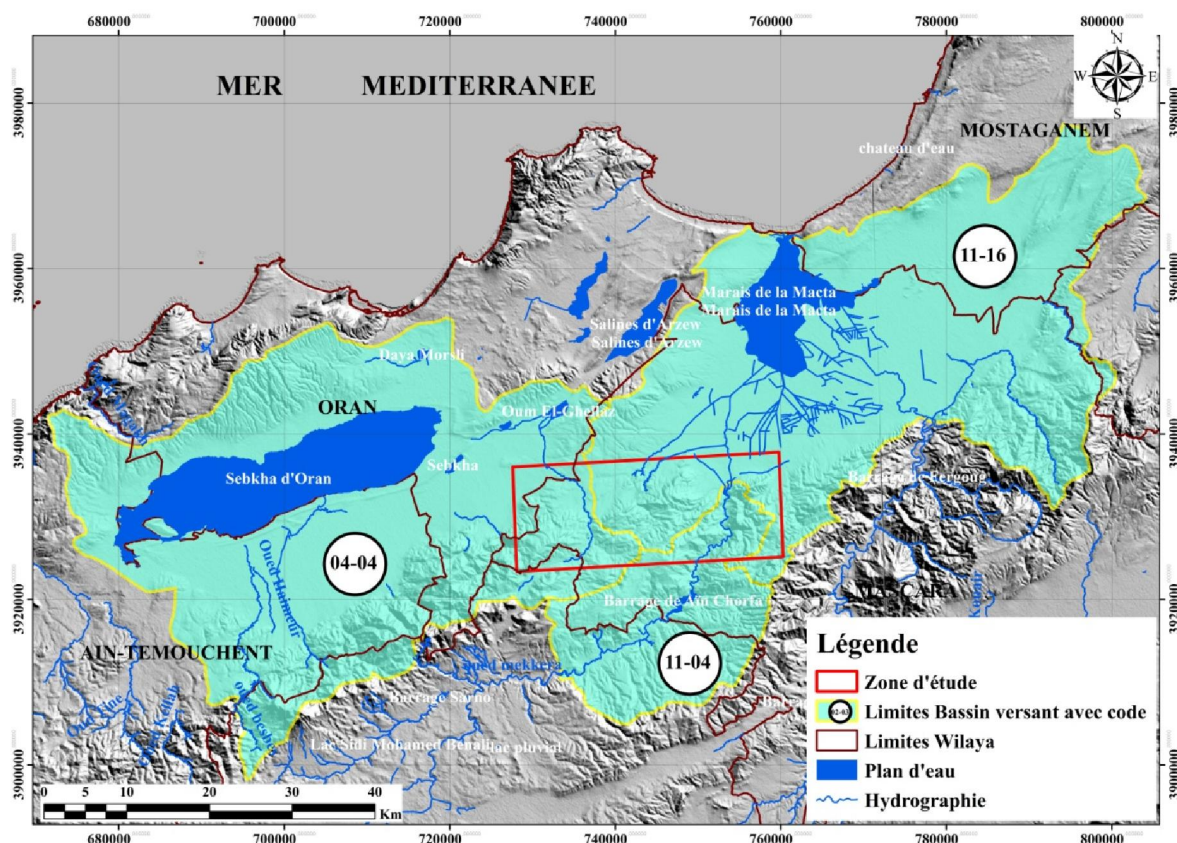


Figure 28 : Carte schématique montre les différents aspects hydrologiques

IV.1.5 La climatologie de la zone d'étude

L'étude de cette partie est d'une importance primordiale grâce aux différents paramètres climatiques utilisés en particulier (T° , P) qui sont les deux facteurs indispensables pour la réalisation de cette étude.

Les paramètres climatiques jouent aussi un rôle déterminant dans le comportement du régime des cours d'eau superficielles.

Le climat de la région d'étude par rapport au climat du pays est caractérisé par un climat contraste entre un climat méditerranéens au littoral et désertique au sud. La région de Mascara est située dans les hautes plaines oranaise constitue un domaine intermédiaire, chaud et sec en été, froid et pluvieux en hiver.

Les stations climatiques existantes, susceptibles d'être considérées comme représentatives de la région d'étude, et possédantes des données fiables, sont celles mentionné dans le tableau suivant :

Tableau 03: Coordonnées des stations utiliser

Station	X	Y	Altitude	Paramètres	Période d'observation

Barrage Cheurffas	230	238,2	-	P	(1982-2012)
Mascara	00° 18' E	35° 36' N	474 m	T	(2003-2012)

- **Etude des précipitations mensuelles :**

Le tableau (tab 04) représente les précipitations moyennes mensuelles durant la période de référence (1982-2012) de la station de Barrage Cheurffas dont les données seront prises comme référence.

L'étude des précipitations moyennes mensuelles (tab. 04) a permis d'observer que la période pluvieuse débute au mois d'Octobre et se termine au mois d'Avril. Au cours de cette période on remarque que le maximum des précipitations apparaît en Novembre (56,0 mm) et pour le minimum en Juillet (1,4 mm).

Tableau 04: Précipitations moyennes mensuelles St« Cheurffas » Source –ANRH

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Cheurffas Bge	39,2	34,5	39,4	33,8	20,7	3,7	1,4	3,5	13,3	27,4	56,0	33,8	306,5

- **Etude des précipitations moyennes annuelles :**

-Le tableau ci-dessous (Tab 05) représente les précipitations moyennes annuelles de la station de Bge Cheurffas pour la période « 1982-2012 ».

Tableau 05: Précipitations moyennes annuelles

Année	P (mm)
1982	311,4
1983	220,7
1984	447,9
1985	346,7
1986	224,3
1987	221,1
1988	235,4

1989	242,5
1990	454,5
1991	331,5
1992	170,3
1993	252,8
1994	370,7
1995	371
1996	153
1997	274,4
1998	264,6
1999	270
2000	269,8
2001	346,2
2002	301,3
2003	334,6
2004	280,5
2005	423
2006	283,7
2007	253,8
2008	421,6
2009	318,6
2010	285,3
2011	305,2
2012	514,9

L'étude des précipitations moyennes annuelles permet de remarquer ce qui suit :

L'année la plus pluvieuse à été enregistrée (514.9mm).

Cependant, l'année la plus sèche avec une pluviométrie (153.0mm)

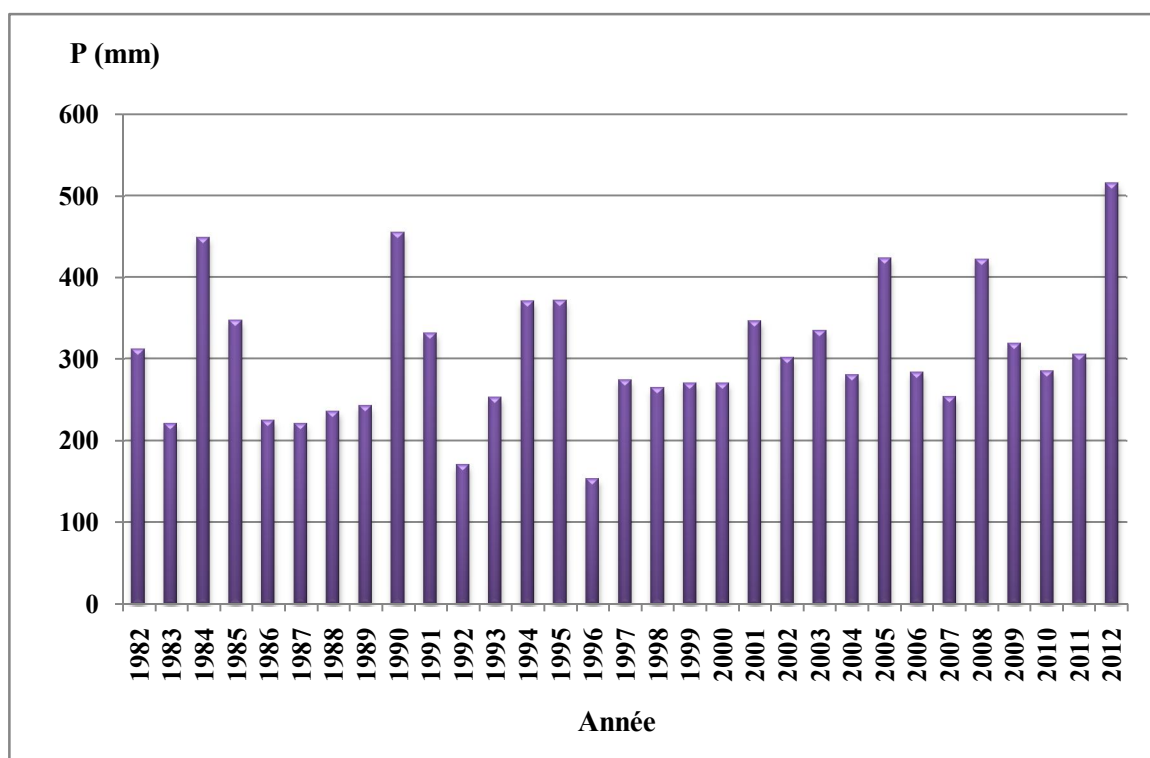


Figure 29: Histogramme des Précipitations Moyennes Annuelles

- **Températures (station de Mascara) source ONM**

Elles constituent avec les précipitations un paramètre majeur qui permet de définir le climat d'une région, c'est aussi l'un des termes essentiels dans la définition du déficit d'écoulement.

Pour notre secteur d'étude, la station de Mascara est la seule où nous avons pu disposer d'une série de mesures de ce paramètre pendant la période (2003-2012) (tabl.06).

Tableau 06: Températures moyenne (station de Mascara) source ONM

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
T (°C) Moyenne	9,04	9,69	12,35	14,74	18,59	22,94	27,98	27,71	23,35	19,29	13,32	9,96

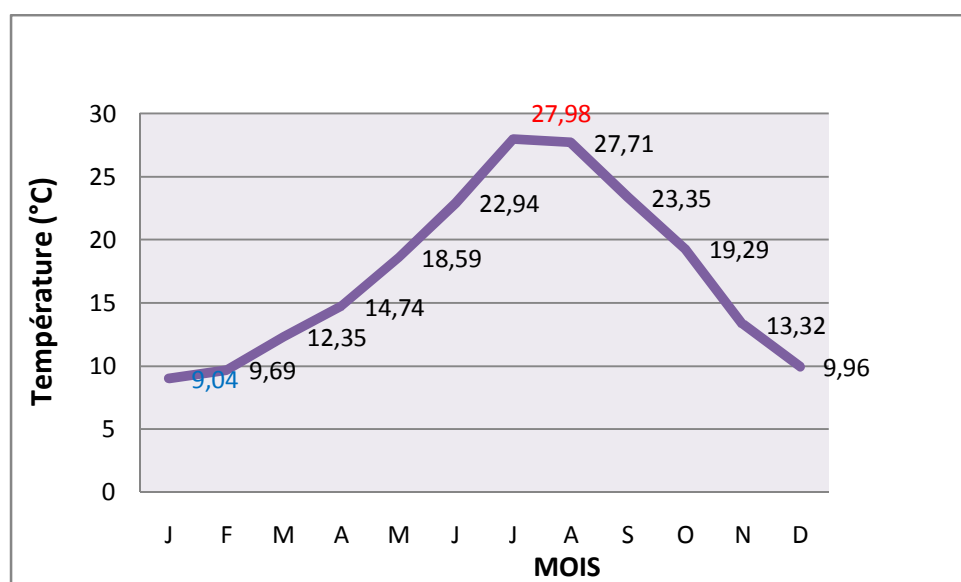


Figure 30: Variation des Températures Moyennes Mensuelles « Mascara » (2003-2012)

La région connaît deux saisons distinctes :

Les températures maximales en été selon l'exploitation de la source (ONM), un maximum de 27,98 °C en juillet et la saison hivernale froide et rigoureuse avec un minimum de 9,04 °C en janvier. (Fig 30)

- **Le régime Climatique:**

Une étude de relation entre la température et les précipitations est établie à partir de différentes méthodes graphiques ou par des calculs de certains indices que nous appliquerons à la station de Mascara.

L'étude du climat permet de donner à la région son caractère, son individualité climatique et de situer les périodes sèches et humides.

- **Courbe Pluviométrique (Gausсен et Bagnouls)**

La courbe pluviométrique proposée par Bagnouls et Gausсен en 1953 est simple et la plus utilisée. Elle permet de calculer la durée de la saison sèche en portant la pluviométrie mensuelle et la température moyenne mensuelle sur le même graphe, l'échelle de graphe est de $P \text{ (mm)} = 2 T^{\circ}\text{C}$.

La zone comprise entre la courbe pluviométrique et celle des températures constitue la période sèche ou humide. Le mois est considéré sec si $P \text{ (mm)} < 2T^{\circ}\text{C}$. Cette relation permet d'établir les diagrammes pluviométriques sur lesquels la température est à double échelle des précipitations

Tableau 07: Moyenne des précipitations et des températures St de Mascara

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
T(°C) Moy	9,04	9,69	12,35	14,74	18,59	22,94	27,98	27,71	23,35	19,29	13,32	9,96
P(mm) Moy	39,2	34,5	39,4	33,8	20,7	3,7	1,4	3,5	13,3	27,4	56,0	33,8

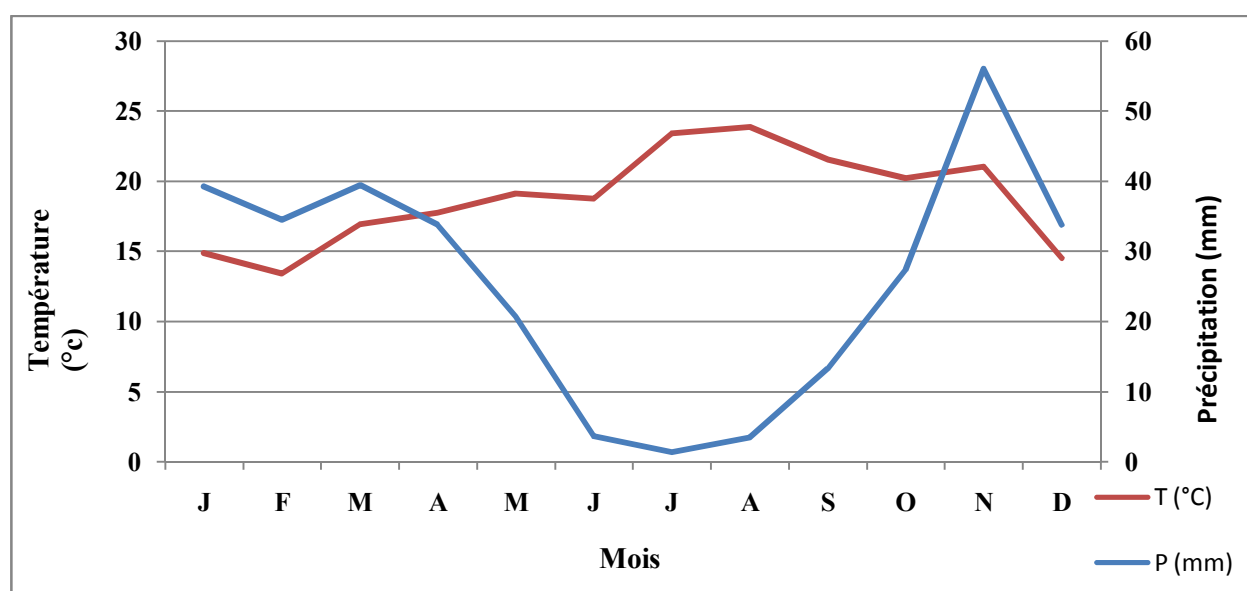


Figure 31: Diagramme ombrothermique de la zone d'étude (1982-2012)

La courbe des précipitations passe au dessus de la température pendant les moi humide d'Octobre jusqu'au Avril donc la période est excédentaire.

- **Les indices climatiques**

Pour appréhender l'étude climatique, nous avons fait appel à quelques indices climatiques :

Indice d'aridité de Martonne (I)

On peut calculer cet indice par la formule : $I_{(a)} = P / (T + 10)$

Dont :

- **P** : Précipitations Moyennes annuelles en (mm)

- T : Températures Moyennes annuelles en (c°)

$$P=306,5 \text{ (mm)} \quad I = 306,5 / (17,4+10)$$

$$T=17,4 \text{ (c°)} \quad I_{(a)}=11,19$$

(I < 5) régime hyperaride

(5 < I < 10) climat désertique

(10 < I < 20) climat semi-aride

(I > 20) climat tempéré

Les résultats montrent que la valeur de la station Bge Echorffa se caractérise par un régime semi aride. On détermine ces valeurs à l'aide de l'abaque d'indice d'aridité.

