ROYAUME DU MAROC
Université Mohammed V
- RABAT -
جامعة محمد الخامس
– الرباط –
Faculté des sciences
كلية العلوم
CENTRE D'ETUDES DOCTORALES - SCIENCES ET TECHNOLOGIES

N° d'ordre : **3660**

THESE

En vue de l'obtention du : ***DOCTORAT***

UFR : *Géo-Environnements, Risques Naturels et Génie Littoral*
Structure de recherche : *Georisk*
Discipline : *Sciences de la Terre et de l'Univers*
Spécialité : *Géosciences, Risques Géologiques*

Présentée et soutenue le 16 /07/2022 par:

EL HAMDOUNI Ikram

Mouvements de terrain dans la province de Larache
Analyse spatiale, Modélisation probabiliste Multi-échelle
Impacts sur l'aménagement et l'Urbanisme (Rif septentrional-Maroc)

JURY

Abdellah AMMAR	*PES, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Président*
Ilias KACIMI	*PES, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Rapporteur*
Mohammed SAADI	*PH, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Rapporteur*
Mohammed TAYEBI	*PES, Faculté des Sciences Université Ibn Toufail, Kenitra*	*Rapporteur*
Larbi BOUDAD	*PH, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Examinateur*
Youssef HAHOU	*PES, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Examinateur*
Lahsen AIT BRAHIM	*PES, Expert Risques Géologiques, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat*	*Co-Encadrant*
Tarik BAHAJ	*PH, Faculté des Sciences Université Mohammed V, Rabat*	*Encadrant*

TABLE DE MATIERES

DEDICACE ..... **II**

REMERCIEMENTS ..... **IV**

RESUME ..... **VII**

ABSTRACT: ..... **IX**

ملخص ..... **XI**

RESUMEN ..... **XIII**

LISTE DES FIGURES ..... **XIV**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XVIII**

INTRODUCTION GENERALE **1**

LA PREMIERE PARTIE: CONTEXTE GENERAL DE LA RECHERCHE **5**

CHAPITRE.I: CADRE THEMATIQUE DE L'ETUDE 7
DES MOUVEMENTS GRAVITAIRES DANS LA PROVINCE 7
DE LARACHE-RIF SEPTENTRIONAL- 7
1. Thématique et intérêts du travail : *7*
1.1. Thématique et problématique : 7
1.2. Intérêt de l'étude: 9
2. Historique des travaux antérieurs : *9*
3. Concepts de base pour l'évaluation de la cartographie des mouvements de pente : *10*
3.1. Catastrophe naturelle et risque naturel : 10
3.2. Vulnérabilité : 12
3.3. Aléa et susceptibilité : 13
3.4. Cartes du risque "mouvements de pente" : 14
3.5. Fiabilité des cartes d'aléa : 15
4. Conclusion: *15*
CHAPITRE. II: CADRE PHYSIO-GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE REGIONAL 17
1. Situation géographique et administrative : *17*
2. Cadre géomorphologique : *18*
3. Contexte climatique : *18*
4. Cadre naturel et occupation du sol: *19*
5. Contexte géologique régional: *20*
5.1 Cadre géodynamique de la Méditerranée Occidentale : 20
5.2. Evolution géodynamique du Pliocène à l'actuel: 21
5.3. Situation géo-structurale de la zone d'étude : 22
5.3.1. Les terrains intrarifains au niveau de la région : 23
5.3.2. Les séries de nappes de flysch au niveau de la région: 25
5.3.3. Lithostratigraphie du Groupe de Larache à l'Ouest de la région : 26
5.3.4. La marge Nord du bassin d'El Gharb : 26
6. Conclusion : *27*
CHAPITRE. III: APPROCHES DE CARTOGRAPHIE 29
DE LA SUSCEPTIBILITE AUX INSTABILITES DE TERRAIN : 29
METHODES, UTILITES, AVANTAGES 29

ET INCONVENIENTS 29
1. Méthodes d'évaluation du risque "Mouvement de terrain": *29*
2. Concept de base de l'évaluation et du zonage de l'aléa "instabilité des versants": *29*
3. Apport de l'application de la télédétection et SIG dans la cartographie des instabilités de terrain : *31*
4. Méthodes d'évaluation de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain : *31*
5. Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de la susceptibilité puis de l'aléa : *32*
6. Validation des modèles de prédiction : *37*
6.1. Méthode de validation "holdout" : 37
6.2. Méthodes de validation croisée et "*bootstrap*" : 37
Conclusion : *38*

DEUXIEME PARTIE: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS..... 41

DE TERRAIN..... 41

CHAPITRE. IV : LA CARTOGRAPHIE DES INSTABILITES DE TERRAIN (APPROCHEEXPERTE ET ETUDE DE CAS) 43
Introduction : *43*
1. Les critères de classification: *44*
2. Classification des instabilités (D'après Cruden and Varnes, 1996): *44*
3. Facteurs d'instabilité : *46*
4. Cadre théorique des méthodes et outils de cartographie des instabilités de terrain : *47*
4.1 Méthodes de cartographie des instabilités de terrain : 48
4.2. Utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain : 49
4.3. Les échelles adoptées pour chaque type d'inventaire : 52
5. Inventaires des glissements de terrain au niveau de la zone d'étude : *52*
5.1. Les techniques utilisées pour la cartographie des instabilités de terrain dans la province de Larache: 53
5.2. Etude bibliographique et analyse des documents existants : 53
5.3. Apport de la télédétection pour la cartographie des instabilités de terrain: 56
5.3.1. L'image LANDSAT 7 ETM^{+}: 57
5.3.2. Acquisition de l'information avec Google Earth : 61
5.4. L'analyse des cartes topographiques : 64
5.5. Analyse de la carte géomorphologique et géologique : 65
5.6. Résultats de la prospection des sites cartographiés : visites du terrain : 65
6. Présentation des résultats : *68*
6.1. Typologie et inventaire des mouvements de terrain: 68
6.2. Vers une carte "expert" (qualitative) des "mouvements de versant" : 69
6.3. Etude de cas : 70
6.3.1. Glissement de Souk El Quola : Glissement complexe : 71
6.3.2. Glissement de "Koudiet Taria": Glissement rotationnel : 73
6.3.3. Analyse déterministe du glissement Taria : 75
6.3.4. La surface de rupture: 81
6.4. Conclusion : 82
CHAPITRE. V: FACTEURS DE PREDISPOSITION POUR LA MODELISATION DE LA SUSCEPTIBILITE : ACQUISITION, DESCRIPTION ET IMPACT SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN 85
Introduction: *85*
1. Les facteurs prédictifs : *87*
1.1 La lithologie : 87
1.1.1 Cartographie des faciès dominants : 87
1.1.2 Relation de la lithologie avec la variable à modélisé MT: 89
1.2. La variable occupation des sols: 90
1.2.1. L'impact de l'occupation du sol sur la stabilité des versants: 90
1.2.2. La cartographie de l'occupation du sol : 91

1.2.3 Relation de l'occupation du sol avec la variable à modélisé MT: 92
1.3. La variable hydrogéologie: 93
1.3.1 La cartographie du réseau hydrographique : 94
1.3.2. Extraction à partir du MNT et classement du réseau hydrographique sur ArcGIS : 95
1.3.3. Les anomalies du drainage: 96
1.3.4. Intégration de la variable réseau hydrographique dans le modèle: 97
1.4. La fracturation : 98
1.4.1. Le cadre tectonique régional : 98
1.4.3. Intégration de la variable fracturation dans le modèle : 110
1.5. Les variables topographiques: 112
1.5.2. La variable exposition des versants: 114
1.5.3. L'hypsométrie : 116
2. Les facteurs déclencheurs: *117*
2.1 La variable précipitation: 118
2.1.1 L'interaction des facteurs géologiques et géographiques avec la variable pluviométrie : 119
2.1.2 Approches sur l'influence des précipitations sur l'occurrence des glissements de terrain: 120
2.1.3 Les données climatiques au niveau de la région de Larache : 120
2.1.4 Carte de la variable pluviométrie: 122
2.2. La variable sismicité: 123
2.2.1. Carte de sismicité et analyse sismo-tectonique au niveau du secteur d'étude : 124
2.2.2. Interpolation des événements sismiques selon leur fréquence et leur magnitude: 125
2.2.3. Relation sismicité et instabilités de terrain d'après les études antérieures: 126
2.2.4. Relation séisme-précipitation et déclenchement des mouvements de terrain: 128
2.2.5. Corrélation entre les données sismiques et les instabilités de terrain auniveau de la région de Larache : 128
Conclusion : *129*
CHAPITREVI: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE DES VERSANTS AUX INSTABILITES DE TERRAIN A UNE ECHELLE REGIONALE (1/100 000) EN UTILISANT LA METHODE HEURISTIQUE 133
1. Introduction : *133*
2. Le choix de l'hiérarchie analytique (AHP) pour l'analyse des risques de glissement de terrain : *134*
3. Processus de l'hiérarchie analytique (AHP) pour l'analyse des risques de glissement de terrain : *135*
4. Pondération des facteurs conditionnants par le processus d'analyse hiérarchique : *137*
4.1. Estimation de l'occurrence des variables conditionnant vis à vis des instabilités de terrain : 138
4.2. Établissement de la matrice des comparaisons binaires et calcul du poids : 142
4.3. Génération des cartes de susceptibilités en appliquant l'AHP : 143
Conclusion : *145*
CHAPITRE VII: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN A UNE ECHELLE MOYENNE (1/50000 EME) EN APPLIQUANT LA THEORIE DE L'EVIDENCE AU NIVEAU DE DEUX REGIONS KSAR EL KEBIR ET SOUK EL QUOLA 147
Introduction : *147*
1. Outils et méthodologie : *147*
1.1 Principe de la méthode et outils : 148
1.1.1 Principe de la méthode "Weights of Evidence" : 149
1.1.2 Estimation de la probabilité à priori : 149
1.1.3 Calcul des poids : 149
1.1.4. Calcul de la probabilité a posteriori et estimation de l'incertitude : 150
1.1.5. L'incertitude de la probabilité a posteriori (tests de Student) : 151
1.1.6 Test d'indépendance conditionnelle : 151
1.1.7 Conclusion : 152
1.2. Les outils SDM : 152
2. Démarches de modélisation : *155*
2.1 Echantillonnage des instabilités de terrain (variable à modéliser Vm) : 155
2.2. Collecte et mise en forme des facteurs prédictifs : 156
2.2.1 Collecte des données : 157

2.2.2 Structuration des données et préparation de l'environnement SIG :.... 157
2.2.3. Identification des variables prédictives influents:.... 158
3. Présentation des facteurs prédictifs mis en considération:.... 159
3.1. Le jeu de variables prédictives au niveau de la région Souk El Quola:.... 159
3.1.1 Les facteurs liés à la topographie:.... 159
3.1.2 Les facteurs géologiques :.... 160
3.1.3 Lefacteur réseau hydrographique:.... 162
3.1.4 Lefacteur occupation:.... 162
3.2. Le jeu de variables prédictives au niveau de la région El Ksar El Kebir:.... 163
3.2.1 Les facteurs liés à la topographie :.... 163
3.2.2 Les facteurs liés à la géologie:.... 163
3.2.3 Le facteur réseau hydrographique:.... 163
3.2.4 Le facteur occupation du sol:.... 163
4. Quantification des facteurs prédictifs : Calcul du poids:.... 165
4.1. Les résultats obtenus au niveau de la région de Souk El Quola :.... 165
4.2. Quantification des variables conditionnants dans la région D'El Ksar El Kebir:.... 165
5. Calcul du raster réponse : création de la carte de susceptibilité :.... 168
6. Test d'indépendance conditionnelle:.... 168
6. Validations statistiques des résultats : "Area Frequency Table":.... 171
6.1 La courbe du taux de succès(SRC):.... 171
6.2 Le test aveugle (BT) et la courbe de prévision (PRC) :.... 171
6.3 Reclassification de la carte de probabilité postérieure à échelle:.... 172
6.4 Validatin experte :.... 176
Conclusion:.... 177
CHAPITRE VIII: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN A UNE ECHELLE MOYENNE (1/50000 EME) EN APPLIQUANT L'APPROCHE PAR REGRESSION LOGISTIQUE (RL).... 179
AU NIVEAU DE DEUX REGIONS KSAR EL KEBIR ET SOUK EL QUOLA.... 179
Introduction:.... 179
1. Principes de calcul mathématique du modèle régression logistique:.... 180
2. Outils et méthodes:.... 181
2.1. Echantillonnage du facteur modélisable :.... 182
2.2. La relation entre les mouvements de terrain et les facteurs du terrain:.... 182
3. Résultats de la méthode "Régression Logistique" (LR):.... 184
3.1 Les calculs de la probabilité à postériori:.... 184
3.2. Validations statistiques du modèle logistique : "*Area Frequency Table*":.... 188
3.3. Reclassification de la carte résultante par RL :.... 189
3.4. Validation experte:.... 192
4. Comparaison des résultats obtenus par la méthode WofE et celles obtenus par Régression Logistique:.... 193
Conclusion :.... 194
CHAPITRE IX : APPORT DES CARTES PREVISIONNELLES DU RISQUELIE AUX INSTABILITES DU TERRAIN DANS L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE.... 195
1. Introduction :.... 195
2. Risques des instabilités de terrain au niveau des grandes œuvres d'art dans la province de Larache : les barrages comme exemple.... 196
2.1. Risque de rupture des Barrages :.... 196
2.2. Risque d'envasement des Barrages :.... 197
3. Risques des instabilités de terrain sur le réseau routier.... 197
Figure IX.3 : Glissements qui affectent les routes : cas de la localité "Ouarzeine" (G1, G2, G3) et cas de la localité "Hmaimoun"..... 197
4. Utilité des cartes de susceptibilités aux instabilités de terrain.... 198

CONCLUSION GENERALE.... 199

Recommandations et perspectives:..... 203

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE..... 205

A mon père Larabi El Hamdouni
A ma chére maman
Et à mon mari, à jamais ….