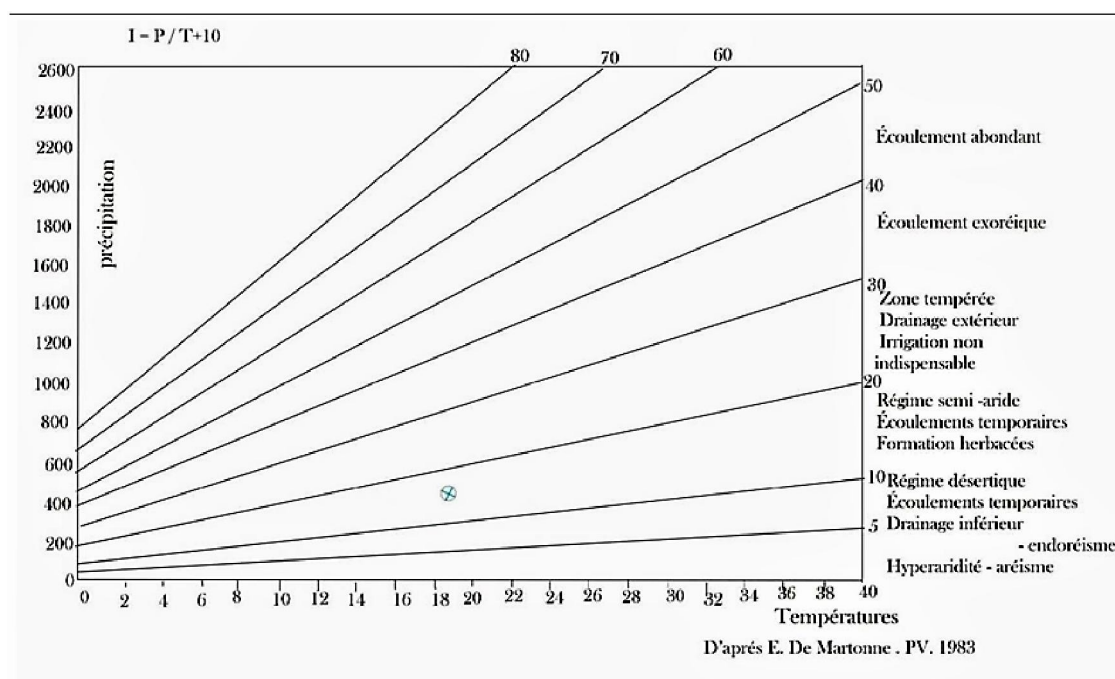


Figure 32: Abaque d'indice d'aridité de DE.Martonne (1982-2012)

IV.1.6. Sismicité de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie de la chaîne Atlas tellienne de l'Algérie appartenant à la limite de la plaque tectonique Afrique- Eurasie qui forme une bande déformée d'environ 100 KM de largeur. Le Nord ouest de l'Algérie a connu plusieurs tremblements de terre (tabl. 08) y'est parmi le tremblement d'Oran du 09-10-1790 d'une intensité de $I_0=X$, les événements

de Mascara celui de 1819 d'une intensité de $I_0=X$ et celui de 1851 d'une intensité $I_0=VIII$. Récemment, des séismes plus importants sont enregistrés au niveau de littorale Oranaise tel que le séisme de Hassine Mascara du 19 août 1994 d'une magnitude de moment $MW=5.7$ et ceux de Ain Temouchent (décembre 1999, $MW=5.7$) et d'Oran (juin 2008, $MW=5.5$) (Belayadi et al.)

D'après Thomas 1985, la région d'étude se situe dans le fuseau de Beni Chougrane caractérisé par des failles inverses de direction NE-SW et d'autres failles inverses observées dans la plaine d'El Habra et Mleta d'une direction NW-SE

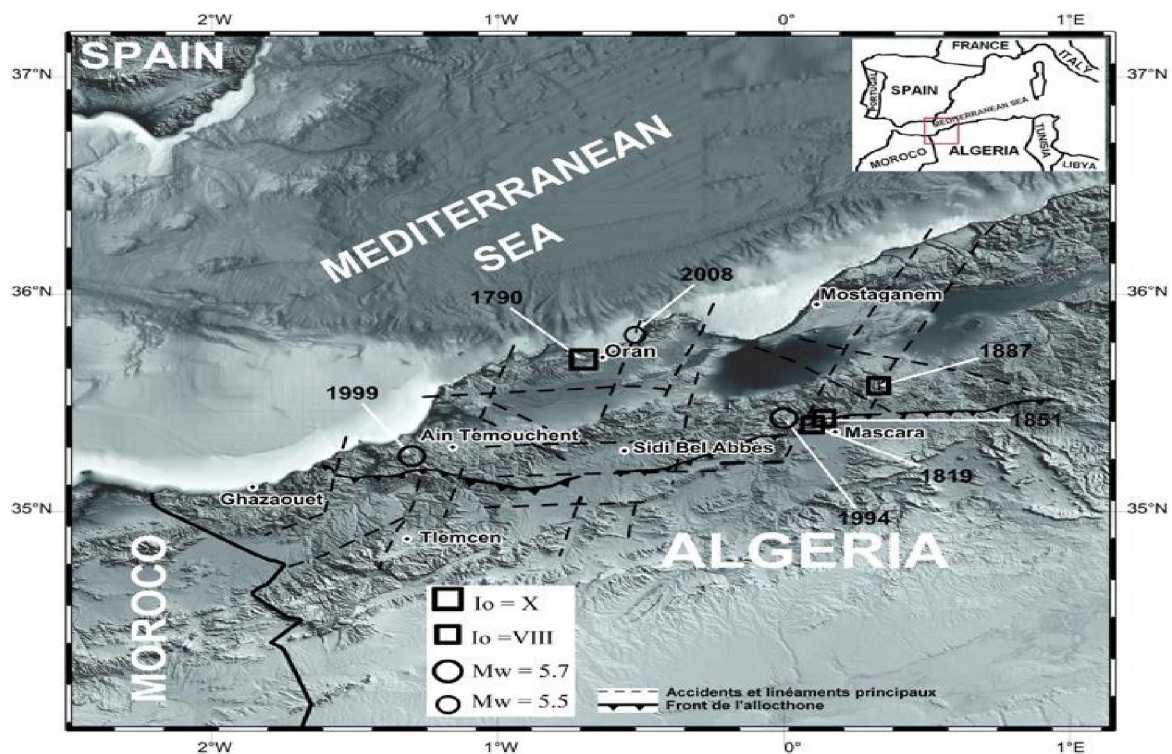


Figure 33 : les principaux traits structuraux selon Thomas 1985 et les séismes significatives survenus dans la région Nord Occidentale de l'Algérie (in Belayadi et al 2018)

La zone d'étude caractérisée par une sismicité importante vue l'existence de plusieurs failles actives. La distribution spatiale et temporelle de ces événements joue un rôle très important dans le déclenchement ou la réactivation des mouvements de terrain.

Tableau 08 : liste des tremblements de terre nord ouest de l'Algerie

Localisation	date (j/m/an)	lat (N°)	lon (°E)	I (intensité)	M/Mw
Mitidja	03/02/1716	36.70	3.10	X	–
Oran	09/10/1790	35.70	0.70	X	6.5–7.5
Mascara	--/03/1819	35.4	–0.1	X	–
Blida	02/03/1825	36.40	2.80	X–XI	–
Mascara	22/11/1851	35.4	–0.1	VIII	–
Blida	15/05/1854	36.4	2.7	VII	7
Moizaia ville	02/01/1867	36.42	2.68	X–XI	–
El Affroun	23/03/1876	36.5	2.6	VII	7
El Kalaa (Relizane)	29/11/1887	35.6	0.3	IX–X	–
Gouraya	15/01/1891	36.50	1.80	X	7.5
Moudjebeur	23/09/1903	36.00	2.8	VIII	5.6
Blida	04/03/1931	36.4	2.7	VIII	–
Orleansville	09/09/1954	36.29	1.52	X	6.7
Chiffa	09/01/1957	36.4	2.7	VI	–
Oued djer	07/11/1959	36.40	2.5	VIII–IX	5.6
Sig (Mascara)	13/07/1967	35.5	–0.1	VIII	5.1
El asnam	10/10/1980	36.16	1.41	X	7.3
Tipaza	29/10/1989	36.61	2.33	VIII	6.0
Mascara	18/08/1994	35.40	–0.03	VIII	5.7
Ain temouchent	22/12/1999	36.93	3.58	VII	5.8
Tadjena (chlef)	16/12/2006	36.28	1.22	VI	5.2
Oran	06/06/2008	36.06	–0.64	–	5.5

Chlef	18/06/2008	36.21	1.16	–	4.5
Mostaganem	22/05/2014	35.725	0.259	–	4.9

IV.2 Inventaire des glissements de terrain

Dans notre cas d'étude la carte d'inventaire est établie à partir de l'interprétation des images satellitaire Google Earth ainsi que les levées de terrain et par le positionnement via le GPS.

On mentionnant qu'aucune carte d'inventaire de glissement de terrain n'est établie dans la zone d'étude.

L'objectif de cet inventaire est de recenser, localiser et caractériser les principaux mouvements de terrain qui sont survenus dans la zone d'étude.

❖ Exemple de quelque site remarquable

L'expertise insitu présente une étape fondamentale dans l'inventaire des glissements de terrain, dont la quelle le géologue experte est capable d'une part d'identifier, localiser, mesurer les glissements de terrain et d'autre par de vérifier les glissements de terrain inventorier par l'interprétation des photos aériennes, images satellite, l'archive, presse ou documents antérieures.

Dans ce travail des sorties de terrain est entamer afin de localiser et verifier le maximum de site. L'enquête de terrain nos a permis de localiser et identifier plusieurs glissement, quelle que exemples sont motionnés dans le suivant paragraphe :

1-Un glissement de terrain de type rotationnel a été localisé à l'aide de l'interprétation de l'image satellite Google Earth (fig.a) d'une superficie d'environ 8.2 Ha. Parmi les indices d'instabilités observés est ceux la déviation de la trajectoire du cours d'eau ainsi que dégradation dans la topographie.

2- un deuxième glissement de terrain de type rotationnel est identifié à partir de l'image Google Earth, il est caractérisé par une niche d'arrachement, une surface de glissement et une zone d'ablation. Ce glissement est de superficie d'environ 9 Ha (fig.b)

3- un troisième glissement de terrain de type translational est localisé sur le terrain à partir de l'application mobile GPS Essentiel (fig.c).

4- un glissement rotationnel est identifié proximité de la route (vers le village d'Echorfa) dont les coordonnées observées est ($X_{utm}= 752259.7$, $Y_{utm}= 3931563.93$) (fig.d)

5- un basculement des formations calcaire est observé au niveau du chemin communal lie le village d'El Gaada et Sig (fig.e). Les coordonnées du site observées est ($X_{utm}=751309.02$, $Y_{utm}= 3930215.64$).

6- un glissement de terrain ancien de type complexe affecté les formations marneux calcaire est identifié à partir de l'image Google Earth et vérifié sur le terrain. La superficie du glissement de terrain est de 6.64 Ha (fig.f).

7- les éboulements des formations calcaires sont observés à côté de la route emmenant de Sig à Echorfa (fig.g) dont les coordonnées observés est ($X_{utm}= 752318.21$, $Y_{utm}= 3931540.77$)

Selon la classification de (VARNE), les mouvements de terrain concernés par cet inventaire sont exclusivement ceux qui se rattachent aux phénomènes suivants :

Eboulements, basculement, glissement rotationnel, translational et rotationnel complexe.

La carte d'inventaire établie du type vecteur contient plus de 80 polygones qui représentent les glissements de terrain inventoriés (fig. 34).

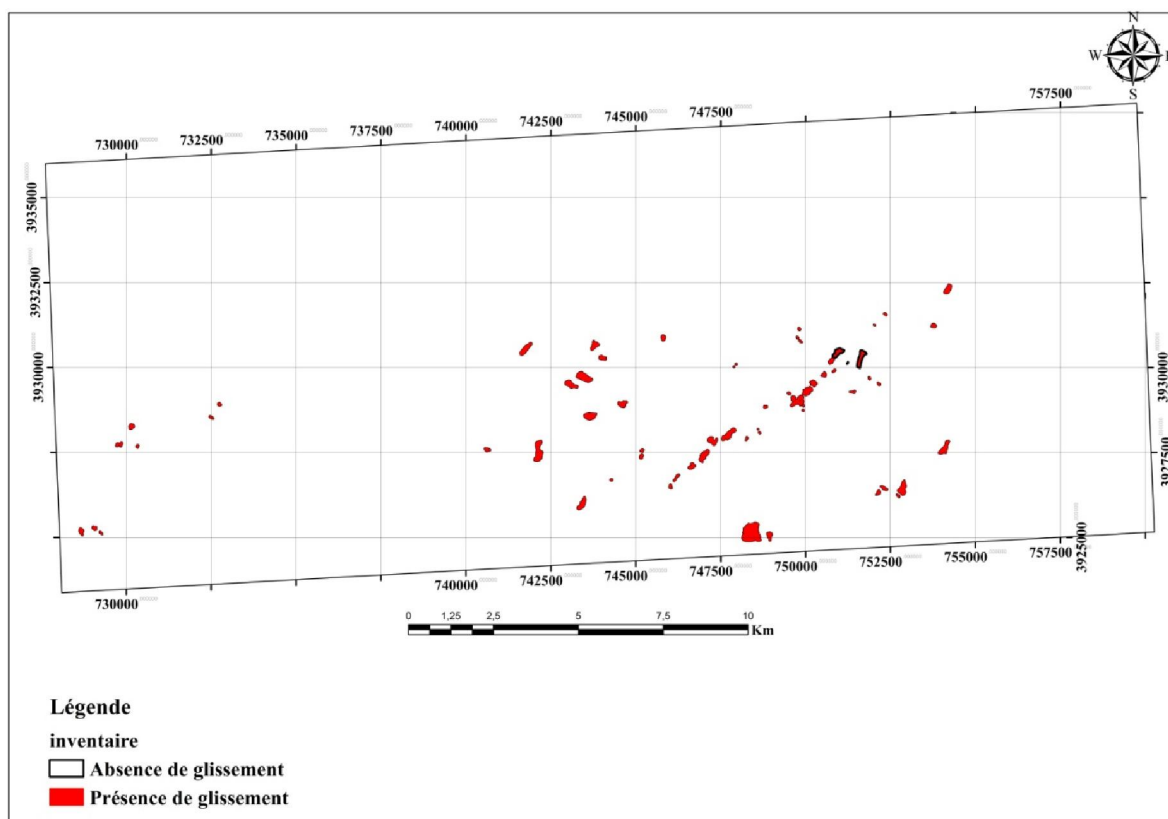


Figure 34 : carte d'inventaire de glissements de terrain

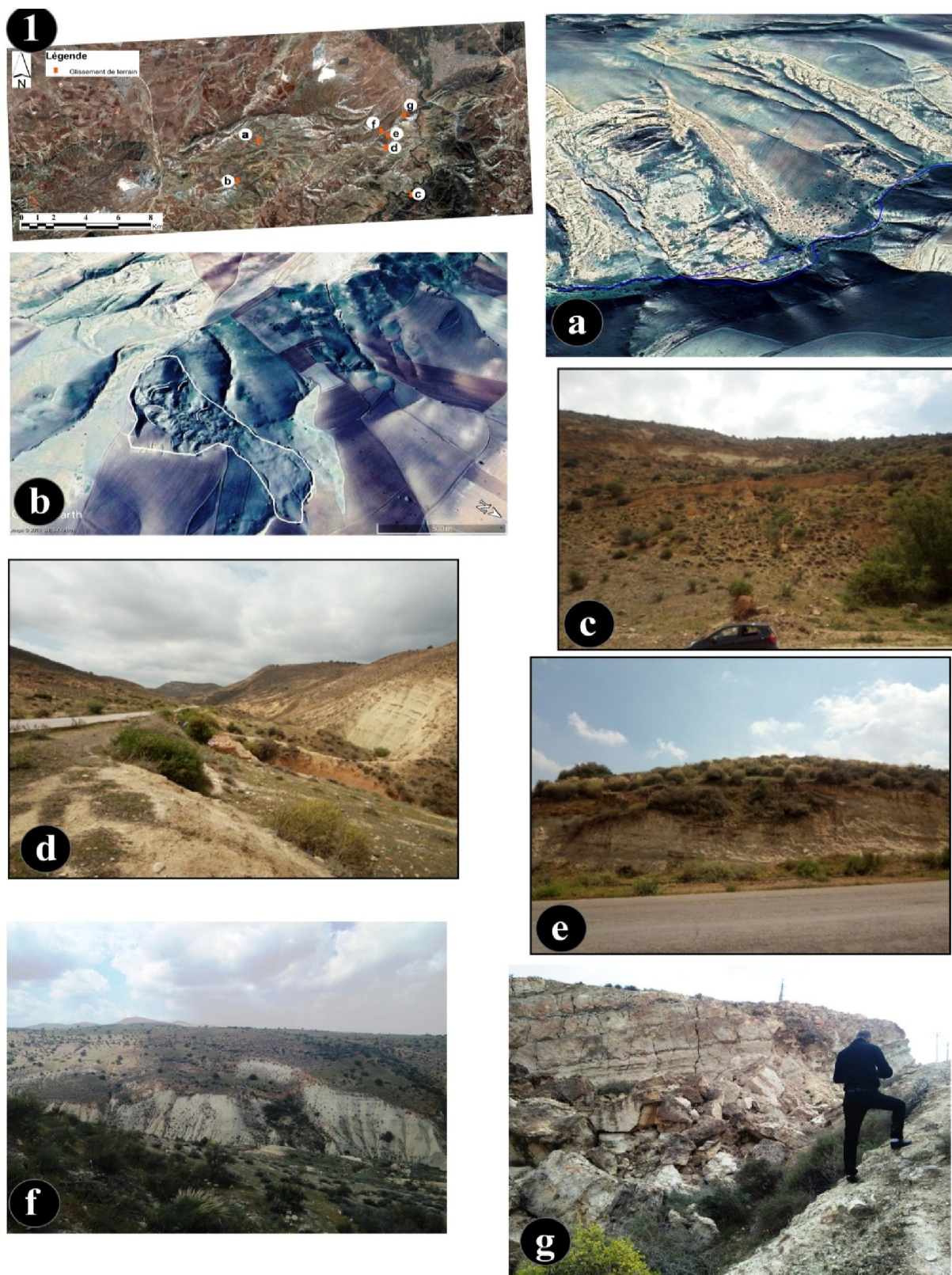


Figure 35 : exemple de quelque glissement de terrain recensé, (1) localisation des glissements de terrain (a) glissement rotationnel, (b) glissement rotationnel, (c) glissement translational, (d) glissement translational, (e) basculement, (f) glissement complexe, (g) éboulements.

❖ **Distribution spatiale des glissements de terrain**

Une base de données est établie par l'utilisation du logiciel ArcGIS contient les différentes informations spécifique à chaque glissement de terrain, le croisement de l'inventaire des glissements de terrain avec les différents facteurs utilisés dans cette étude (fichier raster) résulte une donnée, leur exploitation sur l'Excel permettant d'établir une étude statistique.