Dédicace

*Je dédie cette thèse à **mes parents** qui ont su croire en moi et qui m'ont apporté toute leur aide quand j'en avais besoin. Ils n'ont épargné aucun effort pour mon bien être de mes frères et sœurs.*

***Chers parents** : vous avez fait de moi la femme que je suis aujourd'hui. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je vous suis redevable d'une éducation dont je suis fière.*

*Je remercie ma **sœur Hajer** qui m'a aidée à reproduire les coupes géologiques et levés de terrain sur "Photoshop", Je la remercie infiniment de m'avoir consacré une grande part de son temps, malgré ses engagements et ses nombreuses tâches, que dieu l'assiste. Par cette occasion, je n'oublierai pas de lui souhaiter bonne chance dans son travail de thèse.*

*Je remercie également mes **frères et sœurs** et toute **ma famille** et **ma belle famille** qui m'ont soutenue, de près ou de loin, durant mes études doctorales.*

*Un grand merci spécial à ma **belle-sœur Loubna**, de son grand soutien et ses encouragements, et pour toute l'énergie positive qu'elle m'a donné avec son sourire, ses conseils neutres et sincères.*

*Enfin, je voudrais remercier **mon mari Samir El Achouri** pour son soutien, sa patience et sa compréhension, compte tenu de mes absences de la maison ou de ma présence mais isolé dans mon coin devant l'ordinateur. Merci mon cher époux pour tout ce que tu as pu faire pour me faciliter la tâche, quoiqu'ils soient tes engagements, tu étais toujours à mes côtés, tu m'as épaulé, encouragé et je suis très reconnaissante de faire de mes ambitions tes priorités...merci.*

*Merci à mes enfants : **Sara, Mohamed El Mehdi et Aze El Arab** pour leur compréhension, leur sagesse, et leur sens de responsabilité, je suis fière de vous.*

*Merci à **mon mari** et **mon frère Mohamed Anoir** qui m'ont accompagné plusieurs fois lors des missions de terrain dans le cadre du suivi de quelques glissements de terrain toujours actifs et pour la prise des photos.*

Je remercie plus largement toutes les personnes qui m'ont demandé : " ça avance ?" ; "c'est pour quand alors ?" ; bonne chance !!

Remerciements

Cette thèse a été initiée au sein de la structure de recherche GEORISK (Risques Géologiques, Télédétection et Environnement) de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat ; sous la direction du professeur **Lahsen AIT BRAHIM**, de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2017 à 2018. Par la suite du professeur **Abdellah ABDELOUAFI** (Rahimah Allah), de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2019 à 2021 et le professeur **Tarik BAHAJ** de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V en 2022 etMonsieur **Lahsen AIT BRAHIM** professeur, retraité a assuré la Codirection de ma thèse de 2019 à 2022.

Ce travail a été effectué d'une part au sein de l'équipe de recherche GEORISK de l'U.F.R. Géoenvironnement, Risques Naturels et Génie littoral et d'autre part dans le cadre des actions intégréesN° 593/91 et 219/ ST4entre la Faculté des Sciences de Rabat, et la Faculté des Sciences de Le Mans ainsi que l'Université Pierre et Marie Curie, Jussieu, Paris VI.

J'exprime ma gratitude à Monsieur **Lahsen AIT BRAHIM**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat et Directeur de ma Thèse jusqu' à 2018, et codirecteur de ma thèse de 2019 à 2022. Responsable des actions intégrées N° 593/91 et 219/ ST4 et de l'équipe de recherche GEORISK.

C'est avec une vive émotion que je vous remercie de m'avoir accueilli et proposé ce sujet grâce auquel j'ai pu découvrir le monde très diversifiée et multidisciplinaire de la gestion des risques géologiques. Je vous remercie d'avoir dirigé avec rigueur mes travaux de terrain (cartographie, coupes, logs, microtectonique etc.) et de laboratoire. Vous m'avez fait part de votre grande expérience dans le domaine de la Télédétection, du SIG et leur relation avec la réalité du terrain. Je vous remercie de m'avoir facilité le contact avec plusieurs partenaires et de m'avoir soutenu dans les moments les plus difficiles. Vos conseils, votre rigueur, votre abnégation et votre disponibilité à tout momentmalgré vos nombreuses préoccupations scientifiques m'ont beaucoup aidé et ont largement contribué à ma formation et à la réalisation de ce travail (en toute liberté et autonomie). Je réitère mes remerciements pour les efforts déployés pour faire aboutir mes articles dans des revues indexées Scopus.Au chercheur, à l'homme, veuillez trouver dans ces quelques mots : mareconnaissance,magratitude, ma très haute considérationetmaprofondeestime.

Monsieur **Abdellah ABDELOUAFI** (Rahimah Allah), Professeur de l'Enseignement Supérieur a la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Directeur de ma Thèse de 2019 à 2021, spécialiste en télédétection et les risques géologiques ; je vous remercie d'avoir accepté de poursuivre mon encadrement de 2019 à 2021 sur le même thème de recherche. Je vous remercie de vos encouragements et conseils lors des moments difficiles qui m'ont permis de faire aboutir ce travail. Jevousexprimemareconnaissance et mes sinceres remerciements

Je remercie Monsieur **Tarik BAHAJ**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, directeur de ma thèse de 2021 à 2022. Merci, d'avoir accepté la relève pour assurer la direction de ma thèse. Vous avez toujours manifesté un intérêt envers ce travail. Je vous remercie de vos encouragements pour faire aboutir ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma très haute considération.

Je remercie Monsieur **Abdellah AMMAR**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Président du jury. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre et de la géophysique. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'être Président de mon Jury. Je vous adresse mes respects et mes sincères remerciements.

Je remercie Monsieur **Ilias KACIMI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Rapporteur et examinateur. Eminent spécialiste dans

le domaine des sciences de la terre, del'hydrogéologie et de la géomatique.Merci, pour vos conseils ;vos remarques lors de l'evaluation du present travail et l'intérêt que vous avez manifesté envers ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma très haute considération. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément.

Je remercie Monsieur **Mohammed SAADI**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat. Rapporteur et examinateur. Grand spécialiste dans le domaine des sciences de la terre et Eminentstucturaliste. Merci, pour vos conseils ; vos remarques lors de l'évaluation du présent travail et de l'intérêt que vous avez manifesté envers ce travail. Je vous adresse mes respects et mes remerciements pour l'honneur que vous me faites en acceptant de siéger dans le présent travail.

Je remercie Monsieur **Mohammed Tayebi**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences Université Ibn Toufail, Kenitra. Rapporteur et examinateur. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre. Merci, pour vos conseils ; vos remarques lors de l'évaluation du présent travail. Je vous remercie chaleureusement d'avoir accepté de juger ce travail. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément.

Je remercie Monsieur **Larbi BOUDAD**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat. Chef du département des sciences de la terre. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites par votre présence dans ce Jury. Je vous adresse mes respects et mes sincères remerciements.

Je remercie Monsieur **Youssef HAHOU**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat. Examinateur. Spécialiste dans le domaine des sciences de la terre et de la géophysique. Merci d'avoir accepté d'examiner ce travail. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément. Veuillez agréer le témoignage de mon respect et ma profonde gratitude.

Je remercie Monsieur **Mohammed REGRAGUI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur et Doyen de la Faculté des Science de Rabat, Université Mohammed V, pour m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études de recherche doctorale au sein de cette Faculté.

Je remercie Madame **Souad EL HAJJAJI**, Professeur de l'Enseignement Supérieur, Directrice du Centre d'Etudes Doctorales et Responsable du Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable (CERNE2D) pour les conseils très importants prodigués depuis le dépôt de la demande jusqu'à l'accord de la soutenance du présent mémoire.

Je tiens à remercier tout particulièrement Les doctorants de ma promotion : **Abderrahmane El Mahssani, Anouar Ilham Jemah, Bousta Mahfoud...,** qui par leur bonne humeur communicative et leur bonne foi de toujours aider et encourager, ont permis de créer une ambiance de travail sereine au sein de la structure Georisk. La proximité des thématiques de chacune de nos thèses de doctorat a permis une entraide amicale et efficace, dans le respect intégral des intérêts de chacun.

Une grande reconnaissance pour mon amie **Hind Raïk** (Professeur de la langue française, et relectrice des documents), pour le temps passé à la relecture de mon travail et la correction de langue. Un grand merci pour son soutien et ses compliments encourageants.

Je remercie mon amie **Merieme El Youssoufi** (Professeur d'anglais), pour son aide lors de la traduction de mes articles publiés en anglais, mes sincères sentiments pour une grande dame combattante.

Je remercie mon amie **Najat Belmeki** (Professeur d'espagnole), pour la correction de la traduction du résumé en espagnole et pour ses encouragements et son soutien continu.

Et enfin je tiens aussi à exprimer mes remerciementsà la dynamique équipe formant le personnel du Département des Sciences de la Terre pour leur aide et leur soutien (Feu Namous, Rachida etc).

RESUME

Le présent travail concerne la province de Larache qui est localisée dans la partie Ouest de la chaîne du Rif qui présente la fréquence la plus importante au Maroc, en termes d'instabilités de versants, du fait de sa complexité lithologique, géomorphologique et climatique. Ces instabilités entraînent chaque année d'importants dégâts matériels et humains. La présente étude de l'aléa des mouvements de terrain a nécessité, plusieurs étapes : **1-** Une identification et inventaire des mouvements de terrain de grande ampleur grâce à la synthèse des données existantes, à la photo-interprétation et surtout par analyse sur le terrain.**2-**cartographier, structurer et hiérarchiser les sept paramètres conditionnant qui ont été pris en considération dans nos modèles: la lithologie, l'occupation du sol, la pente, l'exposition, la fracturation, l'hydrogéologie, et l'hypsométrie. **3-** Quatre approches ont été appliquées à des échelles différentes : **(i)** deux approches à échelle régionale, l'une experte et déterministe et l'autre heuristique (semi-quantitative) en utilisant une application de prise de décision "AHP" (Analytical Hierarchy Process) ; **(ii)** deux autres approches quantitatives à une échelle moyenne : la première est l'approche bivariée de la théorie de l'évidence, la seconde est une approche multivariée par régression logistique. Les cartes résultantes de l'analyse "AHP" montrent que les classes à susceptibilité forte et très forte représentent environ 39% de la surface totale étudiée, avec une densité des instabilités de terrain d'environ 42%. Les résultats ont révélé que les instabilités de terrain dans la province de Larache sont fortement influencées par la lithologie, le degré de pente et l'occupation du sol. Les zones les plus susceptibles aux instabilités de terrain sont situées dans les parties appartenant à l'unité de Tanger et l'unité Loukkos. D'après la comparaison des résultats obtenus par les deux approches, WofE et RL, nous avons constaté que les résultats obtenus par le modèle de la théorie de l'évidence (WofE) sont plus cohérents et aussi sont en parfait accord avec la réalité terrain pour les deux cas étudiés (la région d'EL Ksar El Kebir et la région de Souk El Quola). Tandis que l'approche par régression logistique, appliquée au niveau de la région de Souk El Quola, a donné des résultats presque identiques à ceux obtenus par l'approche WofE. Les cartes de susceptibilité qui ont été réalisées, serviront de base dans les prises de décisions dans tout projet d'aménagement urbain et routier au niveau de la province de Larache.

Mots clés : Aléa, Instabilité de terrain, Cartographie, photo-interprétation, méthode heuristique, AHP, approche WofE, approche RL, Province Larache

ABSTRACT:

This work concerns the province of Larache which is located in the western part of the Rif chain which has the highest frequency in Morocco, in terms of landslides, due to its lithological, geomorphological and climatic complexity. These instabilities cause significant material and human damage every year. This study of the hazard of landslides required several steps: **1**-An identification and inventory of large-scale landslides through the synthesis of existing data, photo-interpretation and especially by analysis in the field.**2**-map, structure and prioritize the seven conditioning parameters: lithology, land use, slope, aspect, fracturing, hydrogeology, and hypsometry. **3**-Four approaches were applied at different scales: **(i)** two regional-scale approaches, one deterministic and the other heuristic using a decision-making application "AHP" (Analytic Hierarchy Process); **(ii)** two other quantitative approaches at a medium scale: the first using the theory of weight of evidence, the second is a multivariate approach by logistic regression. The maps resulting from the "AHP" analysis show that the classes with strong and very strong susceptibility represent around 39% of the total surface studied, with a density of terrain instabilities of around 42%. The results revealed that terrain instabilities in the province of Larache are strongly influenced by lithology, degree of slope and land cover. The areas most susceptible to landslide are located in the parts belonging to the Tangier unit and the Loukkos unit. From the comparison of the results obtained by the two approaches, WofE and RL, we found that the results obtained by the model of the theory of evidence (WofE) are more consistent and also are in perfect agreement with the reality on the ground. For the two cases studied (the region of EL Ksar El Kebir and the region of Souk El Quola). While the logistic regression approach, applied at the level of the Souk El Quola region, gave results almost identical to those obtained by the WofE approach. The susceptibility maps that have been produced will serve as a basis for decision-making in any urban and road development project in the province of Larache.

Keywords: Landslides, digital cartography, remote sensing, AHP, heuristic method, WofE approach, RL approach, Larache Province.

ملخص

موضوع هذا العمل يهم ظاهرة الإنهيارات الأرضية داخل المجال الترابي لإقليم العرائش الذي يقع في الجزء الغربي من سلسلة الريف. إذ تعرف الظاهرة معدل تكرار سنوي مقلق، و ذلك بسبب التعقيدات الصخرية و الجيومورفولوجية و المناخية. يتسبب عدم استقرار الأراضي هذا، خلال فصل الشتاء من كل سنة، في أضرار مادية و بشرية كبيرة.

لدراسة خطر الإنهيارات الأرضية نتبع الخطوات التالية : * تحديد و جرد الإنهيارات الأرضية داخل المنطقة المدروسة، وذلك من خلال توليف البيانات الموجودة، وتحليل الصور الجوية وصور الأقمار الإصطناعية مرفوقة بدراسات ميدانية. **جمع البيانات حول العوامل المؤهبة: الطبيعة الصخرية، استخدام الأراضي، الإنحدار، التعرض، الإنكسارات التكتونية، الشبكة المائية، والإرتفاع عن سطح البحر.***أربعة مناهج علمية تم تطبيقها في هذه الدراسة:(1) نهجان في سلم إقليمي، أحدهما حتمي والآخر إرشادي باستخدام تطبيق يساعد على اتخاد القرار AHP (نظرية التسلسل الهرمي التحليلي).(2) نهجان كميان آخرين في سلم متوسط: الأول هو نهج ثنائي المتغير يعتمد على نظرية الدليل (WofE)، و الثاني هو نهج متعدد المتغيرات عن طريق التدرج اللوجستي (RL). أظهرت النتائج أن الإنهيارات الأرضية بإقليم العرائش يتأثر كثيرا بطبيعة الصخور ودرجة الإنحدار واستخدام الأراضي. و تقع المناطق الأكثر عرضة لعدم استقرار الأراضي في الأجزاء التابعة للوحدة الجيولوجية طنجة (unité de Tanger) و الوحدة الجيولوجية لوكوس (unité de Loukous).

انطلاقا من مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النهجين: RL و WofE، وجدنا أن النتائج المحصل عليها من خلال نموذج نظرية الدليل (WofE) تتوافق تماما مع الملاحظ على أرض الواقع، بالنسبة للحالتين المدروستين (منطقة القصر الكبير و منطقة سوق القلة). بينما أعطى نهج التدرج اللوجستي (RL) المطبق على مستوى منطقة سوق القلة نتائج مماثلة تقريبا بتلك التي حصلنا عليها باستخدام نهج الدليل (WofE).

خرائط احتمالية الإنهيارات الأرضية التي تم إنتاجها، يمكن الإعتماد عليها كأساس لاتخاذ القرار، في عدة أشغال تخص تهيئة التراب الإقليمي كمشروع التوسع الحضري وفتح طرق في المناطق الجبلة من إقليم العرائش ....

الكلمات المفتاح : الإنهيارات الأرضية، الخرائط الرقمية، الإستشعار عن بعد، نظم المعلومات الجغرافية، نمذجة المخاطر، إقليم العرائش.

RESUMEN

Este trabajo se refiere a la provincia de Larache que se encuentra en la parte occidental de la cadena del Rif que presenta la mayor frecuencia de Marruecos, en cuanto a deslizamientos, debido a su complejidad litológica, geomorfológica y climática. Estas inestabilidades provocan cada año importantes daños materiales y humanos. Este estudio de la peligrosidad de deslizamientos requirió varios pasos: **1-**Una identificación e inventario de deslizamientos de gran escala a través de la síntesis de datos existentes, foto-interpretación y especialmente por análisis en campo. **2-** Mapear, estructurar y priorizar los siete condicionantes parámetros: litología, uso del suelo, pendiente, aspecto, fracturamiento, hidrogeología e hipsometría. **3-** Se aplicaron cuatro enfoques a diferentes escalas: **(i)** dos enfoques a escala regional, uno determinista y otro heurístico utilizando una aplicación de toma de decisiones "AHP" (Analytical Hierarchy Process); **(ii)** otros dos enfoques cuantitativos a mediana escala: el primero utilizando la teoría del peso de la evidencia, el segundo es un enfoque multivariado por regresión logística. Los mapas resultantes del análisis "AHP" muestran que las clases con susceptibilidad fuerte y muy fuerte representan alrededor del 39% de la superficie total estudiada, con una densidad de inestabilidades del terreno en torno al 42%. Los resultados revelaron que las inestabilidades del terreno en la provincia de Larache están fuertemente influenciadas por la litología, el grado de pendiente y la cobertura del suelo. Las áreas más susceptibles a la inestabilidad del suelo se encuentran en las partes pertenecientes a la unidad de Tánger y la unidad de Loukkos. De la comparación de los resultados obtenidos por los dos enfoques, WofE y RL, encontramos que los resultados obtenidos por el modelo de la teoría de la evidencia (WofE) son más consistentes y además están en perfecto acuerdo con la realidad sobre el terreno. Para los dos casos estudiados (la región de EL Ksar El Kebir y la región de Souk El Quola). Mientras que el enfoque de regresión logística, aplicado a nivel de la región Souk El Quola, arrojó resultados casi idénticos a los obtenidos por el enfoque WofE. Los mapas de susceptibilidad elaborados servirán de base para la toma de decisiones en cualquier proyecto urbanístico y viario de la provincia de Larache.

Palabras clave: Deslizamientos, cartografía, teledetección, enfoque WofE, enfoque RL, heurístico aplicación,

Provincia de Larrache,

Liste des figures

FigureI. 1: Chaîne d'événements naturels provoquant des glissements de terrain et leurs rapports. 7
FigureI. 2 : Quelques exemples d'enjeux au niveau de la région de Larache (Rif septentrional). 8
Figure I.3 : les composantes de la quantification du risque 11
Figure I.4 : Organigramme illustrant les composantes de la vulnérabilité 12
Figure I.5 : Exemple d'une matrice d'évaluation de risque instabilité de terrain 14
Figure I.6 : Méthodologique d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain 16
Figure II.1 : Situation du secteur d'étude 17
FigureII.2: Données climatiques de la région. 19
FigureII.3 : Carte structurale du bassin méditerranéen 21
FigureII.4: Evolution géodynamique de la mer d'Alborant du Pliocène à l'actuel: 22
Figure II.5 : Carte géologique et structurale générale du Rif (Maroc) 24
Figure II.6 : Les séries stratigraphiques des terrains intrarifaines 25
FigureII.7 : Les séries stratigraphiques des flysch au niveau de Jebel Sougna à l'Est de la région 25
FigureII.8 : A: Coupe structurale à travers les gouttières d'Asilah-Larache 26
Figure II.9 : Log stratigraphique synthétiques du bassin du Gharb, près d'Arbaoua 27
Figure III.1 : Diagramme représentant différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité et de l'aléa 32
FigureIV.1: Illustration des caractéristiques intrinsèques et des facteurs externes 46
FigureIV. 2: Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité. 47
FigureIV.3: Données utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain 55
Figure IV.4: Une mosaïque de quatre images Landsat ETM+ utilisées 58
Figure IV.5.a: Composition colorée RVB (Natural color) 60
Figure IV.5.b: Composition colorée 123 rehaussée par Decorelation Strech 60
FigureIV.5.c: Composition colorée issu de l'ACP 60
FigureIV.6: Quelques exemples d'indices d'instabilité des versants repérés sur "Google Earth". 63
FigureIV.7: Quelques exemples d'indices d'instabilité des versants repérés sur la carte topographique. 64
FigureIV.8 :L'action de l'eau sur la réactivation des mouvements de terrain dans la régionde Souk El Quola. 65
FigureIV.9:Ecroulement des blocs de grès 66
FigureIV.10 : Exemples d'indices d'instabilité repérer lors des visites sur le terrain 67
FigureIV.11 : Démarche d'identification des types d'instabilités 68
FigureIV.12 : Cartes d'inventaire des mouvements de terrain de la province de Larache. 69
FigureIV.13 : Cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la province de Larache. 70
Figure IV.14 : Vue de paysage au niveau glissement de Souk EL Quola 72
FigureIV.15: Coupe interprétative au niveau du glissement de Souk EL Quola. 73
Figure IV.16 : glissement de Taria en 3D. 73
Figure IV.17 : Coupe interprétative au niveau du glissement de Taria. 74
Figure IV.18:Carte morpho-dynamique du glissement Taria 75
FigureIV.19 : Diagramme de plasticité de Casagrande des argileséchantillonnées à Taria. 77
Figure IV.21 : Essais du comportement mécanique des échantillons 79
Figure IV.20 : Etats limites d'apparition d'une ligne de glissement 78
FigureIV.22. Essais de compressibilité à l'oedomètre 79
Figure IV.23 : Courbes pressions interstitielles-déformations axiales pour les essais non drainés 80
FigureV.1 : la procédure de collecte des données et la structuration d'une base de données opérationnelle. 86
Figure V.2 : Quelques exemples de filtres appliqués lors de la réalisation des cartes de faciès 87
Figure V.3 : cartes de faciès à l'échelle régionale, 1 :200 000éme et à moyenne échelle 88

Figure V.4 : Fréquences des mouvements au niveau de chaque classe de lithologie 89
Figure V.5: Cartes d'occupation des sols 91
FigureV.6 : Fréquences des mouvements de terrain par classe d'occupation du sol..... 92
FigureV.7: Cartes du réseau hydrographique au niveau de la province de Larache. 95
Figure V.8: Classification du réseau hydrographique extrait du MNT sous ArcHydro..... 95
FigureV.9 : Anomalies du réseau hydrographique. 96
Figure V.10 : Rosaces directionnelles des Anomalies du réseau hydrographique. 96
FigureV.11 : Cartes de densité du réseau hydrographique 97
Figure V.12: Fréquences des mouvements de terrain par classe de densité du réseau hydrographique..... 98
FigureV.13:la démarche adoptée pour la réalisation de la carte de fracturation 101
Figure V.14: Extraction visuelle des linéaments en utilisant les filtres spatiaux sur Erdas Imagine.11..... 103
Figure V.15:Diagramme en rose présentant les orientations des linéaments manuels..... 103
Figure V.16 Mosaïque des images téléchargées du site 104
Figure V.17: Extraction automatique des linéaments 105
Figure V.18: Diagramme en rose présentant les orientations des linéaments automatique..... 106
Figure V.19: Représentation des données structurales collectées sur le terrain 108
FigureV.20: Données de fracturation récoltées sur le terrain et sur la bibliographie..... 109
FigureV.21:Assemblage des données sur la fracturation 110
Figure V.22:Carte de densité de fracturation..... 111
Figure V.23 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité de fracturation 111
Figure V.24 : carte des gradients de pente..... 113
Figure V.25 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de gradients de pente..... 114
Figure. V.26: Carte des expositions des pentes..... 115
Figure V.27 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'exposition..... 115
FigureV.28:A: carte hypsométrique..... 116
Figure V.29 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'altitude..... 117
FigureV.30 : Le cycle de l'eau sur un versant non boisé (a) et boisé (b) 118
FigureV.31 : 1: les moyennes des précipitations mensuelles entre 1950 et 2000; 2: les précipitations annuelles entre 1992 et 2013..... 121
FigureV.32 : L'interpolation des moyennes annuelles des précipitations par régression linéaire au niveau de la péninsule Tangéroise. 122
Figure V.33 : Carte des précipitations, issu d'interpolation polynomiale locale (IPL), ... 123
FigureV.34 : Carte de l'aléa sismique régional autour de la Méditerranée 124
FigureV.35 : Distribution spatiale des séismes (1910 - 2018) au niveau du Rif septentrional..... 125
FigureV.36 : (A) Interpolation IDW en termes de fréquence d'événements ; (B) Interpolation IDW en termes de magnitude..... 126
Figure V.37 : Corrélation entre la magnitude d'un séisme et la distance entre l'épicentre du séisme et le mouvement de terrain le plus lointain déclenché par ce séisme,..... 127
Figure38 : Relation de l'activité sismique avec les instabilité de terrain. 129
Figure VI.1: L'échelle de comparaison binaire entre les différents facteurs conditionnants..... 135
Figure VI.2: La procédure de l'exécution de la fonction AHP, sur ARCmap..... 136
Figure VI.3: Démarche suivie pour l'élaboration de la carte de susceptibilité aux instabilités de terrain par approche heuristique..... 137
Figure VI.4: Cartes de susceptibilité des instabilités de terrain par approche heuristique, ... 144

Figure VI.5: Résultats de corrélation entres les classes de susceptibilités et les mouvements de pente cartographiés 145
Figure VII.1 : La démarche suivie au cours de la modélisation. 148
Figure VII.2 : Schémas illustrant le principe de calcul du poids des facteurs 150
Figure VII.3: Schéma relationnel des fonctions utilisées sur le module "Spatial Data Modeller" 153
Figure VII.4 : Cartographie et préparation de la variable à modélisér 156
Figure VII.5 : Procédures de calage et de validation des variables prédictives 158
FigureVII.6 (b) : Les cartes des facteurs liées à la topographie 159
Figure VII.6(a) : Carte topographique de la région d'EL quola 159
Figure VII.7(a) : La carte geologique 1/500 000 d'après Suter 1980 160
Figure VII.8 : Carte des densités du réseau hydrographique 162
Figure VII.9: Carte des densités du réseau hydrographique 162
Figure VII.10 : Jeu de cartes de variables prédictives, adopté dans la modélisation WofE, au niveau de la région d'EL KsarEL Kebir 164
Figure VII.11.a : les rasters issus du traitement "Weight of evidence"; en appliquant la fonction "calculate response", au niveau de la région de Souk El Quola 169
Figure VII.11.b : les rasters issus du traitement "Weight of evidence"; en appliquant la fonction "calculate response", au niveau de la région d'EL Ksar El Kebir 170
FigureVII.12: résultats des tests de validation (SRC et PRC), ... 172
FigureVII.13: Les subdivisions des classes de susceptibilité aux instabilités des versants 173
FigureVII.14: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de Souk El Quola, issues du modèle "WofE" 174
Figure VII.15:Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région d'EL Ksar El Kebir, issues du modèle "WofE" 175
Figure VII.16: Corrélation des instabilités de terrain déjà connus. 176
Figure VIII.1 : Organigramme de l'approche adoptée dans l'étude. 182
Figure.VIII.2 : les rasters issus du traitement "Régression Logistique"; en appliquant la fonction "Logistic Regression", au niveau de la région de Souk El Quola 186
Figure.VIII.3 : les rasters issus du traitement "Régression Logistique"; en appliquant la fonction "Logistic Regression", au niveau de la région de El Ksar El Kbir 187
FigureVIII.4: les courbes ROC (RL): A : carte de Souk El Quola B: carte d' El Ksar El Kebir 188
FigureVIII.5: Classification par la méthode des seuils naturels "Natural breaks". 189
FigureVIII.6: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de la région d'El Ksar El Kebir, issues du modèle "Régression Logistique". 190
FigureVIII.7: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de Souk El Quola, issues du modèle "Régression Logistique". 191
Figure VIII.8: la distribution du total des instabilités de terrain cartographiées au niveau des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain 193
Figure VIII.9: A et B la distribution du total des instabilités de terrain cartographiés au niveau des classes de susceptibilité aux mouvements de pentes 194
Figure IX.1 : Cas des glissements (G27;G28) qui affectent le barrage El Khroufa près de la digue. 196
Figure IX.2 : Cas des glissements (G30;G31) qui affectent le barrage Oued El Makhazine au niveau du réservoir 197
Figure IX.3 : Glissements qui affectent les routes 197
Figure IX.4 : Superposition du réseau routier actuel sur la carte d'inventaire des instabilités de terrain 198