Des résultats préliminaires sont obtenus montrant l'influence des différents paramètres de prédisposition de glissements de terrain (fig. 35).

L'interprétation de ces résultats montre que les glissements de terrain sont concentrés généralement dans les versants caractérisés par une pente variant entre 10 et 20°, avec une direction Sud-Est. Ainsi que la plus part des glissements de terrain affectant les formations lithologiques de la classe 4 telle que les versants qui sont caractérisés par une densité de fracturation moyenne à forte. On observe aussi que les zones caractérisées par une moyenne de précipitations variant entre 300 et 350 mm/an sont les plus sujettes aux phénomènes de glissements de terrain, le ruissellement des eaux de ces précipitations causés plusieurs glissements au niveau des zones situées proximités du cours d'eaux (zone comprise entre 0 et 100 mètre) ou l'érosion des berges est très fortes. Vu l'absence de couverture végétale, les sols nus et les zones de parcours sont caractérisées par une forte densité de glissement de terrain. L'altimétrie est aussi influencée dans la distribution spatiale des glissements de terrain, dans notre cas d'étude les zones comprises entre 200 et 500 mètre sont les plus influencées par les glissements de terrain.

Conclusion

L'inventaire des glissements de terrain présente une étape indispensable dans la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain, plusieurs méthodes peuvent être utilisées dans l'identification des mouvements de versants.

Dans cette étude, une carte d'inventaire des glissements de terrain a été établie par l'interprétation des images Google Earth et l'expertise insitu.

Le croisement de cette carte avec les autres cartes des facteurs de glissement de terrain montre l'influence de ces paramètres à la distribution spatiale des glissements de terrain.

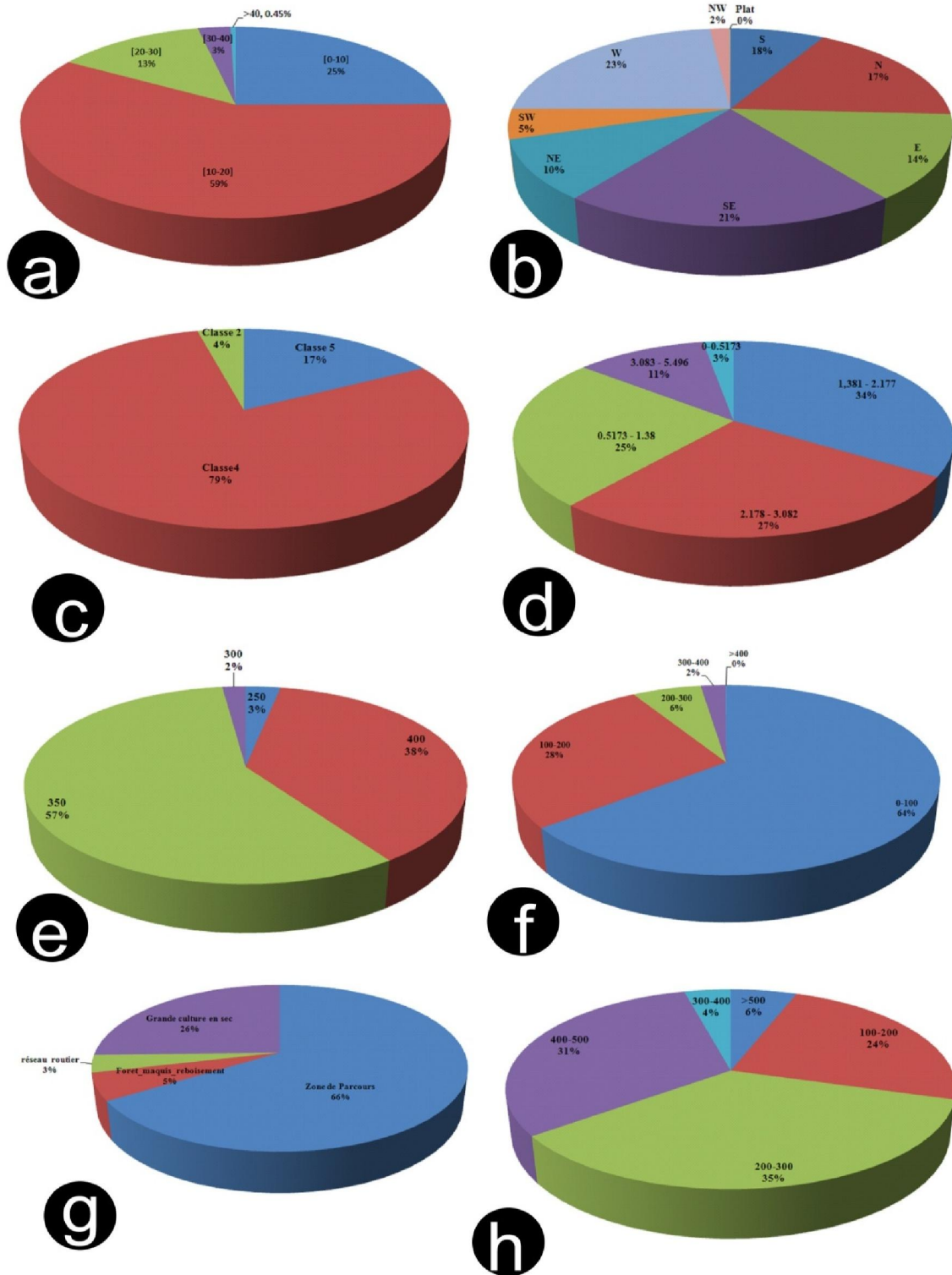


Figure 36 : Relation entre la distribution spatiale des glissements de terrain et (a) pente, (b) Aspect, (c) lithologie, (d) densité des linéaments, (e) précipitations, (f) distance par rapport aux cours d'eau,

(g) occupation du sol et (h) Altitude.

IV.3 Les facteurs causatifs des glissements de terrain

Les processus à l'origine des glissements de terrain sont très complexes et diversifiés ; la géologie, le relief et l'exposition de la pente sont des paramètres fondamentaux plus ou moins constants sur de longues périodes.

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence déstabilisante sur un versant tels que l'aspect de la pente, l'altitude, la géologie, la densité des linéaments, la distance par rapport aux réseaux hydrographiques et d'autres facteurs déclenchant liée à la précipitation et la circulation des eaux souterraines ainsi que les tremblements de terre qui permettent déclencher ou réactiver les mouvements de terrain.

Dans cette étude neuf paramètres sont intégrés dans un environnement SIG tels que la lithologie, pente, direction de la pente, altitude, distance par rapport aux cours d'eaux, densité des linéaments, l'occupation du sol et les précipitations afin d'évaluer l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain.

IV.3.1 La pente

présente un paramètre fondamentale dans l'évaluation de la susceptibilité, la variation de la pente influe directement sur le processus de glissements de terrain, plus la pente est forte plus la susceptibilité est élevée, dans ce contexte une carte de pente est établie à partir d'un MNT et recalculée en cinq classes (0 – 10°), (10-20°), (20-30°), (30-40°) et > 40 ° (fig. 37) on utilisant les modules du logiciel ARC –GIS.

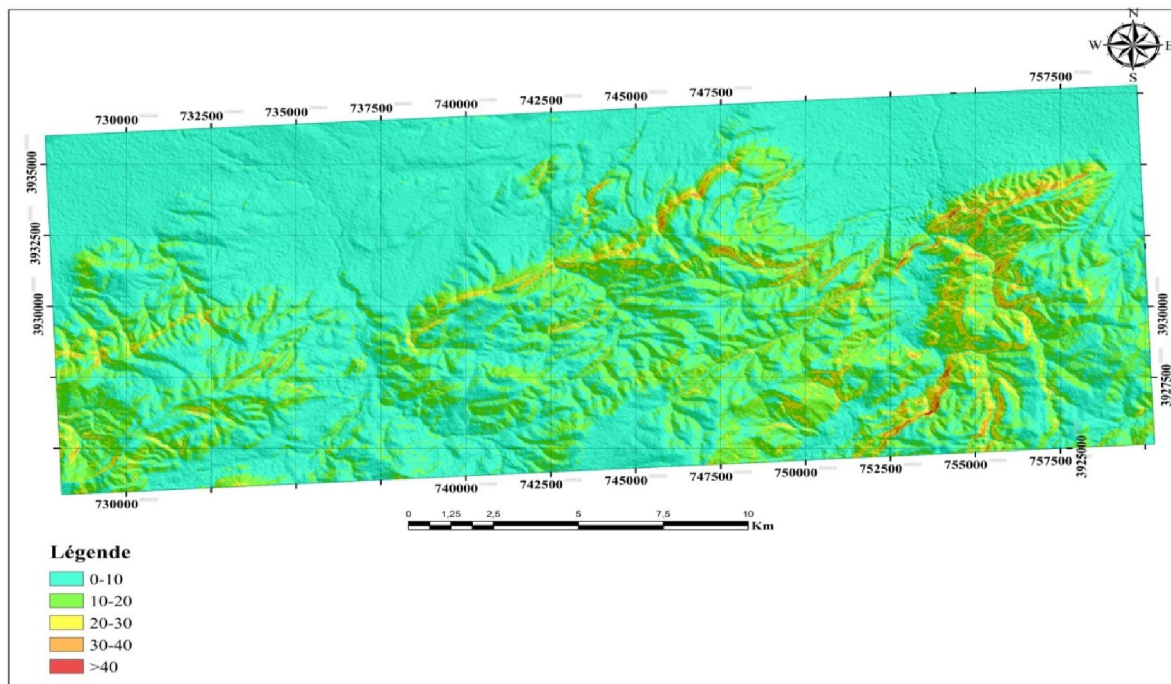


Figure 37 : carte de pente

IV.3.2 Direction de la pente

ce facteur influe sur l'instabilité des versants d'une part par le changement de concentration de l'humidité du sol selon l'exposition de la pente par rapport aux pluies et vents et d'autre parts l'orientation de la fracturation (tectonique). la direction de la pente est mesuré de (0-360°) suivants la direction des Eguilles de la montre.

L'utilisation du MNT et SIG permettant d'extraire les valeurs de la direction de la pente, la classification de température et précipitations dernière en huit directions (N, N-E, E, S-E, S, S-W, W, N-W) (fig. 38)

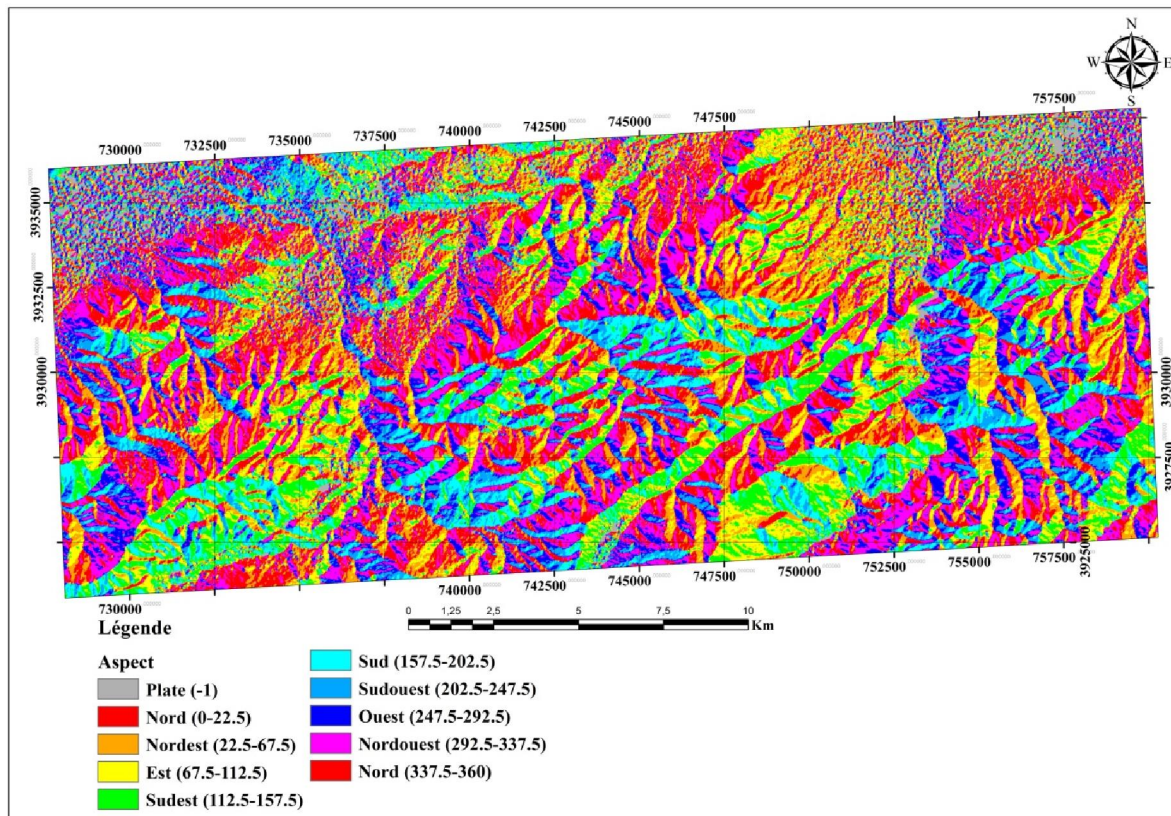


Figure 38 : carte de la direction des pentes (aspect).

IV.3.3 Lithologie

La nature du terrain est l'un des paramètres les plus causatifs au glissement de terrain, les caractéristiques mécaniques du terrain représentent les données de base imposées par la nature et l'histoire du terrain.

Les terrains vulnérables au glissement : par leur nature propre, certains terrains sont prédisposés au glissement, il s'agit :

- des terrains à granulométries fines (sils, limons).
- des argiles, surtout celles constituées de montmorillonite.

La perte de résistance par remaniement des sols rencontrés dans les versants naturels joue un rôle très important dans les glissements de terrains

La variation importante lithologique, dans une même formation géologique peut être à l'origine d'une répartition des mouvements de terrain.

La carte lithologique de la zone d'étude établie par la digitalisation des formations lithologiques de la carte géologique de Saint Denis de Sig a l'échelle 1/50000.

symbole	Age	type de formation	la susceptibilité
a	Actuel	formation du lit majeur des oueds	forte
qa	quaternaire posterieur	alluvions argilo-limoneuses	forte
qec	quaternaire posterieur	Calcaire	nulle
qp	quaternaire posterieur	glacis d'accumulation rubéfiés	forte
qr	quaternaire posterieur	niveau de terrasses rubefiés des oueds	moyen
qs	quaternaire posterieur	:halipèdes (formation hanhydritique) de la plaine d'El Habra	nulle
qv	quaternaire posterieur	glacis polygeniques de l'O Sig	forte
q1b	quaternaire anncien	complexe continental du quaternaire ancien(les encroutement diversifiers)	forte
q1f	quaternaire anncien	eboulis de pente remaniant les formations précédentes	forte
q1t	quaternaire anncien	carapace calcaire	nulle
qc	quaternaire anncien	carapace calcaire	nulle
p	Pliocene	grés et marne sableuse marin	forte
pc	Pliocene	marne sable et conglomérat rouge a passées grises continental	forte
ma	miocene superieur	gypse et marne gypseuse	moyen
mb	miocene superieur	sable fins	forte
mc	miocene superieur	calcaire de la serie gypseuse	nulle
md	miocene superieur	marno-calcaire	moyen
mg	miocene superieur	sable, grés et conglimerat	moyen
ml	miocene superieur	calcaire a lithothamniées	très faible
mm	miocene superieur	marne bleu	moyen
mr	miocene superieur	limons et conglomérat rouge	moyen
ms	miocene superieur	marnes sableuses	forte
mt	miocene superieur	tripolis et marne a tripolis	moyen
c5_4	crétace moyen	marno-calcaire	faible

c8_7	crête superieur	marno-calcaire	faible
------	-----------------	----------------	--------

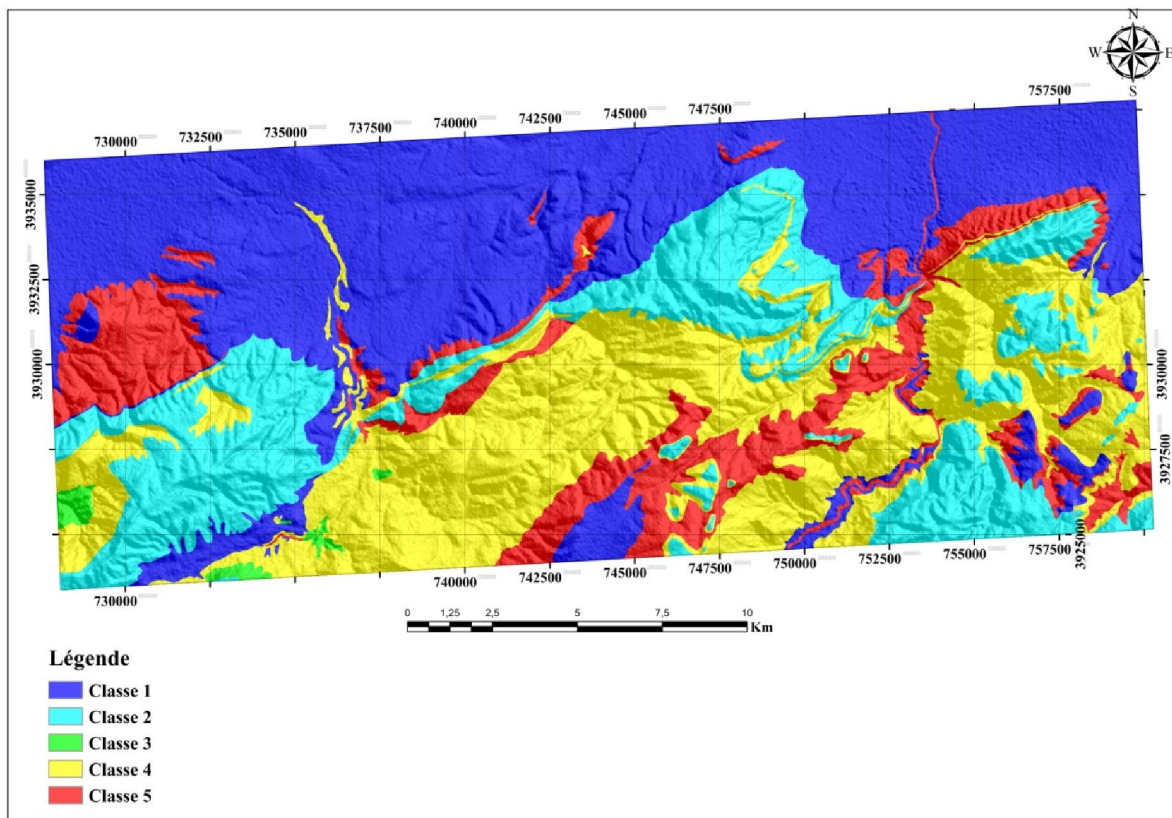


Figure 39 : Carte lithologique de la zone d'étude

IV.3.4 La densité des linéaments

Les linéaments sont des lignes significatives du paysage révèlent l'architecture caché du sous sol rocheux, c'est des porteurs d'information sur les structures qu'on peut extraire dans des images infra rouge et Radar prévenante de capteur satellitaire et du MNT.