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Evaluation du niveau de risque par combinaison d'un niveau d'aléa et d'un niveau de vulnérabilité. 12
Tableau I. 2 : Classes de risque "Instabilité de terrain" (d'aprés Maquaire et al., 2006) 14
Tableau III.4. a : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles:approches qualitatives et semiquantitatives 34
Tableau III.4. b : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles 35
Tableau III.4. c : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles 36
Tableau IV. 1: Classification des mouvements de pentes selon Cruden et Varnes, 1996 45
Tableau IV.2. a : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application. (Monique Moine, 2008 ; adapté) 50
Tableau IV.2. b : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application, au Maroc. 51
Tableau IV. 3: Données sources utilisées. 57
Tableau IV. 4: Caractéristiques du capteur ETM+. 57
Tableau IV. 5 : Caractéristiques physiques des formations au niveau du glissement "Taria". 76
Tableau IV. 6 : Classes de susceptibilités en fonction du coefficient de sécurité. 78
Tableau IV.7 : Résultats des essais de compression triaxial pour deux échantillons 80
Tableau V. 1 : Les indices attribués pour chaque classe de lithologie. 89
Tableau V. 2 : Les indices attribués pour chaque classe d'occupation du sol 93
Tableau V. 3 : Les indices attribués pour chaque classe du réseau hydrographique 98
Tableau V. 4 : caractéristiques de l'image Landsat 8 104
Tableau V. 5 : Le pourcentage de l'information au niveau de sept bandes de l'image Landsat 8 Oli 105
Tableau V. 6 : Les indices attribués pour chaque classe de densité de fracturation 112
Tableau V. 7 : Les indices attribués pour chaque classe de pente 114
Tableau V. 8 : Les indices attribués pour chaque classe de l'exposition. 116
Tableau V. 9 : Les indices attribués pour chaque classe d'altitude. 117
Tableau V. 10 : Synthèse des différents facteurs acquis et structurés pour la cartographie de la susceptibilité 131
Tableau VI. 1 : Echelle de degré de susceptibilité d'après Fell et al, ; 2008 138
Tableau VI. 2 : L'estimation de l'occurrence des facteurs conditionnants par interpolation 141
Tableau VI. 3 : Les matrices utilisées pour le calcul du poids 142
Tableau VII. 1 : Les fonctionnalités des différents outils de la rubrique "Spatial Data Modeller tools" implantées sur ArcGis10.3 154
Tableau VII. 2 : Variables prédictives retenues lors de la modélisation "WofE" 157
Tableau VII. 3 : Calcul du poids des différentes variables prédictives introduites dans la modélisation, au niveau de la région de Souk El Quola. 166
Tableau VII. 4 : Calcul du poids des différentes variables prédictives introduites dans la modélisation, au niveau de la région d'El Ksar El Kebir 167
Tableau VII. 5 : Résultat du test d'indépendance conditionnelle, des simulations retenues, au niveau des régions d'El Ksar El kebir et de Souk EL Quola 168
Tableau VII. 6 : Calculs statistiques de la densité des points d'instabilités de terrain par rapport aux classes de susceptibilité au niveau des cartes de probabilité résultantes. 176
Tableau VIII. 1 : Coefficients de régression (RL) et la standard déviationdes sept facteurs prédictifs qui ont été corrélés avec les glissements de terrain 184
Tableau VIII. 2: Calculs statistiques de la densité des points d'instabilités de terrain par rapport aux classes de susceptibilité au niveau des cartes de probabilité résultantes par régression logistique 192

Introduction générale

Les problèmes d'instabilité de talus ou de versants sont trop fréquents dans le domaine rifain. Ils peuvent représenter un enjeu majeur lorsqu'ils interfèrent avec les activités humaines et les biens exposés à ce type de danger. Dans le Rif, plus de 50% du budget total, alloué chaque année aux Directions Provinciales des Travaux Publics, est investi dans les travaux d'entretien et de remise en état des routes suite aux désastres causés par les mouvements de pentes. Les données statistiques pour huit provinces du Rif sur les instabilités de terrain qui endommagent le réseau routier indiquent que les enjeux du risque d'instabilité des versants dépassent, dans la plupart des cas, les capacités d'intervention des services de l'état. La gestion des risques nécessite une stratégie basée sur des méthodes agiles, correctes, objectives et qui mettent en évidence la distribution spatiale des versants potentiellement instables par rapport aux paramètres de contrôle.

Ces dernières décennies, l'intensification de l'activité des mouvements de terrain et l'augmentation de leur impact sont attribués d'une part à l'agressivité climatique que le Nord du Maroc a connue, etd'autre part à la pression humaine accrue sur des territoires plus ou moins sensibles (Gutierrez *et al.*, 2010). Dans la région de Larache (Rif occidental), ces instabilités de terrains ont causé des pertes importantes socio-économique et écologique, telles que la dégradation des infrastructures de base et la diminution des surfaces agricoles utiles par le basculement des champs agricoles, ce qui diminue la qualité de vie des habitants et entrave le développement durable.

Le plus souvent, nous ne pouvons pas s'opposer de front aux excès de la nature tels que les mouvements de terrain, mais il est possible de localiser les principaux secteurs où ces phénomènes ont le plus de chance de survenir dans le futur. A partir de là, on peut, dans le meilleur des cas, chercher à les éviter ou à s'enprotéger, ou encore diminuer les dommages qui peuvent être causé. Pour atteindre ces objectifs et pour une meilleure conception des opérations d'aménagement ainsi qu'une meilleure maîtrise des travaux de réalisation, la cartographie des zones susceptibles à l'amont devient une nécessité. Ces dernières permettent de réaliser les inventaires et des synthèses à différentes échelles.

Cette réalité prend une signification d'autant plus forte que l'on observe une tendance générale de baisser des seuils de risques naturels acceptables par la population et les pouvoirs publics (Canuti *et al.*, 1999). On observe une multiplication des travaux dédiés aux instabilités des versants (Gokceoglu et Sezer, 2009). Ainsi unecarte prévisionnelle des mouvements de terrain au 1/1000000 a été réalisée, pour la première fois au niveau des régions rifaines, par Millies-Lacroixen 1968. L'étude a été basée sur une opinion très subjective, etles facteurs utilisés dans cette cartographie sont : la lithologie au sens large, les hauteurs moyennes de précipitation annuelle, la topographie, le couvert végétal et l'action anthropique. En 1980, A.El Gharbaoui a élaboré une cartographie des mouvements de pente au niveau de la région Tangéroise. Plus tard, des auteurs marocains (Margaa, 1994 et Fares, 1994) ont repris les préoccupations de la cartographie ZERMOS (Zones Exposées aux Mouvements du Sol et du Sous-sol) dans les villes d'Al Hoceima et de Taounate, en définissant une méthodologie utilisant le mode de cartographie semi-quantitative basé sur la simulation des facteurs à partir de la numérisation des données de surface. Plus récemment, L.Aitbrahim& al.,2018 et M.Mastere, 2011, ont appliqué des méthodes probabilistes indirectes afin d'évaluer l'aléa des mouvements de versant dans la région de Chaouen par analyse statistique probabiliste et par cartographie numérique.

Les études méthodologiques visant la réalisation de telles cartes se sont multipliées en bénéficiant de la généralisation des systèmes géo-informationnels, de la vulgarisation des données spatiales par l'intermédiaire des images satellitaires, et du développement des modèles statistiques pour expliquer et

prévoir les phénomènes naturels (Van Ouesten, 2008). Les méthodes probabilistes quantitatives et semi-quantitatives ont pris une place particulière. Les approches probabilistes ont été considérées comme les plus performantes par plusieurs scientifiques (Fell et al., 2008). Ces approches permettent d'obtenir des cartes issues de la relation statistique entre un certain nombre d'événements spatialisés (Instabilités de Terrain) et un jeu de facteurs de prédisposition, à différentes échelles. Cependant l'acquisition des données et leur structuration ainsi que la validation des modèles prennent un temps considérable.

La mise en œuvre d'une véritable démarche pluridisciplinaire est nécessaire afin de résoudre ces problématiques. De ce fait, notre travail consistera à la combinaison d'une étude géomorphologique, de cartographie et d'analyse spatiale, des méthodes statistiques multi-variées et bi-variées.

Notre travail sera focalisé sur quatre objectifs principaux qui structurent la thèse :

✓ La cartographie des phénomènes à modéliser, ce qui permet de dresser une descriptive des mouvements de versant selon leur typologie et d'identifier les facteurs de prédisposition et de déclenchement. Aussi la réalisation d'un zonage expert de la susceptibilité qui servira comme support de base pour la comparaison avec d'autres méthodes.

✓ Constituer des bases de données adaptées aux différentes échelles de travail prenant en considération la résolution des données, la cohérence géographique des différents facteurs etleur rapport de causalité avec les phénomènes dépendants ;

✓ Appliquer les approches convenables pour chaque échelle du travail, et les tests appropriés pour la validation,

✓ Comparer et discuter les résultats obtenus par chaque modèle ;

Cette thèse est articulée en deux parties subdivisées en neuf chapitres :

- **La première partie** présente le contexte général de la recherche, une vue synoptique sur les travaux antérieurs, ainsi qu'une description détaillée du terrain d'étude. Elle contiendra le premier et le deuxième chapitre.

  - **Le premier chapitre** est orienté à la fois sur une présentation du cadre thématique de l'étude au niveau de notre zone d'étude et sur les travaux antérieurs similaires qui ont été effectués. Ensuite, nous ferons un rapide état d'art sur les concepts de base pour l'évaluation du risque "instabilité de terrain", ainsi que l'apport de la géomatique dans la compréhension des phénomènes, la cartographie de la susceptibilité et à l'analyse spatiale du phénomène étudié.
  - **Le second chapitre** décrit les caractéristiques géomorphologiques, climatologiques, géologiques et occupation du sol au niveau de la province. Dans ce sens, la zone d'étude a été positionnée dans son cadre régional au niveau de la chaîne rifaine. Du coup, une synthèse du cadre lithologique et tectonique des différentes unités structurales a été effectuée. Cette description constitue une première approche pour la compréhension des spécificités locales dans la prédisposition aux phénomènes de mouvements de versant.
  - **Le troisième chapitre** dresse le bilan des connaissances sur les méthodes utilisées dans ce travail : les méthodes expertes et déterministes, les méthodes probabilistes multi-variées etbi-variées.Nous y discuterons les opportunités de ces méthodes et leurs limites.

- **La deuxième partie** concerne la description détaillée de la procédure adoptée pour l'étude, l'analyse des instabilités de terrain au niveau de la province de Larache, la collecte et la cartographie des différents facteurs prédictifs, la structuration de la base de données et en fin la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la même région à différentes échelles et en utilisant des approches différentes: qualitative (expert), semiquantitative et quantitative (probabilistes). Nous discuterons aussi la validation de chacune au fur et à mesure.

Cette étape est donc la concrétisation de notre état d'art. En outre, cette partie de thèse explique le choix des méthodes adaptées aux différentes échelles. Elle propose aussi une démarche pour la sélection et la pondération des paramètres, l'évaluation de l'occurrence spatiale et temporelle des phénomènes dépendants. Elle sera détaillée en cinq chapitres (quatrième, cinquième, sixième, septième et huitième chapitres).

- **Le quatrième chapitre** essaie de présenter d'une part les méthodes de classification des mouvements de terrain, ce qui permet de définir, en termes de typologie les mouvements de terrain recensés dans la région d'étude. D'autre part, l'inventaire des instabilitésdes versants sera réalisé sous forme de carte de distribution de la variable mise en cause, puis analysé en termes de densité. Dans ce chapitre, nous mettrons le point sur l'apport des outils géospatiaux dans l'identification des mouvements de terrain et l'étude de cas en utilisant la méthode experte.
- **Le cinquième chapitre,** est consacré à l'élaboration d'une base de données multi-sources et multi-échelles permettant la superposition des variables prédictives avec la variable modélisable (Instabilité de terrain). Ceci pour une décision logique de classification des différents facteurs qui seront introduits dans des modèles de prédiction de la susceptibilité, qu'ils soient qualitatifs, quantitatifs ou semi-quantitatifs. En effet, nous avons procédé à l'acquisition, la description, et la cartographie des différents facteurs (prédictifs et déclencheurs), ainsi que leur analyse, leur spatialisation, leur numérisation et leur intégration dans un environnement SIG.
- **Le sixième chapitre** présente l'art de la réalisation d'une cartographie de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, à une échelle régionale (1/100 000), en utilisant l'approche heuristique, par combinaison de cartes d'index. Cette partie illustre l'effort réalisé pour l'acquisition, la description, la hiérarchisation, la mise en forme et l'analyse des facteurs de prédisposition et les facteurs de déclenchement dans le secteur d'étude. Dans ce cadre nous avons développé une analyse cartographique de la fracturation récente au niveau de notre secteur d'étude (la région de Larache), en se basant sur les linéaments extraits des images satellitaires, la bibliographie, l'analyse morpho-structurale du MNT, et les données du terrain. Ceci est associé à l'extraction et à l'analyse du réseau hydrographique, ce qui permet d'extraire les anomalies et les perturbations tectoniques.

  Notre travail a été renforcé par l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain, en appliquant une méthode qui permet d'affiner le processus de décision en examinant la cohérence et la logique des décideurs (Caillet, 2003), c'est la technique AHP (Analytic Hierarchy Process) développée par Thomas Saaty dans les années 80, qui a été utilisée pour la pondération des poids des critères indépendants, selon une arborescence hiérarchique de critères et de sous-critères. La représentation de l'arborescence s'est faite sous la forme de couple père-fils.
- **Le septième chapitre** développe la cartographie de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain à méso-échelle sur deux feuilles de cartes (1/50 000), celle de Ksar El Kebir et celle de Souk El Quola, par approche bi-variée fondée sur le théorème de Bayes (Théorie de l'Evidence ou Weight of Evidence), en utilisant l'outil SDM sur Arcmap.10.3.
- **Le huitième chapitre** montre la cartographie de la susceptibilité des versants aux mouvements gravitaires au niveau des deux feuilles de cartes (Ksar El Kebir et Souk El Quola au 1/50 000), par approche multivariée fondée sur les régressionslogistiques (Weighted Logistic Regression). Nous discuterons ensuite des résultats obtenus en comparant les performancesdes approches bi-variée et multi-variée.
- **Le neuvième chapitre** présente l'apport des cartes prévisionneles du risque liè aux instabilités de terrain dans l'aménagement du territoire.

- **En conclusion,** nous revenons sur l'intérêt et la fiabilité des méthodes développées lors de nos modélisations. Cela résumera les résultats généraux de nos travaux et permettra d'élucider les perspectives de recherches éventuelles.

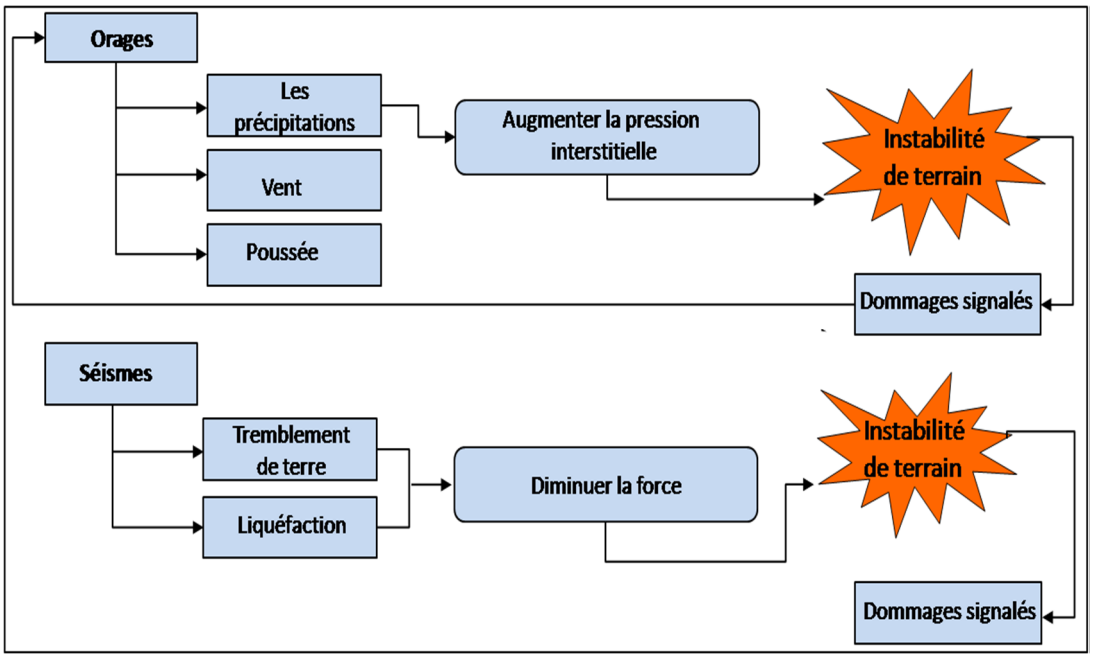
LA PREMIERE PARTIE: CONTEXTE GENERAL DE LA RECHERCHE

CHAPITRE.I: CADRE THEMATIQUE DE L'ETUDE DES MOUVEMENTS GRAVITAIRES DANS LA PROVINCE DE LARACHE-RIF SEPTENTRIONAL-

1. Thématique et intérêts du travail :

1.1. Thématique et problématique :

Les mouvements gravitaires ou "glissements de terrain" sont reconnus comme le troisième type de catastrophe naturelle en termes d'importance mondiale (Castellanos, 2008). En raison des conditions naturelles ou d'actes humains, les glissements de terrain ont entraîné de multiples pertes humaines et économiques (Guzzetti, 2000). Les ruptures de pente individuelles ne sont généralement pas aussi spectaculaires ni aussi coûteuses que les tremblements de terre, les inondations majeures, les ouragans ou certaines autres catastrophes naturelles. Or, ils sont responsables des pertes socioéconomiques qui sont beaucoup plus importantes que celles qui leur sont communément imputées (Schuster, 1996), du fait que les ruptures de pente sont plus répandues, ainsi au fil des années, elles peuvent causer plus de dégâts aux biens que tout autre danger géologique (Varnes et IAEG, 1984). En effet, les instabilités des versants constituentun élément important de beaucoup de catastrophes naturelles majeures mais leurs dégâts sont la plupart du temps masqués en les associant aux processus déclencheurs (Castellanos, 2008) comme, par exemple, les tremblements de terre, les inondations, les éruptions volcaniques et les tempêtes tropicales....Plusieurs dommages et pertes humaines associées aux séismes et aux phénomènes météorologiques sont en fait dus, d'une façon directe, aux instabilités de terrain; bien que ces dommages soient attribués à l'événement principal (voir la Figure I.1), ce qui entraîne une sous-estimation substantielle des données statistiques disponibles sur l'impact direct des mouvements de terrain.



FigureI. 1: Chaîne d'événements naturels provoquant des glissements de terrain et leurs rapports. (Adopté d'aprés Castellanos, 2008)

La province de Larache est une zone qui présente une variété spatiale sur de courtes distances, où on passe de la plaine à la montagne avec une topographie accidentée. C'est une zone, tectoniquement toujours active, où dominent des formations marneuses. La région connait aussi des périodes orageuses, caractérisées par des averses fortes et concentrées sur des périodes courtes, ce qui fait d'elle un lieu favorable aux instabilités de terrain. Plusieurs dégâts ont été enregistrés au niveau de la région surtout au niveau du réseau routier (Figure I.2).



FigureI. 2 : Quelques exemples d'enjeux au niveau de la région de Larache (Rif septentrional).

Les préoccupations à l'aléa mouvements de pente datent de 1846 (A. Collin, et al). Les chercheurs s'intéressaient à leursmorphologies, à leurs facteurs déclencheurs et au calcul et analyse de la stabilité des pentes, ceci après avoir rencontré des problèmes lors de l'aménagement du territoire, de l'urbanisation, au niveau du réseau routier et des ouvrages de stabilisation. Mais les ruptures causées par les mouvements de talus se reproduisent souvent peu de temps après la fin des travaux. De tels phénomènes peuvent peser lourd dans la balance économique d'un ouvrage d'art. Cependant les décideurs souhaiteraient avoir des documents de base bien adaptés et qui les aideront dans l'orientation de l'implantation des sites d'aménagement, des nouvelles extensions urbaines, des ponts, des chaussées et des tracés de nouvelles routes.

Or les instabilités de terrain sont des ensembles polygéniques qui résultent de l'action combinée de facteurs complexes ; les uns permanents créant les conditions indispensables aux instabilités ; les autres, dits facteurs dynamiques, agissant sous la dépendance des premiers et jouant le rôle de détonateur. La complexité des facteurs prédictifs au niveau des terrains concernés rend parfois délicat le diagnostic du phénomène. La prévention des risques et la protection des populations nécessitent une cartographie des zones susceptibles aux phénomènes gravitaires, cette cartographie doit prendre en compte lacomplexité des facteurs prédictifs, mais aussi être la plus objective possible.

A l'égard des risques encourus par les populations face aux mouvements de terrain, de nombreuses recherches ont été menées au cours de ces dernières décennies. Une partie importante de la littérature sur les mouvements gravitaire se focalise sur la prédiction et la cartographie de ces mouvements de terrain en essayant de voir où, et parfois quand, de nouveaux mouvements gravitaires pourraient avoir lieu dans une région prédisposée (Carrara et al., 1991 ; Guzzetti et al., 1999 ; Soeters et van Ouesten, 1996 ; Glade et

Crozier, 2005a). En d'autres mots, la plupart de ces cartes essayent de localiser les futures occurrences de glissements de terrain.

1.2. Intérêt de l'étude:

La principale question de recherche est la suivante : comment concevoir et mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation spatiale de l'aléa "mouvement de terrain" en tenant compte des données disponibles, afin d'élaborer des documents cartographiques fiables, qui serviront comme outils de base pour la gestion des risques liés à ces phénomènes et aussi dans l'aménagement du territoire ?
Ce premier chapitre vise à replacer ce travail dans son contexte global de recherche, sa base scientifique et son intérêt sociétal. Nous commençons par une synthèse globale des travaux antérieurs traitant l'aléa "instabilité de terrain", au sens large, au niveau du rif et au niveau de la région d'étude en particulier. Ensuite, nous ferons un rapide état d'art sur les approches prédictives de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain, ainsi que l'apport de la géomatique dans la compréhension des phénomènes et à leur analyse spatiale.
L'intérêt socioéconomique de cette étude ciblera d'une part la sécurité des gens et de leurs biens, la protection des infrastructures et de l'environnement et d'autre part la prévision des zones à éviter pour des aménagementsfuturs.
L'intérêt scientifique se manifeste dans l'application des approches statistiques et probabilistes afin de produire des cartes de susceptibilité aux phénomènes gravitaires, les plus objectifs qu'ils soient et qui prend en compte des caractéristiques du terrain, au niveau d'une région où les études à cet égard sont très modestes et qui sont basées sur l'expertise du chercheur. Ceci nous mène à répondre aux questions suivantes :

- ✓ Quelles données d'observation de la terre conviennent à l'inventaire des glissements de terrain au niveau de la région de Larache ?
- ✓ Quelles sont les conditions lithologiques, hydrologiques, morphologiques et tectoniques dans lesquelles les glissements de terrain sont plus susceptibles de se produire dans les zones d'étude de cas ?
- ✓ Quels outils et méthodes d'analyse spatiale pourraient être appliqués pour traiter les données existantes et produire des cartes de susceptibilité fiables et objectives ?
- ✓ Quelle approche d'évaluation de l'aléa "instabilité de terrain" (qualitative, semi-quantitative et quantitative) est la mieux adaptée aux conditions de la région d'étude ?
- ✓ Quelle est la répartition des instabilités de terrain, de la vulnérabilité et des risques dans les zones d'étude ?
- ✓ Comment les informations sur les risques de glissements de terrain peuvent-elles être incorporées dans les plans de prévention des catastrophes et le système d'alerte précoce au niveau régional et national ?

2. Historique des travaux antérieurs :

Les premières tentatives de la cartographie du risque mouvements de terrain ont été menées au Maroc après l'expérience des cartes géotechniques de quelques grandes villes : Fès, Tanger, Rabat... (Humbert et Jeanette, 1962), notamment par Millies-Lacroix en1968. Cet auteur a établi une carte prévisionnelle des zones exposées au risque de mouvements de terrain pour l'ensemble du domaine rifain à l'échelle de 1/1000 000ème, carte qui tient compte de cinq facteurs : la lithologie, la topographie, le climat, la végétation et l'action anthropique. Dans le dossier destiné à l'aménagement du bassin versant de l'Oued Sebou (fleuve), Avenard, 1965 a traité les mouvements de terrain du Pré-Rif, avec une série de cartes aux échelles 1/50 000, 1/100 000, 1/200 000 et 1/500000ème. Il y a relevé, outre les zones de ravinements et

érosions, les zones de solifluxion et de recul de berges de rivières par sapements. La thèse de Maurer, 1968, contient trois cartes hors texte. Deux d'entre elles traitent les régions de Jbel Khizana et Sanhaja Sraïr, et sont à l'échelle de 1/50000ème. La troisième traite l'ensemble du Rif central et est à l'échelle 1/300000ème. Sur ces cartes qui traitent de l'évolution géomorphologique et de la dynamique géomorphologique actuelle, les mouvements de terrain tiennent une part "honorable". Malheureusement, à ces échelles, les phénomènes ne peuvent être représentés que sous forme de symboles, localisés de manière approximative. Malgré ces documents pionniers, les ingénieurs et les chercheurs marocains ne s'intéressaient qu'aux études ponctuelles liées à la confortation des talus du réseau routier. Exception fait pour les cartes d'El Hoceima, Taounate, Chaouen, Tétouan et de la péninsule de Tanger qui ont été préparées dans le cadre de thèses de Doctorat (Margaa, 1994; Fares, 1994 ; M.Manssour, 1998; El Kharrim, 2002 ; Sossey Alaoui, 2005). Ces études ont été des sujets des mouvements actifs recensés dans le Rif, pour la remise en état du réseau routier et ferroviaire affecté. Dans notre secteur d'étude, plusieurs routes et autoroutes ont fait l'objet de plusieurs rapports. Ces mouvements sont souvent répétés depuis le début des années 60. A ces travaux s'ajoute la thèse de M.Mastere, 2011, qui a essayé d'appliquer des méthodes quantitatives et semi-quantitatives dans le but de faire un zonage des secteurs susceptibles aux instabilités de terrain dans la province de Chaouen à une échelle régionale et locale. D'autres pérspéctives se sont instalés au Maroc ces deux dérniéres années, dans le domaine de l'intéligence artificielle (Machine Learning) appliqués à la géstion des risques naturels, notament les instabilités de terrain (M.El Moulat, 2020; T.Bouramtane et al, 2021). Ces études peuvent ouvrir d'autres voies de recherches spécifiques et pointues qui offrent une flexibilité dans la conception des approches appropriées à chaque cas.
Dans la région de Larache, les études concernant les instabilités de pente sont très rares et trop modestes. Elles s'intéressent surtout aux études géotechniques. Ces travaux sont liés à des œuvres de renforcement au niveau de certains points sur des routes provinciales. Cette région, étant donné le carrefour qui relie le Nord du pays au sud et l'est à l'Ouest, mérite plus d'intérêt. C'est dans ce cadre où vient notre travail, qui a pour objectif d'élaborer des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain pour servir à d'éventuels plans d'aménagement.

3. Concepts de base pour l'évaluation de la cartographie des mouvements de pente :

Dans ce paragraphe, nous allons définir quelques notions qui sont souvent confondus : risque naturel, catastrophe naturelle, aléa, vulnérabilité et susceptibilité. Il semble important de préciser ces concepts de base afin d'éclaircir l'objectif de notre recherche. Plusieurs définitions ont été proposées, notamment des informations et définitions intéressantes dans l'ouvrage de Dauphiné (2001) ou dans celui plus synthétique de Dubois Maury (2001). La terminologie utilisée sera conforme aux définitions proposées par Varnes (1984) ou à celles du glossaire multilingue international sur la gestion des catastrophes naturelles élaboré lors de la décennie internationale pour la réduction des catastrophes naturelles (IDNDR), (Horlick-Jones et al., 1995 ; Leroi, 1996 ; Finlay et Fell, 1997 ;), et adapté par P.Maquaire (2002).

3.1. Catastrophe naturelle et risque naturel :

Souvent les termes "catastrophe naturelle" et "risque naturel" sont employés improprement. Le mot "catastrophe" peut apparaître souvent assez utilisé, car il est très relatif et très subjectif. En effet, il dépend des préjugés ou des avis que peut avoir un individu ou une société d'un événement ou d'un phénomène donné (P.Maquaire (2002). Il pourra apparaître catastrophique pour les uns et sembler assez banal et presque anodin pour les autres. Il est donc important de se mettre d'accord sur ce que ces termes signifient réellement.