Il existe plusieurs cause naturelles à l' origine de linéaments : ligne de crêtes topographiques, surface de glissements, contacte entre formation de lithologie différentes, ligne de fracture ou de faille, etc... Comme ils peuvent aussi avoir des causes d'origine humaine comme les limites des cultures, les routes et autres construction dans ce cas ils ne sont pas liés a la géologie.

L'extraction des linéaments nécessite plusieurs logiciels pour la cartographie des linéaments dans la zone d'étude. Le système d'information géographique (SIG) présente l'outil fondamental pour entamer cette étude.

A partir du MNT ont pu générer la carte des pentes, la carte des orientations des pentes, la carte de la courbure et les reliefs ombres. Dans cette étude, nous avons utilisé les reliefs ombres comme paramètre de cartographier les linéaments de la zone d'étude, La réalisation des reliefs ombrés par une source lumineuse à différents angles d'azimute ($80^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 260^\circ, 300^\circ, 330^\circ$). Deux images générées par la combinaison des trois premières directions d'élimination ($80^\circ, 120^\circ, 150^\circ$) et trois dernies direction ($260^\circ, 300^\circ, 330^\circ$).

Dans ce travaille, nous avons choisi un filtre utilise une méthode de lissage soustractive pour aiguiser une image. Tout d'abord, un filtre moyen est appliqué à l'image. L'image moyenne conserve toutes les informations à faible fréquence spatiale, mais a ses caractéristiques à haute fréquence, tels que les bords et les lignes, atténué. Par conséquent, l'image mise en moyenne est soustraite de l'image originale et l'image de différence résultante sera principalement les arêtes et les lignes restantes. Une fois que les bords sont détermines de cette manière, l'image différentielle est ajouté à nouveau à l'image originale pour obtenir une image de contour amélioré. L'image résultante sera plus claire en détail à haute fréquence (Richards, J.A., Jia, X, 1986). L'expérimentation avec ce filtre de taille $3 \times 3, 5 \times 5, 9 \times 9, 11 \times 11, 13 \times 13$ donne des déférents résultats nous a permis de déduire que le filtre véritable est 5×5 .

L'extraction des linéaments à partir des deux images filtrées contient des valeurs de 0 à 255, est basée sur le module line sur logiciel PCI Géomatica. Finalement, deux cartes de linéaments ont été dressées, ces fractures ont été obtenus par la méthode d'extraction automatique, pour éviter la répétition des linéaments le fusionnement de ces deux dernières cartes nous a permis d'obtenir une résultante cartographique en linéaments.

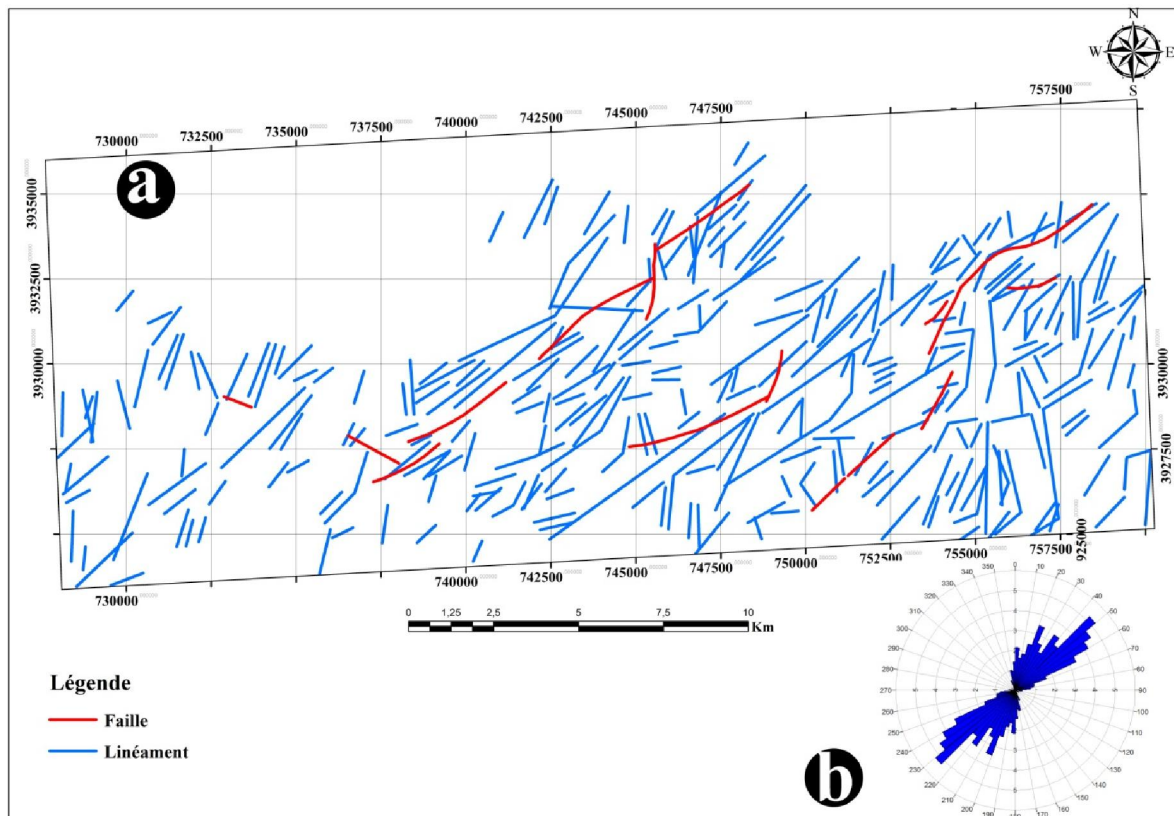


Figure 40 : carte des linéaments

Le traitement des images ombrées nous a permis de détecter les linéaments de la zone d'étude (fig. 40), les linéaments totaux étant la somme des linéaments obtenus par les deux images ombrées, la direction majoritaire est orientée selon la direction la première classe N-E avec un taux de 59 %. La deuxième classe étant orientée selon la direction N avec 28% soit une troisième classe orientée E est représenté par 11%. Finalement la direction minoritaire est S-E représenté par 2% qui reste négligeable.

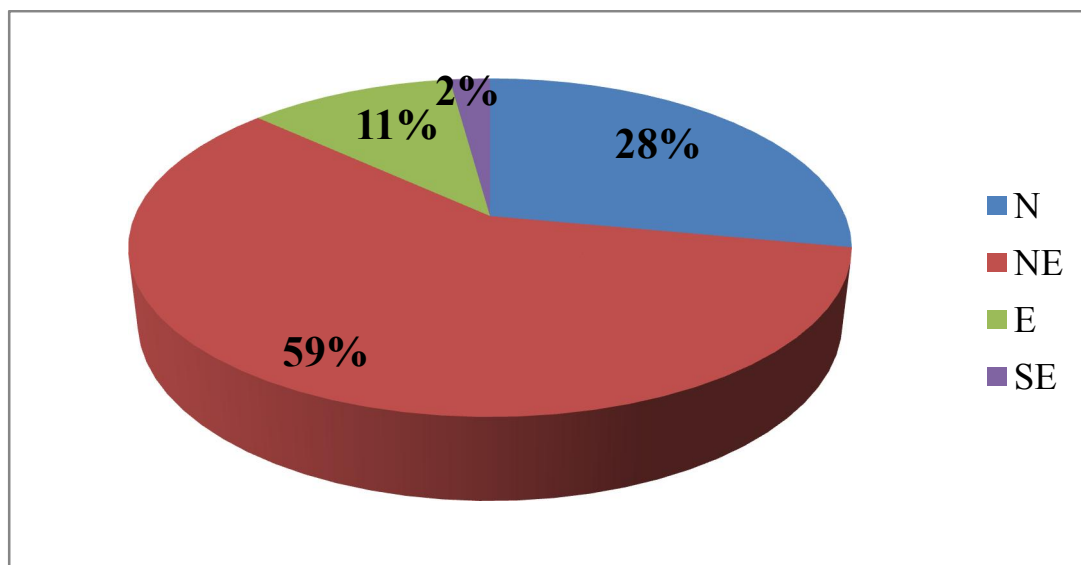


Figure 41 : traitement statistique du pourcentage des directions de linéaments

La carte de densité représente le nombre de linéaments par la superficie (nombre/km²). La densité de linéaments indique le degré de la fracturation de la roche. La zone d'étude est caractérisée par une densité variée entre 0 et 6 (fig.42).

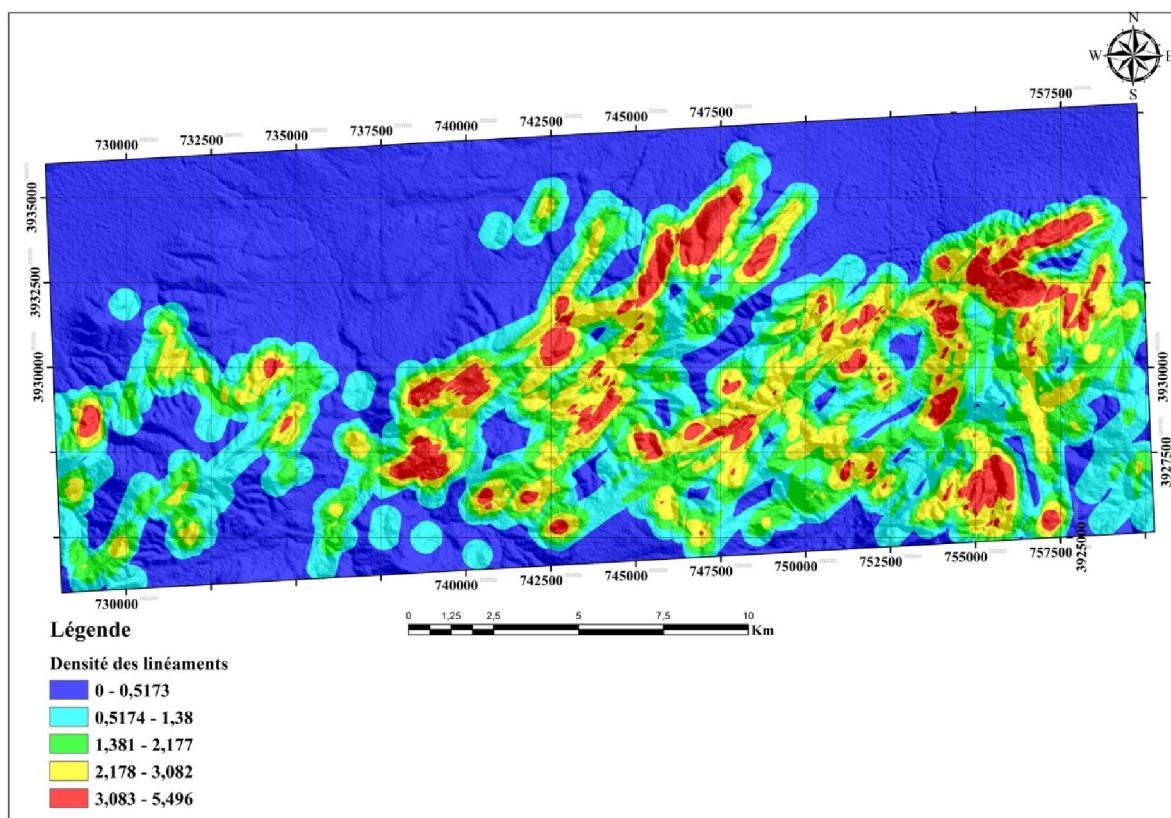


Figure 42 : carte de densité des linéaments

IV.3.5 Précipitations

Les précipitations représentent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre sous forme liquide ou solide

Elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

Les précipitations sont constituées de gouttelettes dont les dimensions sont suffisantes pour avoir une vitesse de chute appréciable

Le volume et la constance des précipitations participent au déclenchement des glissements de terrain, les zones caractérisées par des fortes précipitations sont plus susceptibles aux glissements de terrain

La carte des précipitations des moyennes annuelles est réalisée à partir de la carte des précipitations du Nord Algérie ANRH 2007 et recalculée en quatre zones (250), (300), (350) et (400mm /an) (fig. 43)

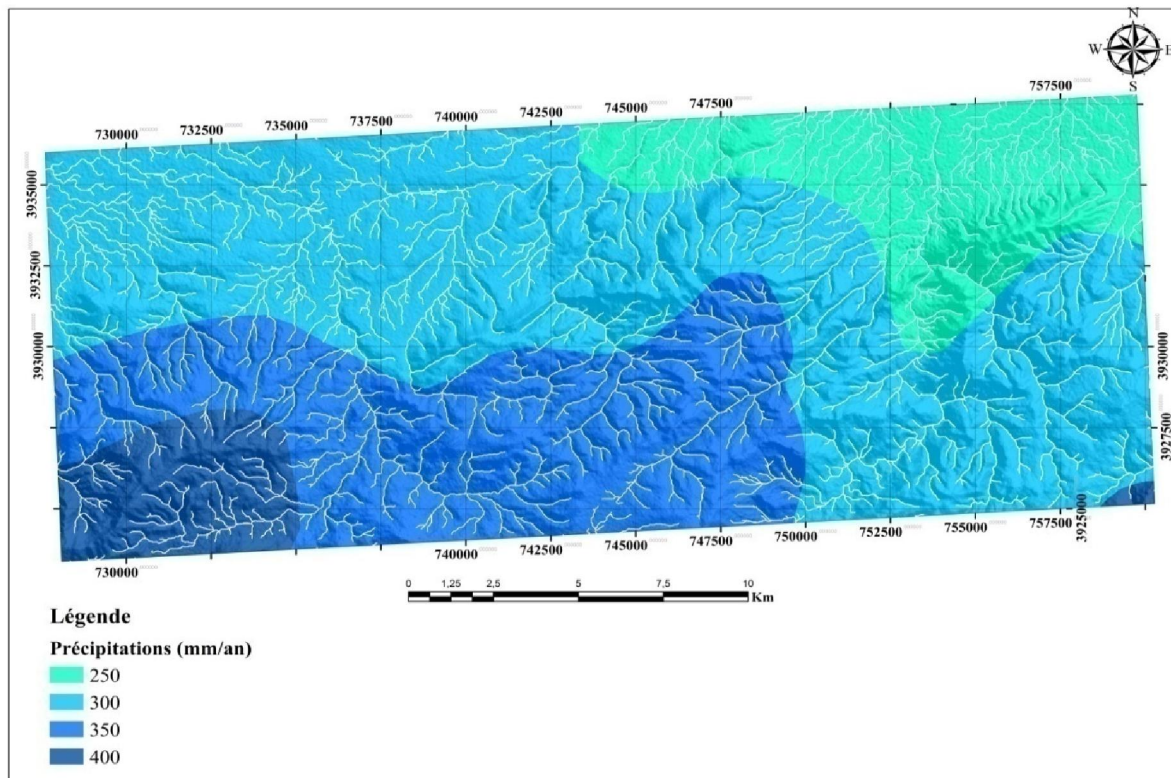


Figure 43 : Carte des précipitations de la zone d'étude.

IV.3.6 Distance par rapport au cours d'eau

La proximité aux cours d'eaux augmente le degré de la susceptibilité aux glissements de terrain à cause de l'érosion causée par le courant d'eaux qui au niveau de pied du versant, la carte a été réalisée par la classification des zones Buffer en six classes (0-100), (100-200), (200-300), (300-400), (400-500), (>500m) (fig. 44)

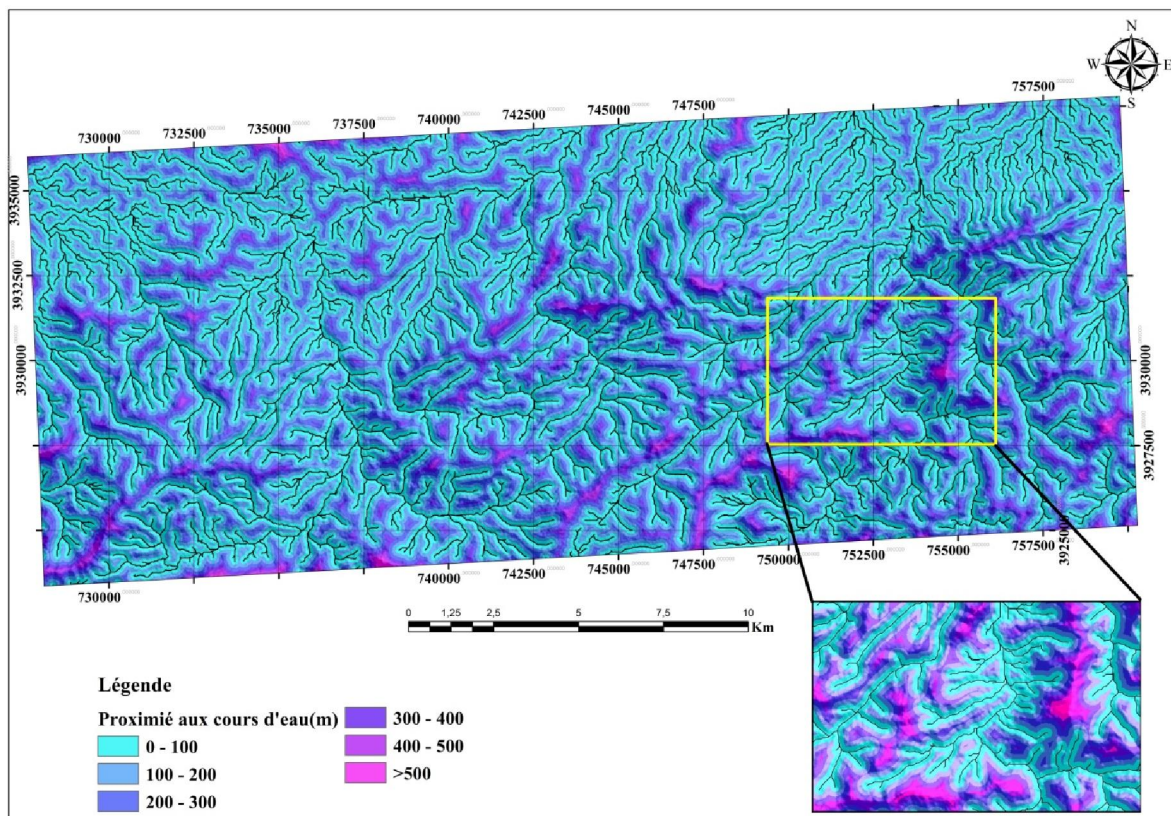


Figure 44 : la carte des distances par rapport aux cours d'eau

IV.3.7 Occupation des sols

La nature d'occupation des sols joue un rôle très important dans la stabilité des versants ou les zones reboisées sont les moins sujettes aux glissements de terrains par rapport ou zone de faible densité du couvert végétale et les sols nus présentent les zones les plus susceptibles. Dans ce contexte, la carte d'occupation du sol est établie par la digitalisation des trois cartes d'occupation du sol à l'échelle de 1/25000 (BENEDER), onze classes ont été déterminées (bâties, culture agricole, culture maraîchère, forêt maquis reboisement, grande culture en sec, oléiculture, viticulture, zone de parcours, cours d'eau, réseau routier, hydrographie)

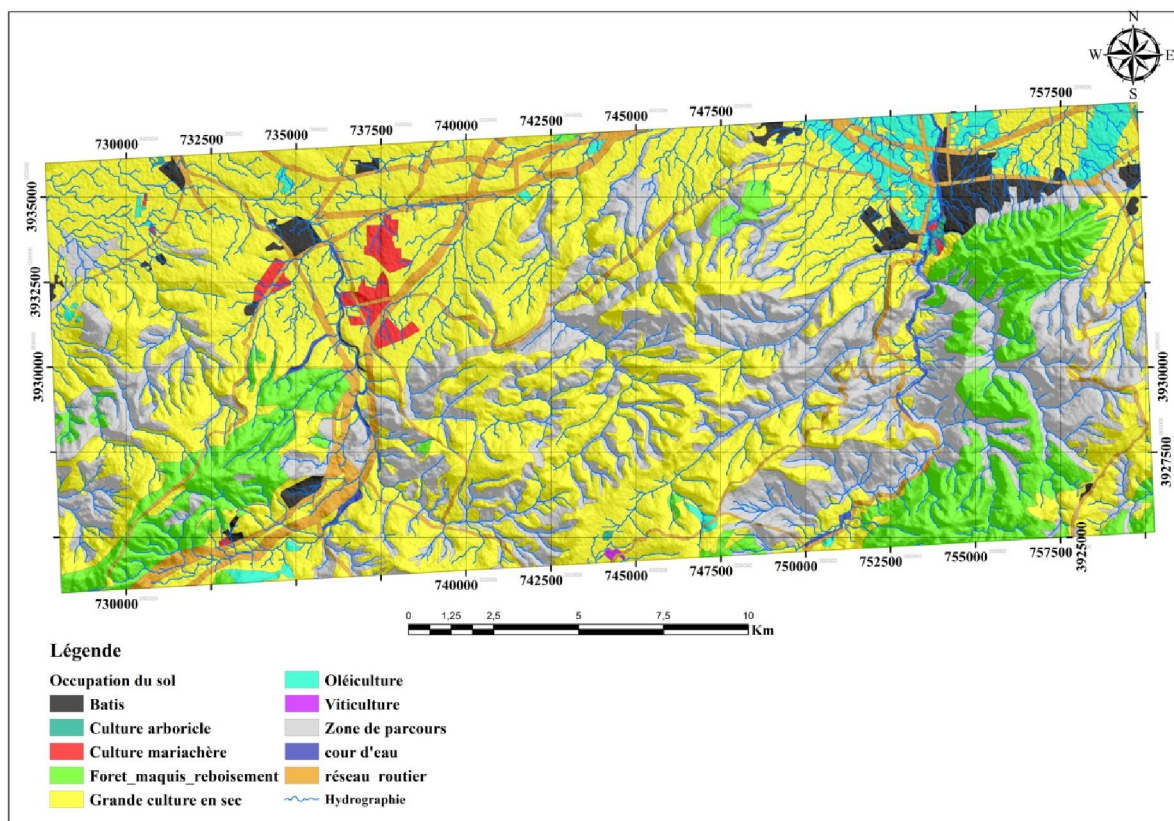


Figure 45 : carte d'occupation du sol de la zone d'étude

IV.3.8 L'altitude

L'altitude c'est l'élévation verticale d'un lieu par rapport a un niveau de base qui est le plus souvent le niveau de la mer, c'est un facteur très important qui influe sur les glissements de terrain du fait que la différence de plusieurs paramètres entre les différents niveaux d'altitude comme température, précipitation l'intensité de la pesanteur qui varie en fonction de l'altitude et climat ont un impacte directe sur l'activité et déclanchements des glissements de terrain la carte des altitude de la zone d'étude est générer a partir d'un MNT et recalciée en six classes (<100),(100-200),(200-300),(300,400),(400-500),(>500) (fig. 46).

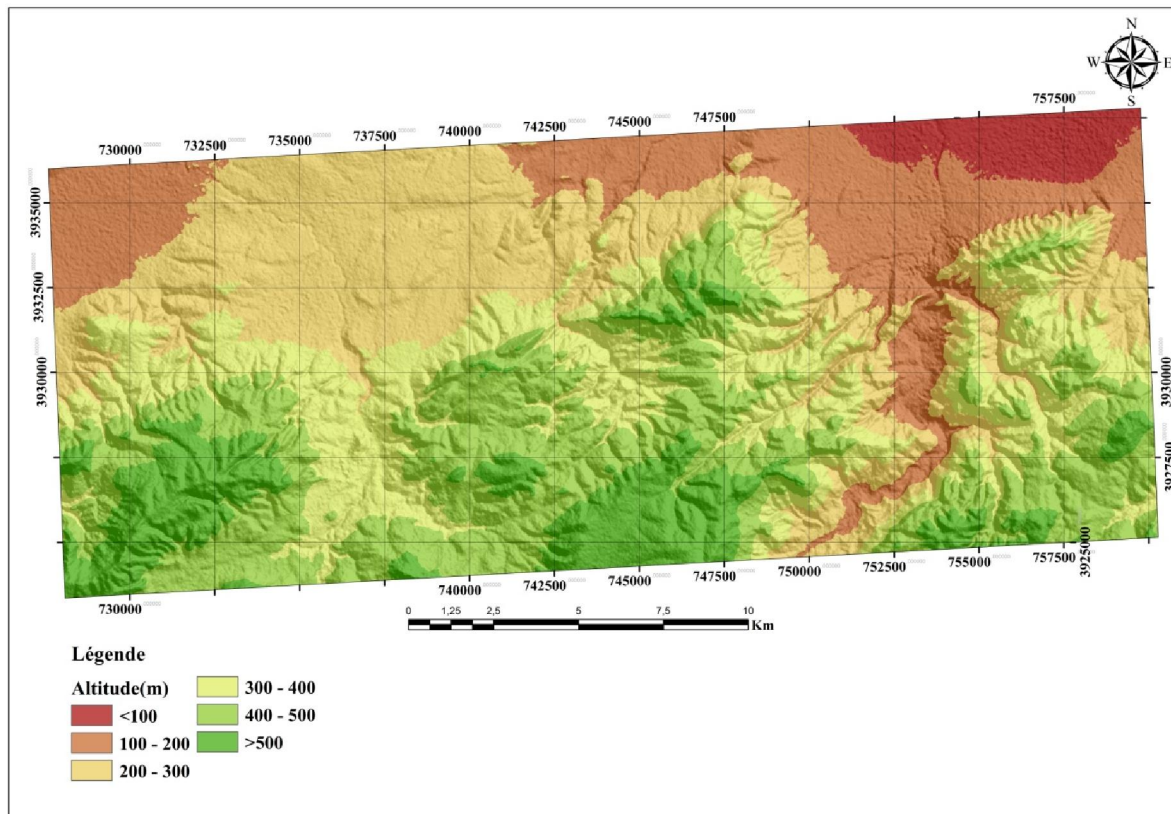


Figure 46 : cartes des altitudes de la zone d'étude

IV.4 Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain et interprétations des résultats

Dans ce travail une méthodologie est établie à fin de cartographie des zones sujettes aux glissements de terrain. Cette démarche consiste premièrement à établir une carte d'inventaire des glissements de terrain (voir inventaire des glissements de terrain). Deuxièmement, une évaluation d'indice de la susceptibilité par l'application de quatre méthodes statistiques dites Ratio de Fréquence (Fr), Valeur Informatrice (VI), Théorie de l'évidence (Weight Of Evidence-WOE) et Analyse multicritère (AHP). Troisièmement, cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain par la classification de l'indice de la susceptibilité globale et validation des résultats, l'organigramme suivant représente la méthodologie utilisée.

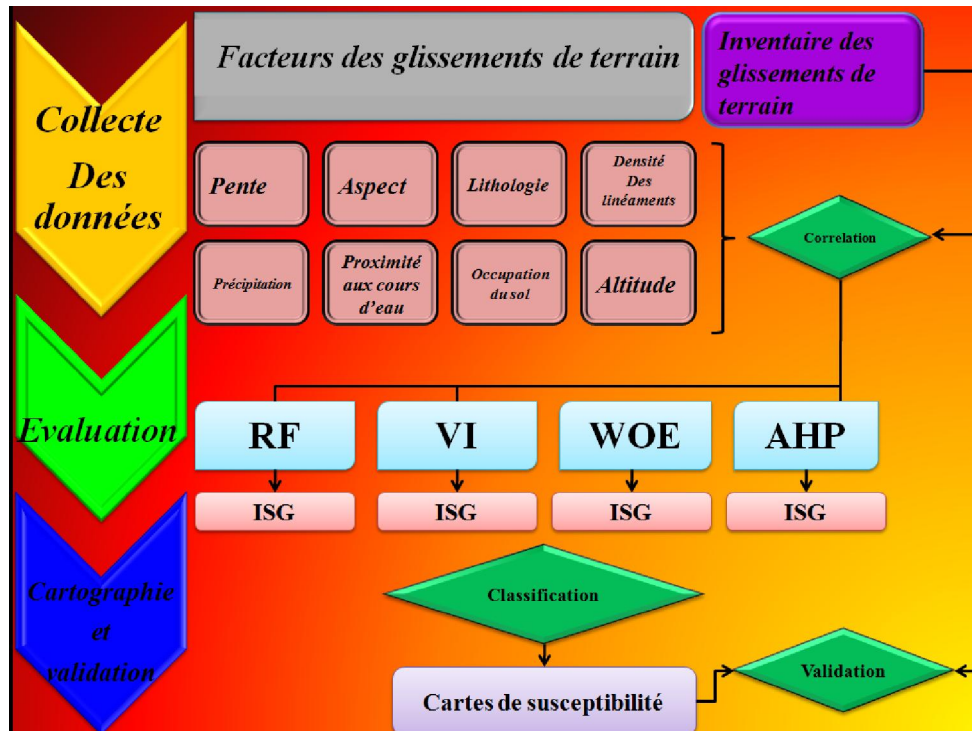


Figure 47 : organigramme de la méthodologie utilisée dans cette étude

IV.4.1. Les méthodes statistiques

IV.4.1.1 La valeur informative

Présente l'une des méthodes statistiques bivariées les plus utilisées dans ce domaine. Cette méthode est proposée par (YIN and Yan 1988) pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain, elle se base sur la combinaison de l'inventaire des glissements de terrain avec chaque facteur utilisé.

En premier lieu, la méthode s'appuie sur une analyse statistique utilisant l'équation (1) :

$$W(i) = \frac{N_{pix}(Si)/N_{pix}(Ni)}{\sum N_{pix}(si)/\sum N_{pix}(Ni)} \quad (1).$$

$W(i)$ est le poids de chaque classe (par exemple le poids de la classe 10° de la pente), $N_{pix}(Si)$ est le nombre de pixel de glissement dans la classe i , $N_{pix}(Ni)$ est le nombre de pixel de la classe i

Dans une seconde étape la probabilité d'occurrence des glissements des terrains dans chaque classe est déterminée par l'équation (2) :

$$Pr(i) = \ln \frac{Npix(Si)/Npix(Ni)}{\sum Npix(si)/\sum Npix(Ni)} \quad (2).$$

Enfin l'indice de susceptibilité au glissement (ISG) de terrain est déterminé par la sommation de l'ensemble des facteurs (équation 3) après l'intégration de la probabilité d'occurrence des glissements dans chaque classe. Des résultats positifs et négatifs des ISG signifient que les plus fortes valeurs nous indiquent une grande possibilité de glissement (Tableau)

$$ISG = \sum_{i=1}^n \ln \frac{Npix(Si)/Npix(Ni)}{\sum Npix(si)/\sum Npix(Ni)} \quad (3).$$

IV.4.1.2 Ratio de fréquence

Est une méthode statistique quantitative bivariée basée sur l'équation suivante :

$$ISi = \frac{Ami/Ai}{Amt/At} \quad (4)$$

Ou : ISi est l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain pour une classe i d'un paramètre, Ami est l'aire occupée par les glissements de terrain dans une classe i d'un paramètre, Ai est l'aire occupée par une classe i d'un paramètre, Amt est l'Aire occupée par les glissements de terrain sur la totalité de la zone d'étude, At est l'aire total de la zone d'étude.

Pour calculer l'indice de susceptibilité globale ISG on se basant sur l'équation n° 5 :

$$ISG = RF1 + RF2 + RF3 + \dots + RFn \quad (5)$$

Ou RF est les valeurs de l'indice de susceptibilité pour chaque paramètre.

Le calcul de ratio de fréquence de chaque classe est établie (tableau), dont la valeur moyenne est égale 1, si la valeur est supérieurs a 1 ca veut dire qu'on a une très bonne corrélation entre le glissement de terrain et la classe i du paramètre.

IV.4.1.3 La Théorie de l'évidence

Présente l'un des méthodes statistique Bayesienne utilisé dans la science de la terre, elle utilisée pour la première fois pour identifié la potentialité des minéraux par (Bonham-

Carter, G. F. (1989)) ainsi que dans d'autres domaines tel que la cartographie de la susceptibilité aux inondations et aux glissements de terrain. Cette méthode basée sur la combinaison de l'inventaire de glissements de terrain (Présence ou absence) avec chaque facteur.

Pour calculer la pondération de chaque paramètre on se base sur les équations suivantes: W^+

$$W^+ = \frac{\frac{\text{L'aire de glissement de la classe considérée}}{\text{L'aire total des glissements de terrain}}}{\frac{\text{L'aire des zones stables de la classe considérée}}{\text{L'aire total des zones stables}}} \quad (6)$$

$$W^- = \frac{\frac{\text{L'aire de glissement dans les autres classes}}{\text{L'aire total des glissements de terrain}}}{\frac{\text{L'aire des zones stables dans les autres classes}}{\text{L'aire total des zones stables}}} \quad (7)$$

$$WC = W^+ - W^- \quad (8)$$

Où : W^+ est la pondération positive de la classe i , W^- est la pondération négative de la classe i , WC est la pondération de classe i qui indique la corrélation entre les glissements de terrain et les paramètres de prédisposition.

Le calcul de W^+ , W^- et WC est entamé dans le tableau, des résultats positifs et négatifs du WC qui nous indique que les valeurs négatives indiquées une mauvaise corrélation et vice versa.

IV.4.1.4 Analyse Hiérarchique des procédés (AHP)

L'analyse hiérarchique multicritère, développée par le mathématicien Thomas Saaty (1977), c'est une méthode multicritère d'aide à la décision intégrant plusieurs critères et arrivant à un choix justifié, la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise.

L'AHP est utilisé comme un moyen de résolution de plusieurs problèmes dans différents domaines est spécialement dans la géoscience, (Stefanidis, S., and Stathis, D. 2013 ; Rahmati, O. et al 2016 ; Siddayao, G. P., 2014 ; Roukh, Z., And Nadji, A. 2018) appliquant la méthode statistique AHP pour cartographie de la susceptibilité aux inondations. D'autres

chercheuses comme (Pourghasemi, H. R., et all 2012 ; Moradi, M., et all 2012) utilisant aussi cette méthode pour cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Cette méthode basée essentiellement sur structuration hiérarchique d'un problème, structuration des priorités et calcul de la cohérence.

Dans cette étude, la méthode AHP a été utilisée pour calculer la pondération de chaque facteur. Pour atteindre ce but, une matrice de comparaison par paire a été établie à la faveur d'une échelle graduée de 1 à 9 qui indiquée le degré d'importance (tableau).