Le terme "catastrophe" a de nombreux synonymes comme désastre (disaster), calamité publique, sinistre, cataclysme, etc. qui sont plus ou moins souvent employés. Ainsi, une catastrophe naturelle est un événement qui, lorsqu'il se manifeste, prend en défaut la capacité de réaction et d'intervention de la communauté concernée. On définit un événement naturel comme une catastrophe a posteriori, après qu'il se soit manifesté sur un territoire donné. En fonction de la capacité des sociétés à réagir et à se protéger, l'événement devient ou non une catastrophe puisque la gestion de l'événement dépend aussi et surtout du niveau de développement de la communauté touchée (Manche, 1997). Ce terme "catastrophe" décrit une réalité, c'est-à-dire un phénomène qui s'est produit.Par contre, le risque n'est que potentiel. Il mesure le degré attendu de pertes humaines, de blessés, de dommages aux biens, d'atteinte à l'activité économique au cours d'une période bien définie et dans une région donnée, pour un aléa particulier (en occurrence l'instabilité des terrains). Cette définition a été proposée par le l'OUNDRO, 1979 (Office of the United Nations Disaster Relief co_Ordinator) et reprise par plusieurs auteurs. Notamment l'expression "Risque naturel majeur" est utilisée pour le risque caractérisé par une faible fréquence et une énorme gravité (nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement).La même définition a été reprise dans le détail par Varnes, 1974 et 1984, qui définit le risque comme étant un concept qu'on peut quantifier par le produit de la vulnérabilité (V), la probabilité d'occurrence (A = aléa) du phénomène en cause (mouvement de terrain) et le coût (C) des éléments exposés au risque (les enjeux estimés), (Figure I.3) ce qui est représenté par la formule suivante :

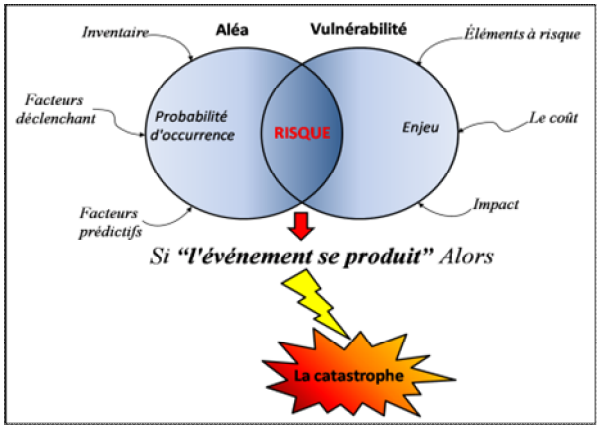


Figure I.3 : les composantes de la quantification du risque *(Camille Renou, ACRI-ST, 2007; Castellanos, 2008).*

Soit la fonction suivante :

$$Risque = f(A \times V \times C)$$

A : l'aléa représente la "menace potentielle" d'un phénomène naturel qui aura une certaine intensité, concernera un territoire bien definit, dans un interval temps ;

V : la vulnérabilité caractérise l'importance des conséquences prévisibles concernant l'aléa, dans tous les domaines anthropiques qui peuvent être affectés (personnes, biens, habitations, activités économiques, infrastructures, patrimoines, milieux).

C : est le cout des enjeux causés

Le niveau de risque doit être établi pour chacun des aléas concernés. Dans certains cas, on tiendra compte des interactions entre les différents aléas dans une démarche multirisque. Ces valeurs pourront être qualitatives ou quantitatives (Leroi, 1996). Cela dépendra de la connaissance acquise sur le phénomène en fonction de sa complexité et des moyens techniques et financiers engagés.

Plusieurs auteurs ont souligné qu'il y a un décalage, évident, dans le temps entre le risque et la catastrophe. Selon Turner (1978), "*Le risque se situe lors de la période d'incubation avant que la catastrophe ne se déclare*". Pour Dauphiné (2001), "*il n'y a jamais de concordance ni temporelle, ni spatiale, ni en intensité. Le risque peut cependant persister au-delà d'une catastrophe*". C'est d'ailleurs ce déphasage qui explique en partie les difficultés de toute prévision et la mise en place de politiques de prévention. La catastrophe survient parfois à une date non prévue, malgré une anticipation relativement satisfaisante du risque. Ce décalage concerne aussi la dimension spatiale. Les aires reconnues à risque sont relativement vastes,

cependant les véritables catastrophes sont généralement plus localisées. Il est rare qu'une catastrophe s'étende au-delà de la zone de risque (Maquaire, 2002).

Un niveau de risque donné peut correspondre selon le principe d'un tableau à double entrées (tableau.I.1) à un aléa fort et une vulnérabilité faible, un aléa moyen et une vulnérabilité moyenne, ou bien au contraire d'un aléa faible et une vulnérabilité élevée.

Tableau I. 1 : Evaluation du niveau de risque par combinaison d'un niveau d'aléa et d'un niveau de vulnérabilité.

		Vulnérabilité		
	Niveau	**Faible**	**Moyen**	**Fort**
Aléa	**Faible**	Faible	Faible	Moyen
	Moyen	Faible	Moyen	Fort
	Fort	Moyen	Fort	Fort

3.2. Vulnérabilité :

La vulnérabilité est assez difficile à définir, puisqu'il n'existe pas une vulnérabilité intrinsèque, mais une vulnérabilité pour chacun des aléas concernés. Si une démarche générale peut être adoptée pour l'analyse de cette vulnérabilité, elle doit être adaptée à chacun des phénomènes concernés (P.Maquere, 2002). Quelques travaux se sont intéressés à la vulnérabilité appliquée à l'aléa " mouvements de terrain " (Leone et al., 1996), mais la plupart concernent les risquessismiques ou hydrologiques (inondations), ou bien ont été surtout engagés pour évaluer le risque ou les impacts économiques et financiers d'origine technologique, industrielle, sociale, politique ou du vivant (Arnal et Masure, 1999 ; Dauphiné, 2001 ; DRM, 1990 ; Hubert et Ledoux, 1999 ; etc.).

Il existe plusieurs façons de mesurer ou d'apprécier la vulnérabilité, de manière absolue ou relative. Par exemple pour la vulnérabilité humaine : le nombre de victimes potentiels lors d'une coulée de boue est une valeur qui pourra être traduite en fréquence relative ou en pourcentage de la population totale sur un secteur donné. En raison du grand nombre de formes de vulnérabilité, la vulnérabilité totale est difficile à établir car elle conduit à des décès potentiels et des pertes économiques par exemple, ce qui encourage à plutôt faire l'addition de vulnérabilités partielles avec une interprétation qui sera fonction du nombre de vulnérabilités sectorielles reconnues. Cela est possible par un jeu plus ou moins complexe de coefficients, pondérations appliquées à différents facteurs jugés représentatifs et pertinents dans chacune des vulnérabilités retenues (par exemple physique et socio-économique). Cette démarche reste empirique car très sujette aux facteurs de pondération retenus mais offre l'avantage d'une classification par points qui peut être spatialisée pour les différents secteurs identifiés (Leone & al., 1996 ; Dauphiné, 2001 ; Castellanos, 2008). FigureI.4

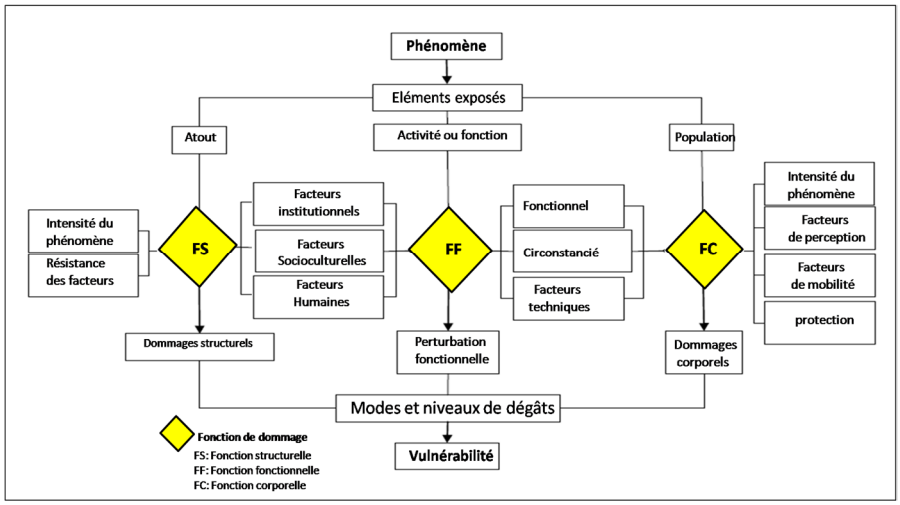


Figure I.4 : Organigramme illustrant les composantes de la vulnérabilité *(Leone et al., 1996)*.

Pour cet auteur, une solution consisterait à transformer toutes les vulnérabilités en une même unité. Ainsi, plusieurs solutions sont disponibles et consistent :

- ✓ à tout évaluer en termes financiers, à procéder à une analyse coût-avantage, ce qui revient à donner un coût à la vie ;
- ✓ àétablirunecomptabilitéénergétiquedelavulnérabilité.Touteslespertesettousles dommages sont alors traduits en énergie, en calories ;
- ✓ à mesurer la vulnérabilité par une durée de retour, comme pour l'aléa inondation. Cette méthode offre l'avantage de pouvoir représenter l'aléa et la vulnérabilité sur une même carte en fonction de deux durées de retour ;
- ✓ à utiliser des techniques multicritères qui permettent de combiner des informations variées, mesurées dans des échelles différentes, pour le plus souvent produire un indice d'évaluation unique. Dans ce cas, chaque critère est standardisé puis pondéré en fonction de son importance supposée (Van Ouesten, 2006).

L'analyse de la vulnérabilité peut conduire à un simple recensement des éléments exposés et des enjeux dans un secteur donné et une appréciation qualitative de la vulnérabilité, ou bien au contraire, pour une quantification de cette vulnérabilité, l'analyse peut aboutir à l'élaboration de méthodes très complexes, modélisations multicritères et multi-paramètres qui demandent la constitution de banques de données multi-sources et donc relativement coûteuses (Van Ouesten, 2006). Cette vulnérabilité constitue un vaste champ de recherche où participent économistes, sociologues, géographes humains et physiciens. Cela nécessite d'y consacrer un temps important en se spécialisant pleinement dans ce domaine (Maquaire, 2002).

3.3. Aléa et susceptibilité :

La notion de susceptibilité est souvent confondue avec le mot "aléa". Or l'aléa est un concept qui s'est développé sous la pression des événements dramatiques vécus dans le monde suite à des phénomènes naturels imprévisibles tels que les mouvements de pente. Celui-ci nous permet de quantifier le risque d'apparition de ces derniers, afin de s'en protéger en les prévoyant. L'aléa est une notion complexe qui a un caractère aléatoire, il répond à des critères de brièveté et de soudaineté. L'aléa est fonction de l'intensité du phénomène naturel, de son occurrence, de la durée considérée et de l'espace pris en compte. Un aléa sera défini par une probabilité d'occurrence spatiale et temporelle, qui dépend de facteurs de prédisposition et des facteurs déclenchants. Ces facteurs ont souvent été largement décrits dans la littérature : (Brabb, 1984 ; Carrara A, Merenda L, 1976 ; Cruden et Varnes, 1996 ; Hutchinson, 1996 ; Terzaghi, 1950 ; Varnes et al., 1984 ; Thiery, 2007).

Afin d'évaluer l'aléa, il est nécessaire d'évaluer la susceptibilité des terrains à un type de mouvements donné dans une zone d'étude donnée, c'est à dire la possibilité qu'un mouvement se produit dans une zone particulière et sur la base de conditions environnementales locales. Cela revient à répondre aux trois questions ci-dessous (Maquaire, 2002 ; Thiery, 2007 ; Ferssad, 2013) :

- ❖ quel type de mouvement de terrain est susceptible de se produire ?
- ❖ quels sont les facteurs de prédisposition ?
- ❖ où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

La susceptibilité, telle qu'elle était définie par Van Ouesten, 2006, est une évaluation quantitative ou qualitative de la classification, du volume (ou de la superficie) et de la distribution spatiale des instabilités de terrain dans une zone bien définie. C'est aussi la probabilité d'occurrence spatiale (extension spatiale ou localisation). Elle est conditionnée par des facteurs "permanents" de prédisposition ou de susceptibilité comme par exemple la pente, la géologie (lithologie et structure), l'occupation des sols, etc…

Pour caractériser véritablement l'aléa, il faut ensuite préciser les conditions nécessaires pour déclencher un type de mouvement de terrain donné. Une probabilité de survenance (appelée aussi probabilité d'occurrence temporelle), c'est-à-dire une période de retour, doit être ainsi définie. Elle dépend de la combinaison plus ou moins complexe de facteurs déclenchant naturels ou anthropiques comme : les conditions climatiques

(précipitations, gel, dégel, ensoleillement, etc.…), les secousses sismiques, l'action de l'homme (déboisement, travaux, etc.…). L'existence de seuils de déclenchement oblige à tenir compte des conditions initiales de stabilité du versant.

La probabilité d'occurrence de l'aléa est le plus souvent évaluée par la probabilité de survenance d'un facteur déclenchant, tel un événement pluvieux intense ou un tremblement de terre sur le principe d'une simple relation de cause à effet. Mais, ces relations de "causes-effets" ne sont pas toujours facilement identifiables, dans la mesure où un mouvement de terrain est rarement lié à une cause unique. Il est souvent difficile d'identifier tous les facteurs impliqués et dans bien des cas, il est difficile de définir les relations entre les différents facteurs.

Dans la mesure où il est souvent difficile de quantifier un niveau d'aléa "mouvement gravitaire", très fréquemment seule la susceptibilité est utilisée. Elle est définie comme la probabilité spatiale qu'un événement (mouvement de pente) se produit sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales (Maquaire et al., 2006). La cartographie de l'aléa s'effectue très souvent de manière experte c'est-à-dire en se basant sur les connaissances actuelles (mise en relation des instabilités déjà observés et des facteurs de prédisposition) et en n'ayant aucun recours à des calculs supplémentaires. Cependant plusieurs méthodes de cartographie de la susceptibilité aux instabilités de terrain ont été développées ces dernières années, (cf. chapitre.III), chacune à ses avantages et ses inconvénients, certaines cherchent à diminuer la part de subjectivité imposée par l'approche experte.