Tableau 10 : Echelle de comparaison

Echelle	Définitions	Explications
1	importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	un élément est un peu plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement in élément par rapport à un autre
7	un élément est beaucoup plus important que l'autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2,4,6,8	Utilisés pour des jugements intermédiaires par rapport à ceux listés ci-dessus.	

Une fois les poids sont calculés, la cohérence des jugements doit être calculée afin de valider les priorités obtenues. Pour calculer la cohérente des jugements utilisés dans la matrice de comparaison en se basant sur l'équation suivante : $CR = \frac{IC}{IA}$

$$RC = CI/IA \quad (2)RC = CI/IA \quad (9)$$

Dans RC est le ratio de consistance, CI est l'indice de cohérente estimé selon l'équation (10) :

$$IC = \lambda_{max} - 1/n - 1 \quad (10)$$

λ : est la valeur propre, calculer à partir de la matrice de comparaison et n : le nombre de comparaison

IA Présente l'indice aléatoire définis par Saaty selon le suivant tableau :

Tableau 11 : Indice Aléatoire (IA)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Dans cette étude l'utilisation du module AHP intégré dans le logiciel ArcGIS nous a permis de calculer la pondération de chaque paramètre (fig. 48).

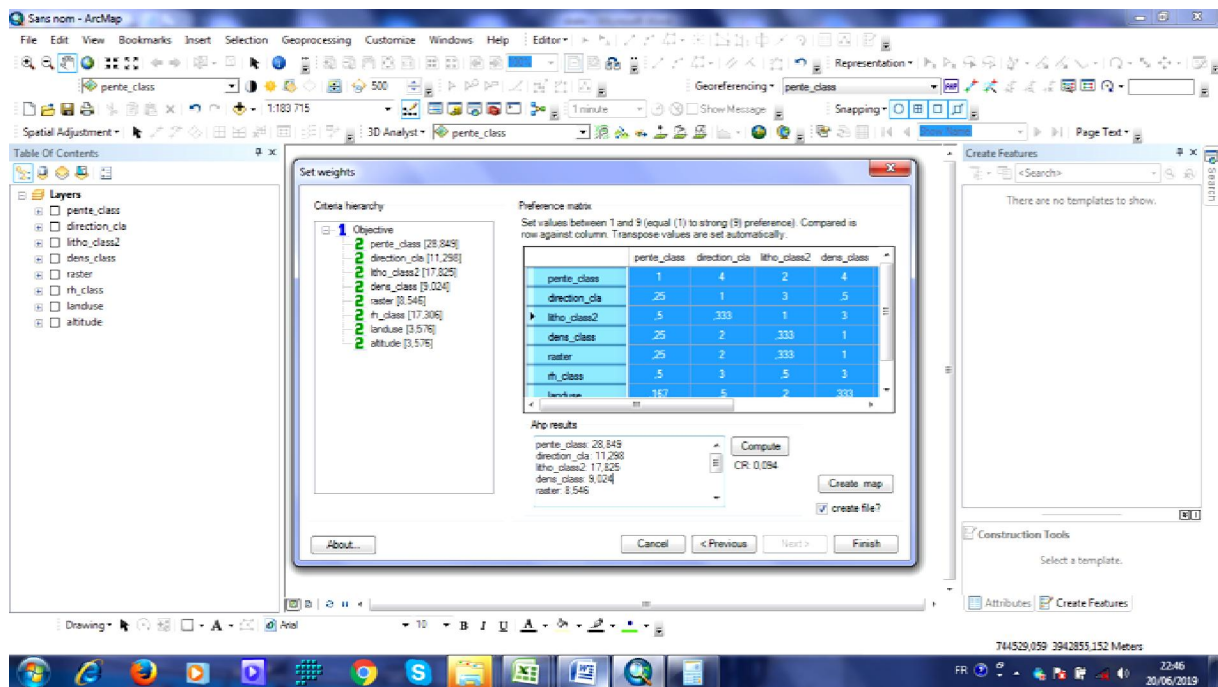


Figure 48 : utilisation du module AHP sur ArcGIS

La matrice de comparaison par pair obtenue (tabl.12) montre que le paramètre le plus influencé aux glissements de terrain est la pente avec une pondération de 0.228 ainsi que la lithologie et la distance par rapport aux cours d'eau. Les paramètres les moins influencés sur l'occurrence des glissements de terrain sont l'occupation du sol et l'altitude.

Paramètre	Pente	Aspect	Lithologie	Densité des linéaments	Précipitation	Proximité au cours d'eau	Occupation du sol	Altitude	Pondération
Pente	1	4	2	4	4	2	6	6	0.288
Aspect	1/4	1	3	1/2	1/2	1/3	2	2	0.112
Lithologie	1/2	1/3	1	3	3	2	5	5	0.178
Densité des linéaments	1/4	2	1/3	1	1	1/3	3	3	0.090
Précipitation	1/4	2	1/3	1	1	0,5	2	2	0.085
Proximité au cours d'eau	1/2	3	1/2	3	2	1	5	5	0.173
Occupation du sol	1/6	1/2	1/5	1/3	1/2	1/2	1	1	0.035
Altitude	1/6	1/2	1/5	1/3	1/2	1/2	1	1	0.035
CR=0.094									

Tableau 12 : matrice de comparaison par pair et pondération de chaque paramètre

IV.4.2 Interprétation des résultats

L'exploitation des données dérivées suite à la combinaison des différents facteurs avec l'inventaire des glissements de terrain et par l'utilisation des équations spécifique a chaque méthode, la pondération de chaque calasse est calculée dans le tableau suivant :

Tableau 14 : pondération de chaque classe des paramètres utilisé dans cette étude basée sur la méthode statistique ratio de fréquence, valeur informative, la théorie de l'évidence et AHP

Paramètre	Classe	Nombre de pixel	Pourcentage de la classe	Pourcentage des glissements	FR	VI	Indice selon la densité	W+	W-	C	Poids AHP
Pente(°)	0 - 10	1759734	0,673730678	0,24886064	0,36937703	-0,4335789	0,42546648	-0,9979085	0,8379506	-1,8358591	0,01225343
	10 - 20	706082	0,270330121	0,58491245	2,16369692	0,33414764	1	0,77546774	-0,56545143	1,34091918	0,0288
	20 – 30	132384	0,050684457	0,13228592	2,60998989	0,41559003	0,22616363	0,96436012	-0,09014597	1,05450609	0,00651351
	30 - 40	13289	0,005087818	0,02938355	5,77527401	0,7605238	0,0502358	1,76884112	-0,0248005	1,79364162	0,00144679
	> 40	436	0,000166927	0,00455745	27,3020916	1,43514713	0,00779168	3,3948006	-0,00441496	3,39921556	0,0002244
Aspect	Plat	59886	0,02292792	0,0007196	0,03138519	-1,50432403	0,00309917	-3,46458842	0,02254948	-3,48713791	0,00034711
	N	448266	0,17162285	0,17606141	1,02586229	0,01004028	0,75826446	0,02559732	-0,00538576	0,03098308	0,08492562
	NE	365636	0,13998717	0,0975054	0,69653093	-0,15810838	0,41993802	-0,36263845	0,04837752	-0,41101597	0,04703306
	E	303316	0,11612738	0,13828256	1,19078347	0,07478401	0,59555785	0,1752127	-0,02546451	0,20067721	0,06670248
	SE	286127	0,10954641	0,20700408	1,88964734	0,27533197	0,89152893	0,63927771	-0,11626756	0,75554527	0,09985124
	S	218225	0,08354949	0,08227393	0,98473285	-0,00773036	0,35433884	-0,01545604	0,00139737	-0,0168534	0,03968595
	SW	200455	0,07674608	0,01703046	0,22190662	-0,65487853	0,07334711	-1,50799814	0,06288188	-1,57088002	0,00821488

Chapitre IV

Cas d'étude

	W	261235	0,10001627	0,0489326	0,48924637	-0,31152118	0,2107438	-0,7164873	0,05538602	-0,77187332	0,02360331
	NW	468779	0,17947644	0,23218997	1,29370726	0,11078723	1	0,25847951	-0,0666118	0,32509131	0,112

Lithologie	Classe 1	998012	0,38209841	0	0	0	0	0	0	0	0
	Classe 2	504972	0,19333334	0,04000482	0,20692147	-0,68727919	0,050756765	-1,57795563	0,1746274	-1,75258303	0.0090347
	Classe 3	15538	0,00594887	0	0	0	0	0	0	0	0
	Classe 4	751227	0,28761442	0,788167249	2,74036071	0,43472298	1	1,01363738	-1,21505342	2,2286908	0.178
	Classe 5	342175	0,13100496	0,171827931	1,31161393	0,11472127	0,218009479	0,27223717	-0,04826394	0,32050111	0.03880569
Densité des linéaments (km/km²)	0 - 0,51	1185867	0,454020485	0,026745023	0,058907084	-1,23088109	0,078742938	-2,83480325	0,58057402	-3,41537727	0.00708686
	0,51 - 1,38	514074	0,196818131	0,247421444	1,257106968	0,09832361	0,728460452	0,22963675	-0,06527754	0,29491429	0.06556144
	1,38 - 2,17	427344	0,163612724	0,339649796	2,075937545	0,31616566	1	0,54645869	-0,23699526	0,78345395	0.09
	2,17 - 3,08	340810	0,130482357	0,271647877	2,081874387	0,317405899	0,799788136	0,73673936	-0,1776738	0,91441316	0.07198093
	3,08 - 5,49	143829	0,055066304	0,11453586	2,079962743	0,317006932	0,337217514	0,73581456	-0,06520433	0,8010189	0.03034958
Distance par rapport aux cours d'eau (m)	0 - 100	1187425	0,45461698	0,64092108	1,40980455	0,14811028	1	0,34476434	-0,42279188	0,76755622	0.173
	100 - 200	827835	0,31694452	0,2735668	0,86313782	-0,06496848	0,42683383	-0,14761911	-0,14103651	-0,00658259	0.07384225

	200 - 300	426302	0,16321378	0,06248501	0,38284149	-0,41802963	0,09749251	-0,96210874	0,11404971	-1,07615845	0.0168662
	300 - 400	141918	0,05433466	0,02266731	0,41717951	-0,38072566	0,03536677	-0,87610342	0,03304562	-0,90914905	0.0061184
	400- 500	25403	0,00972578	0,0003598	0,03699431	-1,43291373	0,00056138	-3,30007054	0,00944381	-3,30951435	0.000097
	>500	3041	0,00116428	0	0	0	0	0	0	0	0
Précipitation (mm/an)	250	409260	0,15668909	0,03058287	0,19518189	-0,8892625	0,05329154	-1,63639749	0,1398383	-1,77623579	0.004529
	300	1311790	0,50223131	0,02026865	0,0403572	-0,1276087	0,0353187	-0,29222467	0,22800147	-0,52022613	0.055583
	350	711342	0,27234407	0,57387863	2,10718243	0,32265351	1	0,74890377	-0,5364303	1,28533409	0.085
	400	179532	0,06873554	0,3752698	0,29487875	-0,5314051	0,653918	-1,22344662	0,05090179	-1,27434841	0.00300
Altitude(m)	< 100	81259	0,03111077	0	0	0	0	0	0	0	0
	100 - 200	408742	0,15649071	0,05684817	0,36326862	-0,4408209	0,18147014	-1,01479799	0,11206231	-1,1268603	0.006351
	200 - 300	687331	0,26315112	0,23914608	0,90877848	-0,0425907	0,76339969	-0,0960651	0,41126357	-0,50732867	0.026718
	300 - 400	544439	0,20844358	0,05684817	1,14729404	0,17587397	0,18147014	0,40886173	-0,0629098	0,4717716	0.006351
	400 - 500	608334	0,23290638	0,31326457	1,34502357	0,1766853	1	0,41099391	-0,1672183	0,57821221	0.035
	>500	281820	0,10789743	0,04005757	0,37125599	-0,4313753	0,12787136	-0,99234467	0,0734715	-1,06581618	0.004475

L'intersection entre les glissements de terrain et la pente montre que la classe la plus susceptible est la classe $>40^\circ$ suite à l'application des trois méthodes statistiques Rapport de fréquence, valeurs informatives et la théorie de l'évidence avec les valeurs maximales successives par ordre 27, 30, 1.43 et 3.39, par contre par la méthode AHP on n'observe que la valeur maximale 0.02 pour la classe [10-20], ainsi que la classe la moins susceptible est [0-10°] de valeurs successives 3.6, -0.43° et -1.83° pour les mêmes méthodes (FR, VI et WOE) par contre la méthode AHP la valeur minimale 0.00022° est située à la classe [$>40^\circ$].

La combinaison entre l'aspect et la distribution spatiale des glissements de terrain nous indiquant que la direction de pente dominante est la direction SE avec un taux maximal de 1.88 et un taux minimal de 0.22 pour la direction SW suite à l'application de la méthode Rapport de fréquence. L'utilisation de la méthode valeurs informatives indiquée des résultats différents dont la valeur maximale est de 0.27 SE et minimale -1.5 SW. Pour la théorie de l'évidence la valeur maximale est 0.75 pour la direction des pentes SE et minimale -3.48 pour les terrains plats. Les résultats des pondérations suite à l'application de la méthode AHP montre que la valeur maximale est 0.112 pour la direction des pentes NW et une valeur minimale de 0.0003 pour les terrains plats.

Pour la lithologie les résultats obtenus par les quatre méthodes montrent que les terrains les plus susceptibles aux glissements de terrain sont les formations lithologiques de la classe 04 avec des valeurs maximales 2.7, 0.4, 2.22 et 0.17 par l'utilisation des méthodes RF, VI, WOE et AHP successivement. Ainsi les formations lithologiques les moins susceptibles sont la classe 1 et 3 avec une valeur minimale de 0 suite à l'utilisation de la méthode rapport de fréquence, théorie de l'évidence et la méthode AHP par contre la valeur minimale obtenue par la méthode valeur informatives est de -0.68 pour la classe 02.

Suite à la combinaison de l'inventaire des glissements de terrain et la densité des linéaments on utilisant les trois méthodes rapport de fréquence, valeur informative et la théorie de l'évidence, les résultats indiquent que les zones les plus susceptibles est la classe [2.17-3.08] avec des valeurs maximales successives à l'ordre 2.08, 0.31, 0.91, par contre la valeur maximale obtenue par la méthode AHP est 0.09 pour la classe [1.38-2.17]. Les zones caractérisées par une densité de linéaments faible qui varie entre [0-0.51] sont les moins susceptibles aux glissements de terrain suite aux valeurs minimales de l'ordre 0.05, -1.23, -3.45, 0.007 par l'application des quatre méthodes RF, VI, WOE et AHP successivement.

Les résultats de l'application des quatre méthodes montrent que les zones situées à la proximité du cours d'eau sont les plus susceptibles au glissement de terrain ou l'érosion hydrique est très importante favorise le déclenchement des glissements de terrain.

Les trois méthodes rapport de fréquence, valeur informative et AHP ont donné les mêmes résultats pour le têt de précipitation influant sur la susceptibilité aux glissements de terrain avec des valeurs maximales successives d'ordre 2.107, 0.32 et 0.085 pour un moyen de 350mm/an, par contre l'application de la méthode théorie de l'évidence est donnée une valeur de -0.52 pour un moyen de 300 mm/an. Les zones caractérisées par un faible moyen de précipitation sont les moins susceptibles aux glissements de terrain.

L'application des quatre méthodes montre que les zones caractérisées par une forte altimétrie (les reliefs) sont les plus susceptibles aux glissements de terrain ainsi que les zones abruptes aux phénomènes des glissements de terrain ceux qui caractérisées par une altitude faible (les plaines).

D'après l'analyse des résultats de l'application des quatre méthodes rapport de fréquence, valeur informative, théorie de l'évidence et la méthode AHP on observe que les sols les plus susceptibles aux glissements de terrain sont les zones de parcours avec des valeurs maximales successives d'ordre 2.72, 0.4, 1.80, 0.03 ainsi que les valeurs minimales est de 0 obtenu par les deux méthodes rapport de fréquence et AHP les sols les moins susceptibles sont Oléiculture, Culture maraichère, Culture arboricole, cour d'eau, Viticulture et les Bâtis, par contre par la théorie de l'évidence le sol le moins susceptible est la Grande culture en sec avec une valeur de -1.12 par l'application de la méthode valeur informative le sol le moins susceptible est les Forêt maquis reboisement avec une valeur de -0.35.

IV.5 Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

L'exploitation et l'intégration des pondérations dans chaque classe de différents paramètres utilisés sous l'environnement SIG et l'utilisation des module d'Algèbre sur le logiciel ArcGIS par la sommation des facteurs indexés permettant de cartographie la susceptibilité aux glissements de terrain de la région d'Echorfa, dont quatre cartes sont obtenus contient un indice de susceptibilité globale spécifique a chaque méthode utilisé. La classification de l'indice globale de la susceptibilité aux glissements de terrain en cinq classes on se basant sur l'algorithme de classification 'Naturel Breaks jenk' sur ArcGIS permettant d'établir des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain (fig.49).

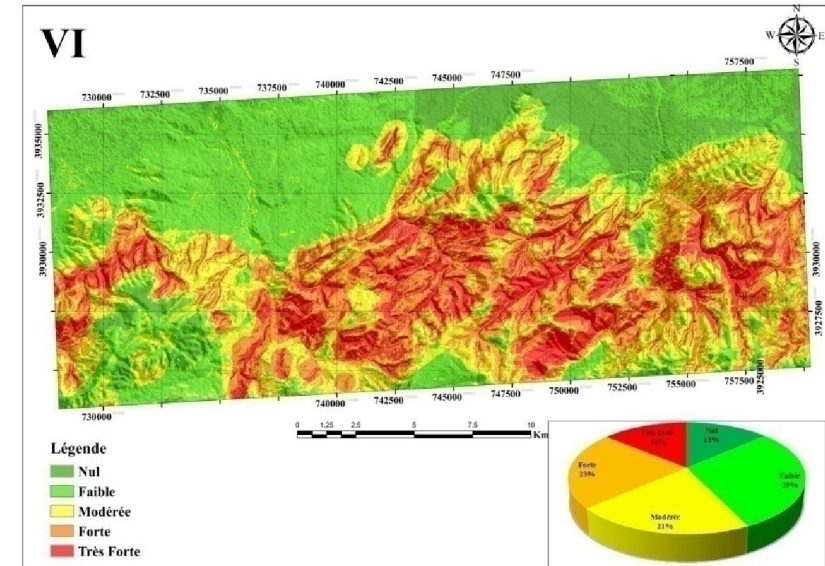
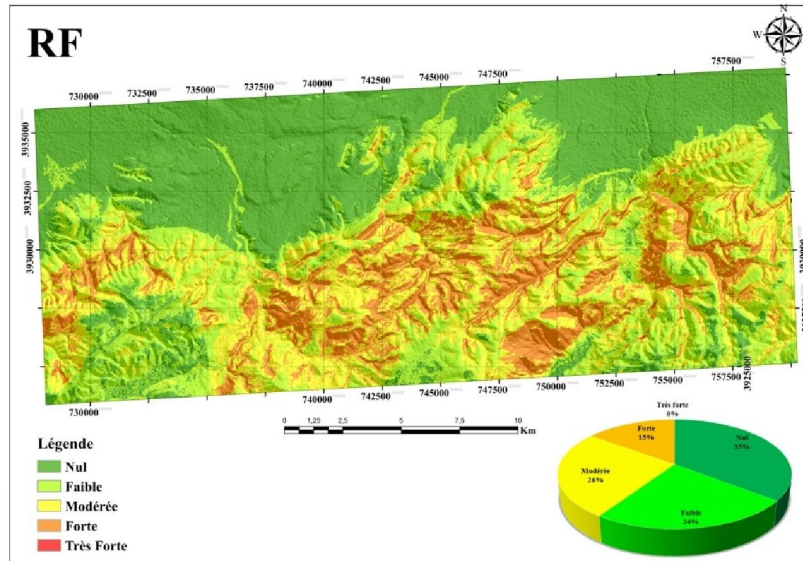
L'indice globale de la susceptibilité aboutie suite au l'application de la méthode statistique rapport de fréquence (RF) varie entre 0.69 et 38.25 leurs classification en cinq classe résultat une carte de susceptibilité avec un taux de susceptibilité de 35% pour la classe Nul (0,69 - 5,25), 24% pour la classe faible (5,25 - 8,49), 26% pour la classe modérée (8,49 - 11,59), 15% pour la classe forte (8,49 - 11,59).

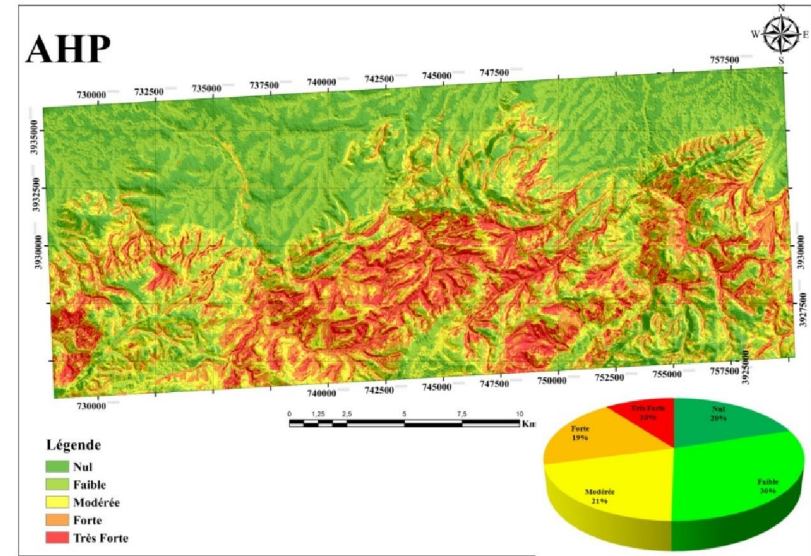
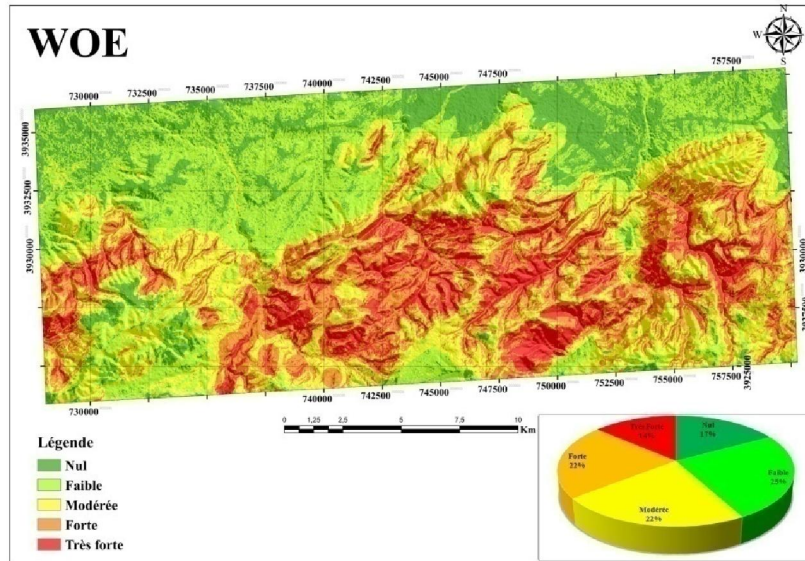
Pour la méthode statistique bivariée Valeur informative(VI), la superficie totale caractérisée par une susceptibilité nulle n'est de 13% de la superficie totale pour un indice de susceptibilité varie entre (-6,23 - -2,73), 29% pour une classe de faible susceptibilité dont l'indice est varié entre (-2,73 - -1,55), une superficie de 21 % pour la classe modérée ou l'indice de susceptibilité est de -1,55 à -0,38, la classe forte (-0,38 - 0,76) avec un taux de 23% et la zones de susceptibilité très forte (0,76 - 2,86) occupé une superficie de 14% du total.

La valeur globale de l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain pour la théorie de l'évidence (WOE) minimale est de - 16.26 et la valeur maximale 9.89, leur classification montre qu'une zone de susceptibilité nulle (-16,26 - -7,64) occupé une superficie de 17%, une zone caractérisée par une susceptibilité faible (-7,64 - -4,36) avec une superficie de 25% de la superficie totale, 25% de la zone d'étude caractérisé par une susceptibilité modérée avec un indice varie entre -4,36 et -0,36, une zone à forte susceptibilité (-0,36 - 3,53) d'une superficie de 22% ainsi, une zone a très forte susceptibilité (3,53 - 9,79) avec un taux de superficie de 14%.

L'application de l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) montre que l'indice global de la susceptibilité aux glissements de terrain varie entre 0.02 et 0.77, leur répartition en cinq classes de susceptibilité montre qu'une superficie de 15% du total caractérisé par une susceptibilité nulle dont l'indice est (0,02 - 0,20), 27% de la zone d'étude caractérisé par une susceptibilité faible (0,20 - 0,30), 26% de la zone caractérisé par une susceptibilité modérée (0,30 - 0,41) ainsi qu'une zone de susceptibilité forte (0,41 - 0,53) occupé un taux de 19% le reste de la zone caractérisé par une susceptibilité très forte avec une superficie de 13%.

Figure 49 : carte de susceptibilité réalisée par la méthode rapport de fréquence, Valeur informative, la théorie de l'évidence et l'analyse hiérarchique des procédés.





IV.6 Validation des résultats

Plusieurs méthodes permettant de vérifier les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain, dans ce travail une méthodologie simple est appliquée pour la vérification de l'habilité des méthodes statistique RF, VI, WOE et AHP à cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Cette méthode se base sur la superposition de la carte des glissements de terrain inventoriés avec les quatre cartes résultantes et complété par une analyse statistique de la distribution spatiale des glissements de terrain par rapport aux résultats.

La figure montre clairement qu'un échantillon des glissements de terrain affectant la zone d'étude se situe sur la zone caractérisé par une forte susceptibilité sauf que pour la méthode statistique rapport de fréquence dont la plus part des glissements de terrain se trouvent dans la zone forte.

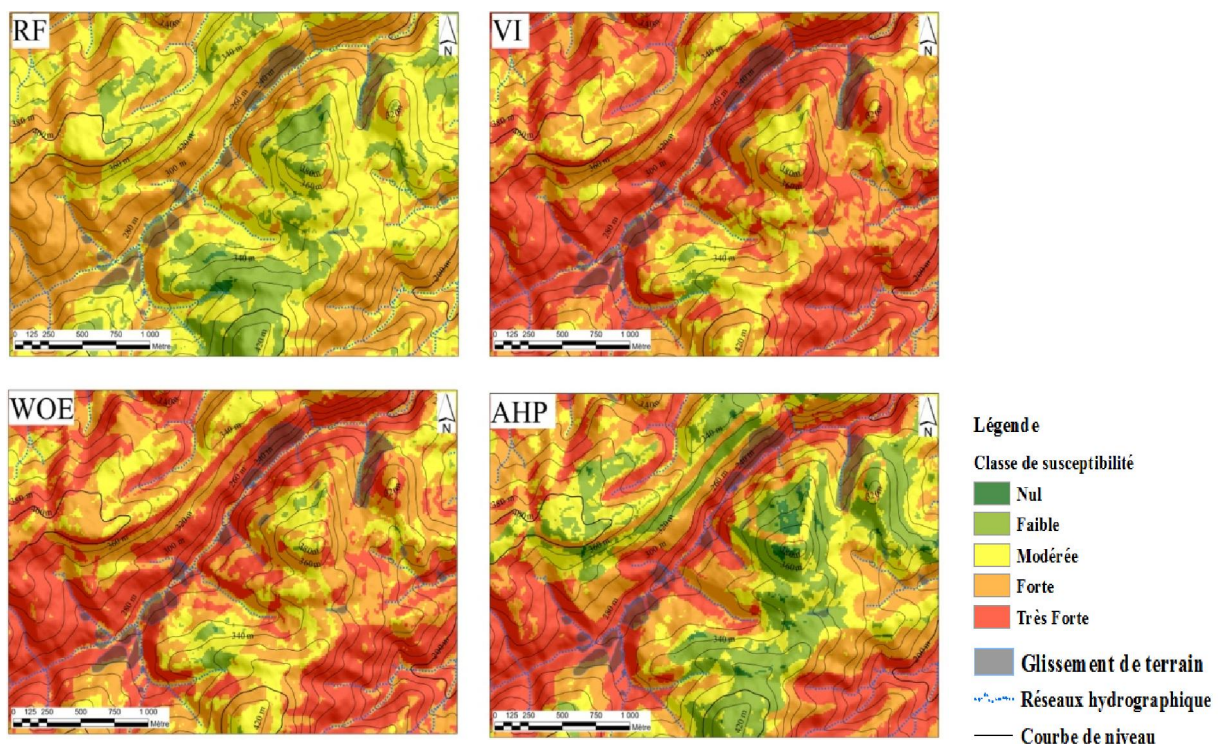


Figure50 : combinaison d'un échantillon de l'inventaire des glissements de terrain avec les quatre cartes réalisé

L'analyse statistique de la distribution spatiale des glissements de terrain par rapport aux différentes cartes réalisées (fig.50) confirme que la plus part des glissements de terrain se situe dans les zones caractérisées par une forte et très forte susceptibilité sauf pour la méthode statistique ratio de fréquence.

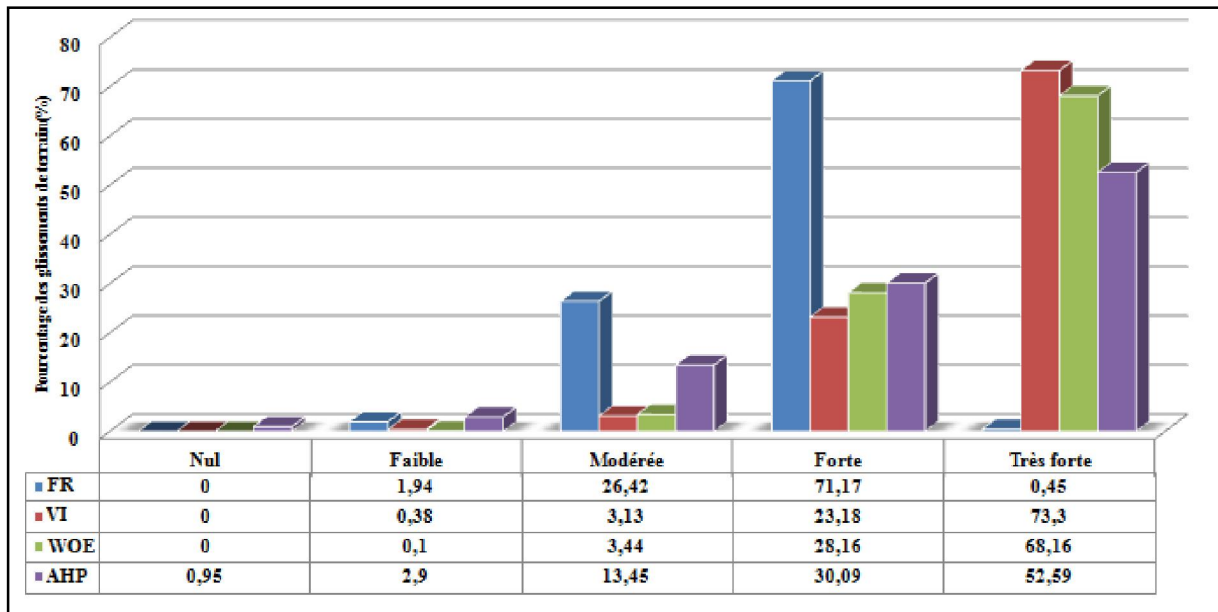


Figure 51 : distribution spatiale des glissements de terrain par rapport aux cartes réalisées

Conclusion générale

Conclusion générale

Les glissements de terrain présentent l'un des aléas les plus répandus dans le monde, ils provoquent annuellement des dégâts et des pertes considérables. En Algérie, et spécialement dans l'Est de payé, des contributions et des publications portent des études de zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain mais restent toujours insuffisantes vu la superficie importante du pays.

Ce travail montre aussi que le Nord ouest de l'Algérie est influencé par les mouvements de terrain et surtout dans les zones montagneuses en raison de la caractéristique géologique, géomorphologique, hydrologique, hydrogéologique, climatique et sismique.

Quatre cartes de susceptibilité sont réalisées en faveur de l'utilisation des méthodes statistiques couplées avec le Système d'Information Géographique (SIG). Trois méthodes statistiques bivariées (Valeur informative, Ratio de fréquence, la théorie de l'évidence et AHP) et une quatrième semi quantitative basée sur la prise de décision sont utilisées pour estimer le degré de la susceptibilité de la zone d'Echorfa (Nord ouest de l'Algérie).

La validation des cartes de susceptibilité montre l'habileté des trois méthodes statistiques VI, WOE et AHP à cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain.

La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain de la région d'étude peut être établie par l'emploi des autres méthodes statistiques ainsi que les données collectées dans cette étude peuvent être utilisées dans d'autres études liées aux risques naturels.

L'utilisation des méthodes et techniques de suivi des glissements de terrain telles que l'interférométrie Radar, les images de haute résolution et le GPS pour une période de temps permettant d'aboutir des cartes d'aléas, leur combinaison avec celle de cartes de susceptibilité réalisées dans cette étude et la carte de vulnérabilité permettant résoudre la question des risques liés aux phénomènes des glissements de terrain dans cette zone.

L'exploitation des résultats obtenus dans cette étude par les décideurs, les collectivités locales et régionales, la direction des travaux publics et la direction de l'urbanisme permettant de minimiser les dégâts et pertes avec des choix des terrains rationnels des futurs projets ainsi que pour la révision du Plan Directeur d'Aménagement Urbain (PDAU).