3.4. Cartes du risque "mouvements de pente" :

Afin d'obtenir une cartographie du risque, les cartes de conséquences sont croisées avec les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. Après avoir effectué une classification de la susceptibilité, ces classes sont multipliées aux classes de conséquences potentielles calculées à l'aide d'une matrice (Etienne, 2007), la FigureI.5, illustre un exemple de matrice d'évaluation du risque "instabilité de terrain" (Maquaire, 2003 ; Etienne, 2007).

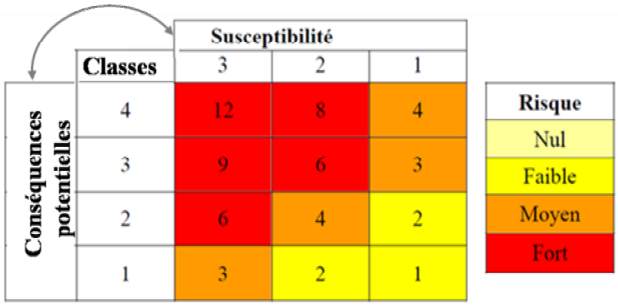


Figure I.5 : Exemple d'une matrice d'évaluation de risque instabilité de terrain (adapté d'aprés Etienne, 2007).

Quatre niveaux de risque sont alors utilisés dans cette étude effectuée en France (à l'est de la commune de Barcelonnette), (Maquere, 2003 ; Etienne, 2007) ; [*Les classes correspondent au système de légende français pour les cartes de risque type PPR*] : nul, faible, moyen et fort (tableau.I.2).

Tableau I. 2 : Classes de risque "Instabilité de terrain" (d'aprés Maquaire et al., 2006)

Risque total	Définition
R0 : risque nul	La menace sur les éléments est nulle. *Il n'existe aucune menace connue à l'échelle humaine, ou le niveau de menace est négligeable selon l'état des connaissances scientifiques actuelles.*
R1 : risque faible	La menace sur les éléments est faible. *La menace sur les personnes est faible ou inexistante, mais de faibles dommages aux bâtiments et une perturbation mineure des activités humaines sont à attendre. Le principe est à la sensibilisation et à l'autorisation de construction sous prescriptions d'un coût modéré.*
R2 : risque modéré	La menace sur les éléments est modérée. *La menace sur les personnes est forte à l'extérieur des bâtiments mais faible ou inexistante à l'intérieur, des dommages sérieux aux bâtiments sont à prendre en compte si le mode de construction n'est pas adapté, et une perturbation modérée des activités humaines est à attendre. Le principe est à la réglementation avec l'instauration de mesures de précautions appropriées (zone inconstructible ou constructible sous prescriptions d'un coût élevé).*
R3 : risque fort	La menace sur les éléments est élevée. *La menace sur les personnes est forte à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, une destruction rapide des bâtiments est à attendre et une perturbation majeure des activités humaines est identifiée. Le principe est à l'interdiction de toute construction (zone inconstructible).*

3.5. Fiabilité des cartes d'aléa :

Concernant la fiabilité des cartes d'aléa, celles-ci peuvent révéler principalement deux types d'insuffisance :

- L'excès d'optimisme qui conduit à classer en zone d'aléa faible ou nul mais en réalité c'est une zone plus "active". Le signe révélateur de l'erreur de jugement dans ce cas est qu'un événement se produira dans une telle zone ;
- L'excès de pessimisme qui fait surclasser l'aléa d'une zone en réalité peu menacée par des instabilités. Dans ce cas, le zonage inadéquat est plus difficile à mettre en évidence, puisque seule l'absence d'événements pendant trente, cinquante ou cent ans peut confirmer la stabilité satisfaisante du site.

En général, la fiabilité d'une carte d'aléa est liée aux conditions suivantes :

- Les inventaires doivent être effectués et traduits sous forme cartographiquepar un expert.
- Les observations des phénomènes naturels actuels doivent être quasi-permanentes pour appréhender les évolutions de certains phénomènes. Ce sont des structures spécialisées qui s'en occupent, au Maroc c'est Direction des Routes et de la Circulation Routière ;
- La recherche d'informations doit permettre le recensement des phénomènes au-delà de la mémoire de la population actuelle pour pouvoir affiner la connaissance de l'aléa ;
- L'échelle de cartographie doit être conforme à l'approche utilisée.

Seulement, il faut préciser que les points les plus délicats résident dans (Etienne, 2007 ; Castellano, 2008):

- L'appréciation fut-elle sommaire à partir du délai avant rupture ? autrement dit, prend-elle en considération le niveau de probabilité d'occurrence, qui défend le degré d'aléa attribué ?
- La délimitation des zones des éboulements rocheux ou des laves torrentielles, même si les points de départ sont correctement identifiés ;
- La délimitation des zones d'aléa lié à un substratum de nature donnée, lorsqu'une couverture meuble masque la limite géologique sous-jacente.

L'évaluation de la qualité des résultats constitue une étape fondamentale à toute démarche de cartographie de la susceptibilité et/ou de l'aléa (Chung & Fabbri, 2003). Elle doit suivre un protocole rigoureux, adapté à la méthode de cartographie afin de sélectionner les résultats les plus fiables et transposables.

Ainsi la fiabilité des cartes de la susceptibilité et/ou d'aléa, réalisés en se basant sur les approches qualitatives ou semi-qualitatives, peut être déterminée postérieurement par une analyse des résultats d'après un contrôle (calage), par la superposition des glissements survenus et cartographiés récemment avec les cartes résultantes, et en intégrant les cartes de facteurs pondérés selon le jugement du spécialiste.

Pour les approches quantitatives, l'évaluation se fait par des méthodes basées sur une analyse de la qualité purement quantitative, basée sur la distribution des scores bruts de la carte simulée et leurs relations avec les mouvements gravitaire. A cet égard, plusieurs tests sont utilisés (Chung & Fabbri, 2003 ; Thiery, 2007 ; Fressad, 2013 ; Aitbrahim & El Hamdouni ; 2018) : la courbe ROC (Receiver *Operating Characteristic*) ; La courbe SRC (taux de succès ou courbe de réussite), ou encore le test aveugle BL (*Blind Test*), le détail de ces tests de validation sera mentionné dans le septième chapitre.

Enfin, une révision périodique des cartes d'aléa est nécessaire, par exemple tous les dix ou quinze ans, car des évoluions naturelles ou causées par l'homme peuvent conduire à des modifications d'aléa : séisme, ouragans, érosions importantes lors d'une crue, incendie de forêt, déboisement ou reboisement, etc...

4. Conclusion:

Les mouvements de versant constituent un aléa naturel conséquent dans les régions rifaines et pluparticulièrement la région de Larache qui n'est pas épargnée par ces phénomènes. Les mouvements de versant ont fait l'objet de peu d'études spécifiques dans cette région. Ceux-ci sont donc relativement mal connus en termes de typologie, localisation et intensité. Les cartes de prévention sont quasiment inexistantes,

sauf dans un cadre régional (Synoptique) effectuées par Millet Lacroix (1968) et Soussi.A.F (2005) en se basant sur des méthodes expertes, souvent critiquées par les scientifiques pour leur manque d'objectivité et de reproductibilité.

Des méthodes de cartographie alternatives existent, permettant d'obtenir des résultats plus robustes en termes de qualité de zonage de la susceptibilité et de l'aléa. Ces méthodes requièrent cependant de longues procédures de calage/validation et des élections des données en fonction des objectifs cartographiques, de l'approche et de l'échelle d'analyse. Ainsi, les objectifs de cette thèse sont en lien direct avec ces dernières considérations. Ce travail vise à tester l'apport et l'applicabilité des méthodes de cartographie indirecte (quantitatives) à échelle moyenne (1/50 000), semi-quantitative (heuristique) à une échelle régionale (1/100 000), et aussi qualitatives par approche "experte" dans un secteur où peu d'études de cas sont disponibles. La procédure logique que nous adoptons est résumée sur la FigureI.6.

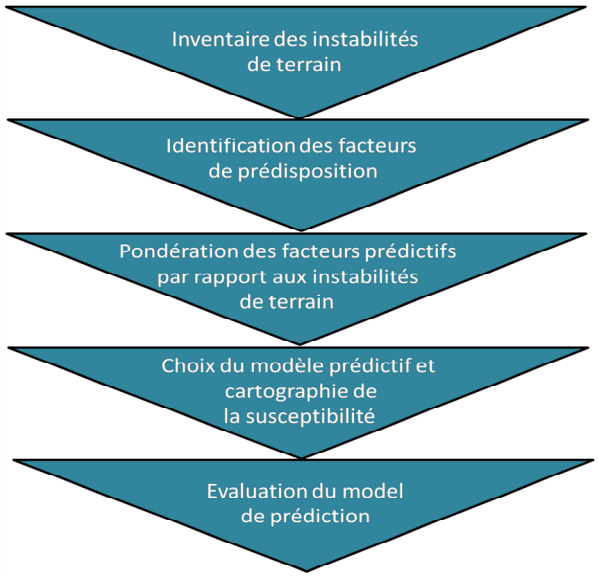


*Figure I.**6** : Méthodologique d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain (adapté de Soeters et Van Ouesten, 1996 ; Guzzetti, 2005).*

CHAPITRE. II: CADRE PHYSICO-GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE REGIONAL

1. Situation géographique et administrative :

La région étudiée, Province de Larache, se situe sur la façade atlantique de la péninsule tingitane, adossée au piedmont Ouest du Rif, elle s'étend sur une superficie de 2574km^2. Administrativement, elle appartient à la région économique de Tanger -Tétouan-Alhouseima, (Figure II.1). La région compte deux préfectures Tanger-Assilah et M'Diq-Fnideq et six provinces : Al Hoceima, Chefchaouen, Fahs-Anjra, Larache, Ouezzane et Tétouan.Le chef-lieu de la région est la préfecture de Tanger-Assilah. Selon le dernier recensement de la population de 2014, la région du Tanger- Tétouan-Al Hoceima est classée la cinquième des régions avec une population de 3 556 729 habitants, soit une part de 10,51% de la population totale du pays, dont 14% peuplent la province de Larache.La principale ressource des habitants de la province se base sur l'agriculture, qui emploie 85 % de la population active.

La province estlimitée auNord-Ouest par la province de Tanger-Assila, au Nord-Est par la province de Tetouan, à l'Est par la province de Chaouen, au Sud-Est par la province d'Ouazzaneet au Sud-Ouest par la région Rabat-Salé-Kénitra. (Figure II.1.A, B)

Six cartes topographiques à l'échelle de 1/100 000^{ème}ont été nécessairespour couvrir lazone d'étude (Figure II.1D) : Larache, El KsarEl Kbir, Chefchaouen, Souk Larbaa, Ouezane, et Zouni.

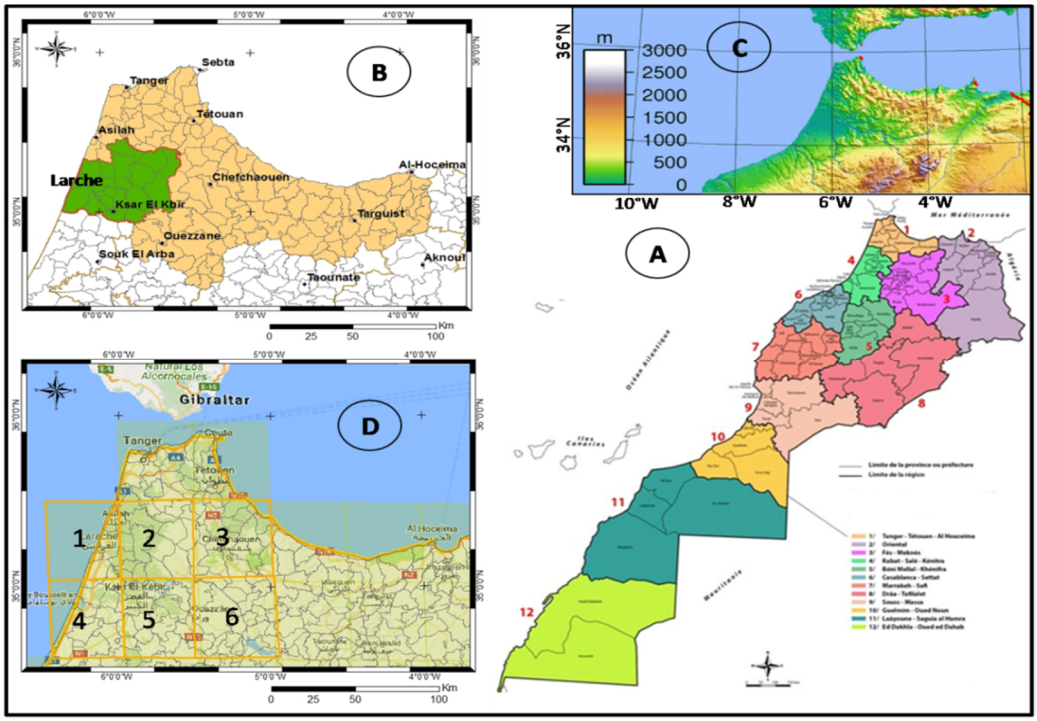


Figure II.1 : Situation du secteur d'étude ; A : Carte des 12 subdivisions régionales du Maroc; B : Zoom sur la région Tanger-Tetouan-El Houcima (Maroc Nord)- Situation de la province de Larache au niveau de la région ; C : Carte des reliefs du Nord du Maroc ; D : Couverture topographique au niveau de la zone d'étude (1 : Carte de Larache ; 2 ;Carte de Ksar el Kebir ; 3 :Carte de Chefchaouen ; 4 : Carte de Souk Larbaa ; 5: Carte de Ouezzane ; 6 : Carte de Zoumi.

2. Cadre géomorphologique :

La province de Larache est une zone qui présente une variété géomorphologique sur de courtes distances, où on passe de la plaine à la montagne avec une topographie très accidentée par fois (Figure II.1.C). Les montagnes qui s'y trouvent, sont issues d'une structuration géologique relativement récente. La majorité de ces montagnes est formée par des barres siliceuses des nappes numidiennes (grandes barres de grès et quartzites), avec des sommets qui culminent entre 500m et 1600m. Elles se présentent comme une succession de crêtes allongées ou arquées. Les exemples les plus connus sont Jbel Sougna (1603m), Jbel Smi'â (853m), et Jbel El Kobba (801m) situé à l'Est de la province.A ces formations, s'ajoutent des unités lithologiques très meubles et assez abondantes, associées à un climat à la fois méditerranéen et océanique ainsi qu'à la tectonique active du domaine rifain (Tahayt, 2008). Entre les crêtes se développent tantôt des réseaux très denses de vallées creusées de plusieurs centaines de mètres aux versants très redressés, tantôt des topographies plus amples de longs versants au profil tendu qu'incisent les Oueds actuels.