Liste des figures

Figure 1. : Ecoulement d'Aokas (2015)(Hadj R.2016).....	04
Figure 2.: Chute de pierre et de blocs(bali omar et All., 2018).....	05
Figure 3. : Aspect de fluage (Clément DESOD et all, 2017)	05
Figure 4 : coulée de boue	06
Figure 5: Phénomène de solifluxion coulée de boue Beauchamp J. 2003.....	07
Figure 6 : Phénomène de fauchage.....	08
Figure 7.a: Eléments descriptifs d'un glissement de terrain (Chirboul F. 2013).....	10
Figure 8 : schema d'un glissement planaire.....	12
Figure 9(a): Le glissement rotationnel simple avant l'ctivation et après l'activation....	13
Figure 9(b) : Le glissement rotationnel simple.....	13
Figure 10: Le glissement rotationnel complexe.....	14
Figure11: Le glissement de la route des abattoirs.....	17
Figure 12 : Principaux sites de glissements de terrain à Constantine Ville.....	18
Figure 13 : Route affecté par le glissement (adekar).....	19
Figure14 : Le glissement de La Clapière dans les Alpes-Maritimes en France.....	20
Figure 15 : glissement de terrain d'Oaxaca, Ulises Ruiz (Sediki. A ,2008).....	21
Figure 16 : Morphologie de la zone de glissement de Villatina Medellín en Colombie...22	
Figure 17 : Cartographie d'inventaire des mouvements de versant.....	25
Figure 18 : Cartographie qualitative indexée.....	26
Figure 19 : Cartographie de l'aléa par approche multivariée.....	30
Figure 20 : Schématisation du calcul du coefficient de sécurité pour un bloc rocheux.31	
Figure 21 : Déformations par imagerie InSAR,.....	35
Figure 22 : Identification visuelle de glissements de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes.....	36
Figure23 : Organigramme de la méthode semi-automatique experte de classification du paysage en unités géomorphologiques mise en place par Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) (Van Asselen et Seijmonsbergen, 2006).....	38

Figure 24 : localisation de la zone d'étude par rapport au magrebe et l'algerie , b) limites de la zone d'étude.....	47
Figure 25 : cadre géologique général d'après (Thoma1985).....	49
Figure 26 : carte géologique de la zone d'étude.....	51
Figure27 : géomorphologie de la zone d'étude.....	55
Figure 28 : carte des pentes de la zone d'étude.....	57
Figure 29 : Carte schématique montre les déferents aspects hydrologiques.....	59
Figure 30: Histogramme des Précipitations Moyennes Annuelles.....	62
Figure 31: Variation des Températures Moyennes Mensuelles « Mascara ».....	63
Figure 32: Courbe pluviométrique de la région d'étude.....	64
Figure 33: Abaque d'indice d'aridité.....	66
Figure 34 : les principaux traits structuraux selon Thomas 1985 et les séismes significatives survenus dans la région Nord Occidental de l'Algérie.....	67
Figure 35 : carte d'inventaire de glissements de terrain.....	71
Figure 36: exemple de quelque glissement de terrain recensé, (1) localisation des glissements de terrain (a) glissement rotationnel, (b) glissement rotationnel, (c) glissement translational, (d) glissement translational, (e) basculement, (f) glissement complexe , (g) éboulements.....	72
Figure 37: Relation entre la distribution spatiale des glissements de terrain et (a) pente, (b) Aspect, (c) lithologie, (d) densité des linéaments, (e) précipitations, (f) distance par rapport aux cours d'eau, (g) occupation du sol et (h) Altitude.....	74
Figure 38 : carte de pente.....	76
Figure 39 : carte de la direction des pentes (aspect).....	78
Figure 40 : Carte lithologique de la zone d'étude.....	81
Figure 41 : carte des linéaments.....	84
Figure 42 : traitement statistique du pourcentage des directions de linéaments.....	85
Figure 43 : carte de densité des linéaments.....	86
Figure 44 : Carte des précipitations de la zone d'étude.....	88

Figure 45 : la carte des distances par rapport aux cours d'eau.....	90
Figure 46 : carte d'occupation du sol de la zone d'étude.....	92
Figure 47 : cartes des altitudes de la zone d'étude.....	94
Figure 48 : organigramme de la méthodologie utilisée dans cette étude.....	95
Figure 49 : utilisation du module AHP sur ArcGIS.....	99
Figure 50 : carte de susceptibilité réalisée par la méthode rapport de fréquence, Valeur informative, la théorie de l'évidence et l'analyse hiérarchique des procédés.....	108
Figure 51 : combinaison d'un échantillon de l'inventaire des glissements de terrain avec les quatre cartes réalisé.....	110
Figure 52 distribution spatiale des glissements de terrain par rapport aux cartes réalisées.....	112

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classification d'après la profondeur de la surface de glissement.....	11
Tableau 2 : Classification selon l'activité.....	11
Tableau 03: Coordonnées des stations utiliser.....	60
Tableau 04:Précipitations moyennes mensuelles St« Cheurfas ».....	60
Tableau 05:Précipitations moyennes annuelles.....	61
Tableau 06: Températures moyenne (station de Mascara).....	63
Tableau 07:Moyenne des précipitations et des températures St de Mascara.....	64
Tableau 08 : liste des tremblements de terre nord ouest de l'Algerie.....	68
Tableau 09 : classification classification de la susceptibilité selon la lithologie.....	80
Tableau 10. Echelle de comparaison.....	98
Tableau 11 : Indice Aléatoire (IA).....	99
Tableau 12 : matrice de comparaison par pair et pondération de chaque paramètre.....	100
Tableau 13 : pondération de chaque classe des paramètres utilisé dans cette étude basée sur la méthode statistique ratio de fréquence, valeur informative, la théorie de l'évidence et AHP.....	101

Abreviation

AHP : Analyse Multicritère

ANRH : agence nationale des ressources hydriques

C° : calvine

E : Est

FR : Ration de Frequence

GPS : système position géographique

ISG : indice de susceptibilité

MNT : Modèle numérique du terrain

N : Nord

NE : Nord- Est

NW : Nord -West

ONM : office national de la météorologie

P(mm) : précipitation

P° : pression

S : Sud

SE : Sud -West

SIG : Système D'informations Géographique

SW : Sud- West

T° : température

UTM : Universel Transverse Mercator

VI : Valeurs Informatives

W : West

WOE : Woeight of Evidence

Références bibliographiques

- **Achour .Y, Boumezbeur .A, Hadji .R, Chouabbi .A, Cavaleiro .V & Bendaoud .E.A**, 2017, Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8), 194.
- **AHMED SEDDIKI**, analyse de la stabilité des pentes sous séisme, Mém de magister ; Promotion : 2007/2008 ; université de M'sila, Page (29), (33), (35), (39).
- **Alp'Géorisques**, 2004, Les mouvements de terrain, ministère de l'écologie et du développement durable ; Page (5); France.
- **Arabameri .A, Pradhan .B, Rezaei .K & Lee .C.W**, 2019, Assessment of Landslide Susceptibility Using Statistical-and Artificial Intelligence-Based FR–RF Integrated Model and Multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 11(9), 999.
- **Argialas .D.P, Tzotsos .A**, 2006, Automatic extraction of physiographic features and alluvial fans in Nevada, USA, from digital elevation models and satellite imagery through multiresolution segmentation and object-oriented classification. *Proceedings of ASPRS 2006 Annual Conference*, Reno, Nevada, May 1-5, 2006, 10 p.
- **Ayalew .L & Yamagishi .H**, 2005, The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1-2), 15-31.
- **Bali .O & All**, 2018, Etudes Géotechnique De Glissements de Terrain Mascara ; Université Djillali Bounaama de Khemis Miliana.
- **Beauchamp .J**, 2003 : <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/eadaa/mecasol.htm>
- **Bendadouche .H & Lazizi .S**, 2013, Etude et confortement du glissement de terrain au niveau de l'évitement de la ville de Kherrata wilaya Bejaia, Mém, master ; univ.Bejaia.
- **Benuis .Dj**, 2010, étude d'un glissement de terrain par différentes méthodes, Mém,master ;univ.Saida.
- **Besson .L et All**, 2012, mement du maire et des élus locaux ;5ème édition.
- **Bonham-Carter G.F**, 1989, Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.

- **Bonham-Carter G.F**, 1994, Geographic Information System for Geoscientists: modelling with GIS, Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994.
- **Bouguerra Abdenacer**, Analyse de la stabilité et choix des procédés de confortement Cas : « Glissement de terrain 60 /420 logements Cherachria, Médéa », Mém, Master ; promotion 2013-2014 ; Université de Khemis-Miliana ; Page (31), (73). Alger.
- **Bouhadad .Y, Benhamouche .A, Bourenane .H, Ouali .A.A, Chikh .M & Guessoum .N**, 2010, The Laalam (Algeria) damaging landslide triggered by a moderate earthquake (M w= 5.2). *Natural hazards*, 54(2), 261-272.
- **Boulaassal .H**, 2008, Classification orientée objets des images satellites. Approche adoptée par le logiciel e Cognition. *Cours de Master 2, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg*, 17 p.
- **Bourenane .H, Guettouche .M, Bouhadad .Y & Braham .M**, 2016, Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. *Arabian Journal of Geosciences*; 9(2); 154.
- **Carrara .A, Bitelli .G, Carla .R**, 1997, Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines. *International Journal of Geographical Information Science*, 11, 451-473.
- **Chen .W, Li .W, Hou .E, Zhao .Z, Deng .N, Bai .H & Wang .D**, 2014, Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model for the Chencang District of Baoji, China. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(11), 4499-4511.
- **Chen .W, Yan .X, Zhao .Z, Hong .H, Bui .D.T & Pradhan .B**, 2019, Spatial prediction of landslide susceptibility using data mining-based kernel logistic regression, naive Bayes and RBFNetwork models for the Long County area (China). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(1), 247-266.
- **Cherboul .F**, 2016, Analyse de la stabilité et modélisation numérique d'un glissement de terrain, Mém, master, univ. Larbi Tebssi, Tebessa.
- **Chergui yousef**, 2011, Etude de glissement de terrain de l'extension de la capacité de la RN1 PK 82+700 (Médéa) avec proposition de solution de stabilisation, projet fin d'étude. École nationale supérieure des travaux publics.
- **Corominas . J, Van Westen .C, Frattini .P, Cascini .L, Malet .J.P, Fotopoulou .S, Catani .F, Van Den Eeckhaut .M, Mavrouli .O, Agliardi .F, Pitilakis .K, Winter**

- .M.G, Pasteur .M, Ferlisi .S, Tofani .V, Hervás .J & Smith .J.T**, 2014, Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of engineering geology and the environment* ;79 ; 209.
- **CRUDEN .D.M & VARNES D.J**, 1996, Landslide types and processes. Turner AK and Schuster RL (Eds.) *Landslides: investigation and mitigation*. Washington, D.C., National Academy Press. 247; 36.
 - **Das .I, Sahoo .S, van Westen .C, Stein .A & Hack .R**, 2010, Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalaya (India). *Geomorphology*, 114(4), 627-637.
 - **Desod .C, Launay .J, Molirano .HH**, 2017, les glissements de terrain, modélisation et prévision, <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>.
 - Direction de la Surveillance et de la Prévention des Risque glissement des terrains, mission l'identification des risques ; page 20-21 ; Version 1.0 ; France.
 - **EL Mimouni.A, DAOUDI .L & OUAJHAIN.B**, 2005, Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'Oued Ksob (Bassin d'Essaouira, Maroc). 3ème Journées Internationale des Géosciences de l'Environnement. El Jadida les 8, 9 et 10 juin 2005.
 - **EL Mimouni.A, Daoudi.L & Ouajhain.B**, 2005, Rôle de la lithologie des versants sur les écoulements superficiels de l'Oued Ksob (Bassin d'Essaouira, Maroc), 3ème Journées Internationale des Géosciences de l'Environnement. El Jadida les 8, 9 et 10 juin 2005.
 - **FISHER, G. B., AMOS, C. B., BOOKHAGEN, B., BURBANK, D. W. & GODARD, V., 2012**. Channel widths, landslides, faults, and beyond: The new world order of high-spatial resolution Google Earth imagery in the study of earth surface processes. *Geological Society of America Special Papers*, 492 .
 - **Fressard. M**, 2013, Les glissements de terrain du Pays d'Auge continental normandie, France, thèse ;doct ; Univ, Caen Basse-Normandie.
 - **G.Philipponnat**, 1998, *Fondation et ouvrage en terre*. Eyrolles.
 - **Gilles .S, Pierre .P**, 1998, Guide technique. Stabilisation des glissements de terrain .Laboratoire Central des Ponts et Chaussées>>.97p.

- http://geologie-patrimoine-matheysine.fr/sites_remarquables/valsenestre_cotebelle.html
- **GLADE .T & CROZIER M.J, 2005**, The nature of hazard and impact.
- **Glade .T, Anderson M.G. & Crozier M.J. (Editors) 2003**, Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, p 43.
- **Guemache M.A, Chatelain J.L, Machane .D, Benahmed .S & Djadia .L, 2011**, Failure of landslide stabilization measures: The Sidi Rached viaduct case (Constantine, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 59(4-5), 349-358.
- **H.all, 2014**, GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; P346.
- **Hadji .R, Chouabi .A, Gadri .L, Raïs .K, Hamed .Y & Boumazbeur .A, 2016**, Application of linear indexing model and GIS techniques for the slope movement susceptibility modeling in Bouselam upstream basin, Northeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 192.).
- **Hadji .R, Errahmane Boumazbeur .A, Limani .Y, Baghem .M, el Madjid Chouabi .A & Demdoun .A, 2013**, Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria. *Quaternary International*, 302, 224-237.
- **Hallal .N, Chaouche .A.Y, Hamai .L, Lamali .A, Dubois .L, Mohammedi .Y & Abtout .A, 2019**, spatiotemporal evolution of the El Biar landslide (Algiers): new field observation data constrained by ground-penetrating radar investigations. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-18.
- **Hervas .J, Barredo J.I, Rosin P.L, Pasuto .A, Mantovani .F, Silvano .S, 2003**, Monitoring landslides from optical remotely sensed imagery: the case history of Tessina landslide, Italy. *Geomorphology*, 54 (2003), pp. 63.
- **Hungr .O, Leroueil .S & Picarelli .L, 2014**, The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11: 167.
- **Kayastha .P, Dhital M.R & De Smedt .F, 2013**, Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.
- **LEBOURG .M.T, 2000, novembre 7**, Analyse Géologique et mécanique de glissement de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales. Bordeaux, FRANCE.

- **Lee .S & Choi .J** 2004, Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight-of-evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 789-814.
- **Malet J.P, Thiery .Y, Maquaire .O, Puissant .A**,2004, Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque « glissement de terrain » Revue Internationale de Géomatique ; France.
- **Mantovani .F, Soeters .R, Van Westen C.J**, 1996, Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15 (1996), pp. 213-225.
- **Maquaire .O, Malet J.P, Remaître .A, Locat .J, Klotz .S, Guillon .J**, Instability conditions of marly hillslopes : towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette Basin, South-East France , *Engineering Geology*, vol. 70, n°1-2, 2003, p. 109-130.
- **Merghadi .A, Abderrahmane .B & Tien Bui .D**, 2018, Landslide susceptibility assessment at Mila Basin (Algeria): a comparative assessment of prediction capability of advanced machine learning methods. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(7), 268.
- **Metternicht .G, Hurni .L, Gogu .R**, 2005, Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2005) pp. 284
- **Molenaar .H**, 2005, Automatic recognition of geomorphologic features. A process-based approach for the classification of landslides using remote-sensing data sources. *Thesis, IBED-Physical Geography, Section Computational Bio- and Physical Geography, Universiteit van Amsterdam*, 31 p.
- **Mora et al, 2003**, Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering geology*, n°68.
- **Moradi .M, Bazyar .M.H & Mohammadi .Z**, 2012, GIS-based landslide susceptibility mapping by AHP method, a case study, Dena City, Iran. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(7), 6715-6723.
- **Ohlmaier G.C & Davis J.C**, 2003, Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering geology*, 69(3-4), 331-343.

- **PHILIPPONAT .G & Hubert .B**, 1998, *Fondation et ouvrages en terre*, édition Eyrolles, Paris, 546p les coulées.
- **Pourghasemi .H, R, Pradhan .B & amp; 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.
- **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.
- **Rahmati .O, Zeinivand .H & Besharat .M**, 2016, Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000-1017.
- **RAMOSI .A, CUNHAI .L & Pedro .P**, 2014, Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré ; *Geo-Eco-Trop.*, 2014, 38, 1, n.s. : 33-44.
- **Regmi .N.R, Giardino .J.R & Vitek .J.D**, 2010, Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach Western Colorado, USA, *Geomorphology*, 115(1-2), 172-187.
- **Roukh .Z.A & Nadji .A**, 2019, Landslide susceptibility mapping using information value and frequency ratio for the Arzew sector (North-Western of Algeria). *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (159), 1-10.
- **Roukh .Z & amp; Nadji .A** 2018, Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère et SIG : Cas de la wilaya d'Oran Nord-Ouest de l'Algérie. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, 3 (1), 67-73.
- **Saaty T.L**, 1977, A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of mathematical psychology*, 15(3), 234-281.
- **Schlögel .R, Malet .J.P, Doubre .C & Lebourg .T**, 2016, Structural control on the kinematics of the deep-seated La Clapière landslide revealed by L-band InSAR observations. *Landslides*, 13(5), 1005-1018.
- **Si Ali B. (2012)** : Un scénario du risque de mouvement de terrain dans un îlot urbain: cas de Sidi El Houari, Oran ; mem. master ; univ Abdelhamid Ibn Badis ; Mostaganem.

- **Siddayao G.P, Valdez S.E & Fernandez P.L**, 2014, Analytic hierarchy process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 4(5), 450.
- **SLIMLA**, 2008, Mouvements de terrains et ravinements dans le bassin supérieur de l'Oued Djemaa (versant sud du Djurdjura, Algérie). Mémoire pour obtenir le diplôme de doctorat. Université Paris XII Val-de-Marne.
- **Smahi .A, Zeghar .Z**, 2015, Etude et confortement du glissement de terrain au niveau de l'évitement de la ville de Kherrata wilaya de Béjaia, Mém, master ;univ.Bejaia.
- **Stefanidis .S & Stathis .D**, 2013, Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural hazards*, 68(2), 569-585.
- **Thiery M.Y**, 2007, susceptibilité du bassin de barcelonnette (alpes du sud ; France) aux mouvements de versant cartographie morphodynamique analyse spatiale et modélisation probabiliste, thèse, doct ; Univ. Caen ; France.
- **Thiery, Y. 2007**. Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de doctorat, Université de Caen, 445p.
- **Thomas, G. 1985**. Géodynamique d'un bassin intramontagneux Le bassin du Bas Chélif occidental (Algérie) durant le Mio-Plio-Quaternaire. Thèse de doctorat, Université de Pau, 594p.
- **Van Asselen .S, Seijmonsbergen A.C**, 2006, Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology*, 78 (2006).
- **Van Westen .C.J, Rengers .N, Soeters .R**, Use of geomorphologic information in indirect landslide susceptibility assessment, *Natural Hazards*, vol. 30, 2003, p. 399-419.
- **Varne .D.J**, 1958, Landslide types and processes. *Landslides and engineering practice*, vol. 24, p. 20-47.
- **Varne .D.J**, 1978, slope movements, types and processes.
- **Varne .D.J**, 1996, landslide types and processes, National research Council, washington.
- **Varnes .D.J**, Slope movement types and processes, *Special report*, 1978, vol. 176, 11-33 pp. ([Http//observatoire-regional-rusques paca.fr/article/eboulement-chutes-pierre blocs](http://observatoire-regional-rusques.paca.fr/article/eboulement-chutes-pierre-blocs)).

- **Yin .K, Yan .T**, 1988, Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides. s1]:[sn], pp 1269-1272.

❖ **SOURCES:**

- **ANRH**
- **ONM**
- **DRE**

❖ **CARTES:**

- la carte géologique de Saint Denis de Sig a l'échelle 1/50000.