La géomorphologie de la région se trouve donc caractérisées, par des reliefs très accidentés marqués par l'encaissement des vallées au niveau des crêtes numidiennes, les fortes pentes, et les fortes dénivellations. Le résultat est une dynamique érosive intense à travers tout le secteur. L'hypsométrie du secteur est dominée par des formes imposantes à caractère montagneux dans la partie Nord-Est, s'affaiblit en se dirigeant vers la partie externe de la chaîne où elle devient de plus en plus douce dans la partie Sud - Ouest,appelée Bas Loukkos, et comprend la plaine alluviale argileuse, le plateau sableux de Remel et les collines des Oulad Ogbane.

Les études géomorphologiques que nous avons effectué, à partir des visites sur le terrain et la télé-interprétation par télédétection spatiale, mettent en évidence l'importance des processus d'érosion dans cette région : que cela soit l'action érosive superficielle forte ou des instabilités de terrains de tous types.

La région se présente comme un bassin versant limité en aval par l'Oued Loukkos collecteur principal, et en amont par une succession de crêtes formées par les grès du Numidien.

Les pentes au niveau de la région sont trop raides en amont des versants et deviennent de plus en plus doux vers l'aval. Elles constituent une image très expressive des conditions morpho-dynamiques, résultant des facteurs géodynamiques tels que la lithologie, la tectonique et des facteurs bioclimatiques tels que le climat et la végétation.

Les hauts reliefs structuraux dans la région, crêtes et collines, sont souvent de nature grèseuse, ils s'étendent, en écharpe, selon une orientation globale NW-SE. Sur le plan structural, les reliefs grèseux appartiennent essentiellement à la nappe numidienne, à savoir Jbel Soukna (1603m), Jbel Es Smiâ (853m), Jbel El Kobba (801m). D'autes collines sont de nature calcareuse et prennent la même orientation que les premiers, appartenant à l'unité de Loukkos. Ces crêtes et collines sont séparées par des vallées plus ou moins rectilignes, et prennent la même orientation qu'eux : à savoir Oued Azla, Oued Mensour...La plupart de ces Oueds empruntent des lignes de failles.

3. Contexte climatique :

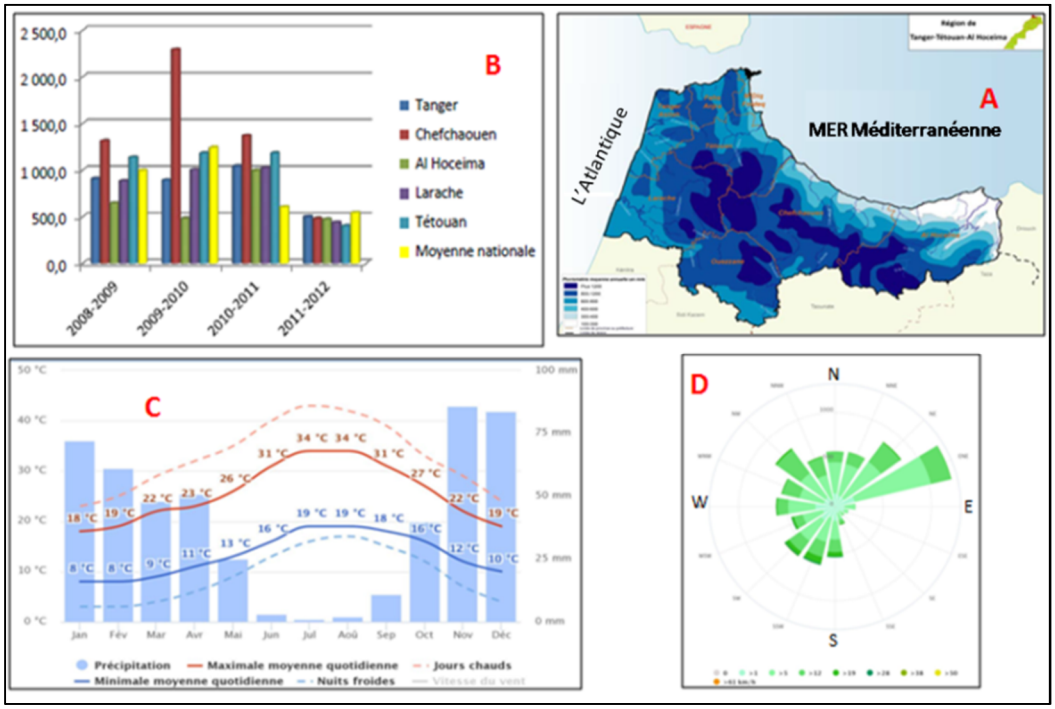
De par leur situation à l'extrême Nord-Ouest du pays et la variabilité imprimée à leur relief par les nombreux massifs montagneux de la chaîne du Rif et les plaines côtières, les bassins du Loukkos, du Tangérois et de la côte méditerranéenne sont soumis à des conditions météorologiques variées. Ainsi, l'influence océanique qui caractérise les bassins du Loukkos et du Tangérois s'atténue progressivement dans les bassins côtiers du Nord avec une aridité de plus en plus prononcée d'Ouest en Est. Le climat devient de plus en plus aride en allant vert le Sud-Est à influence continental.Toute la partie du littoral occidental, entre Larache et Martil appartient à la zone humide ou sub-humide avec des précipitations qui peuvent dépasser 700 mm/an. La

partie Est de la région (particulièrement pour les bas bassins situés entre Jebha et Al Hoceima) reçoit à peine 400 mm/an (*FigureII.2A)*.

Au niveau des hauts reliefs, la pluviométrie moyenne varie entre 1800 mm sur la partie Ouest du Rif (massifs montagneux du Haouz et de la dorsale calcaire) et 600 mm sur les hauts bassins du Rif à l'est de l'Oued Ouringa. Les températures restent en général, clémentes en hiver, douces en été, aussi bien sur les côtes qu'en altitude.

La pluviométrie interannuelle moyenne au niveau de la province de Larache est de 767mm (*FigureII.2B*). L'essentiel des précipitations annuelles est enregistrédurant quelques évènements pluviométriques importants. Au moins 65 à 80 % des totaux pluviométriques annuels sont enregistrés durant la période novembre-mars. L'évaporation potentielle importante varie entre 1200 mm et 1900 mm/an, enregistrée pendant les mois les plus secs : juillet et août, (*FigureII.2C*).

La vitesse du vent fluctue d'une année à l'autre, mais de façon modérée. La variabilité de la vitesse moyenne mensuelle du vent est plus importante en hiver et en automne, elle diminue légèrement au printemps et en été.



FigureII.2: Données climatiques de la région. A : Carte de la Pluviométrie moyenne annuelle ; B : Pluviométrie annuelle par station, en millimètres (Source : Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime, 2013) ; C : le diagramme ombrothérmique de l'année (2016) au niveau dela station Larache. D : La Rose des Vents pour Larache montre combien d'heures par an le vent souffle dans la direction indiquée (réf :https://fr.tutiempo.net/climat/ws-601050.html).

4. Cadre naturel et occupation du sol:

La partie montagneuse de la région était caractérisée par des difficultés de pénétration, jusqu'à une date relativement récente, à cause de la densité de la végétation spontanée : la forêt primaire est formée d'arbres puissants dominant une strate arbustive très dense. De cette végétation climacique, il ne reste plus aujourd'hui que des vestiges.

La basse montagne rifaine offre, sur des espaces restreints, une très grande variété de terroirs, liés aux conditions édaphiques et aux mésoclimats. Les ensembles topographiques de quelque ampleur sont exceptionnels, limités à des bassins de 3 ou 4 km2 qui jalonnent les vallées des Oueds principaux. L'érosion est contenue dans certaines limites lorsque subsiste le couvert végétal climacique. Mais, dès que ce couvert est supprimé, la région connaît une accélération brutale de ses conditions d'évolution morphologique. (Fay Gérard, 1979)

Les formations végétales dominantes en amont du barrage Oued Al Makhazine sont des forêts d'oléastres (Olea europaea) et de chêne liège (Quercus suber), occasionnellement substituées par des plantations de pins. Les forêts d'oléastres denses sont devenues aussi rares que dégradées dans la zone d'étude, ayant généralement fait place à diverses cultures agricoles. Le plus souvent, elles se sont transformées en formations végétales de faible densité, occupant des sols dénudés et pauvres et sont dotées d'une strate arbustive composée de pistachiers lentisques (Pistacea lentiscus) et de palmiers nains (Chamaerops humilis). Quant aux chênes-lièges, ils occupent des terrains siliceux et sableux (cas des suberaies proches du Bas Loukkos) et apparaissent en amont en compagnie de myrte commun, lentisque et laurier-tin.

Le cours moyen est situé entre le barrage de Guarda de Loukkos (proche de Douar Aïn Chouk) et le barrage Oued Al Makhazine. Cette partie est couverte par des substrats très nettement sableux ou argileux ou encore argilo-grèseux rouges du Villafranchien, sur lesquels se développe des subéraies moins denses. Les terrains adjacents à la section du cours moyen du fleuve, en aval du barrage Oued Al Makhazine sont soumis à une activité agricole intense irrigué en grande partie et productive. Appartenant au bioclimat subhumide supérieur au climat plus arrosé, cette subéraie se caractérise par une biodiversité très remarquable.

Le cours inférieur de l'Oued Loukkos correspond à l'estuaire, la zone proche de l'embouchure, qui subit l'influence marine la plus évidente sous l'effet des marées.

Le cours inférieur est une plaine dominée par un environnement marécageux, où l'altitude moyenne du fleuve est inférieure à 1 mètre et celle des terrains adjacents oscille à des côtes de 1 à 3 mètres au-dessus du niveau de la mer. Cela entraîne l'inondation récurrente et périodique de ces terrains, caractéristique qui a permis de préserver cette région d'un usage agricole. Les activités anthropiques principales sont l'extraction du sel, l'élevage.

Toute la région constitue une importante plaine alluviale dont l'origine remonte au Pléistocène supérieur, et dont les sols se composent de sables limoneux ou argileux, de limons et de sols hydromorphes, le tout couronnant les formations du Pliocène. Dans la zone d'estuaire, les sols sont halomorphes ou salins, mais de composition plus variée dans les terrains légèrement surélevés.

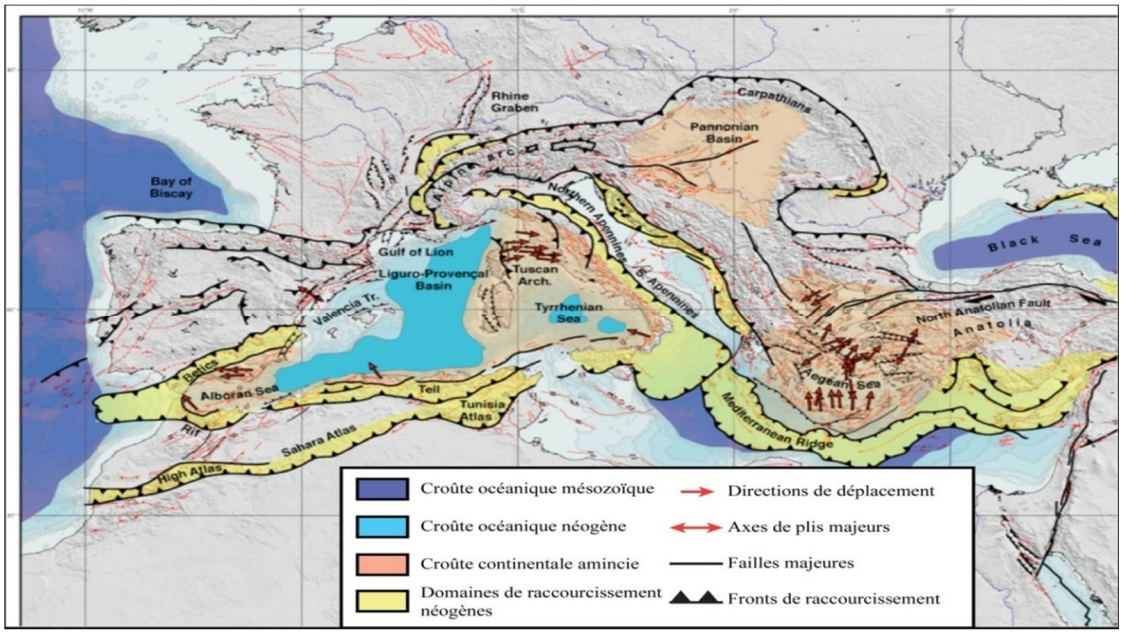
Ces informations ont été tirée du rapport qui a été élaboré par A.R.Muñoz Gallego et al., 2013 "Étude des valeurs naturelles des sections moyenne et basse de l'Oued Loukkos. Larache. Maroc"; dans le cadre du jumelage entre la ville de Larache et Malaga en Espagne.

5. Contexte géologique régional:

5.1 Cadre géodynamique de la Méditerranée Occidentale :

La chaîne rifaine est située à l'extrémité Ouest de la Méditerranée. Elle appartient à l'arc de Gibraltar (ou arc Betico-Rifain) qui s'étend sur plus de 600km séparant l'Atlantique à l'Ouest de la Méditerranée et dessinant un arc à concavité vers l'Est dont le cœur est occupé par le bassin d'Alboran. Cet arc est constitué de deux chaînes celle des Bétiques au Nord et celle du Rif au Sud se rejoignant au niveau du détroit de Gibraltar. Ces deux chaînes sont incurvées à 180° ; l'extrémité Ouest de l'arc est marquée par un rayon de courbure de ~100km (Platt et al., 2013 ; A.Poujol, 2017) (Figures II.3). Plusieurs études ont tenté de reconstituer et

d'interpréter les différentes phases de l'évolution géodynamique du bassin méditerranéen (L.Aitbrahim et al., 2004; Carminati et al., 2012 ; Chalouanet al., 2008 ; Chertova et al., 2014 ; Faccenna et al., 2004 ; Jolivet et al., 2006 ; Michard et al., 2002 ; Platt and Vissers, 1989; Platt et al., 2013)



FigureII.3 : Carte structurale du bassin méditerranéen *(Jolivet et al., 2008).*

5.2. Evolution géodynamique du Pliocène à l'actuel:

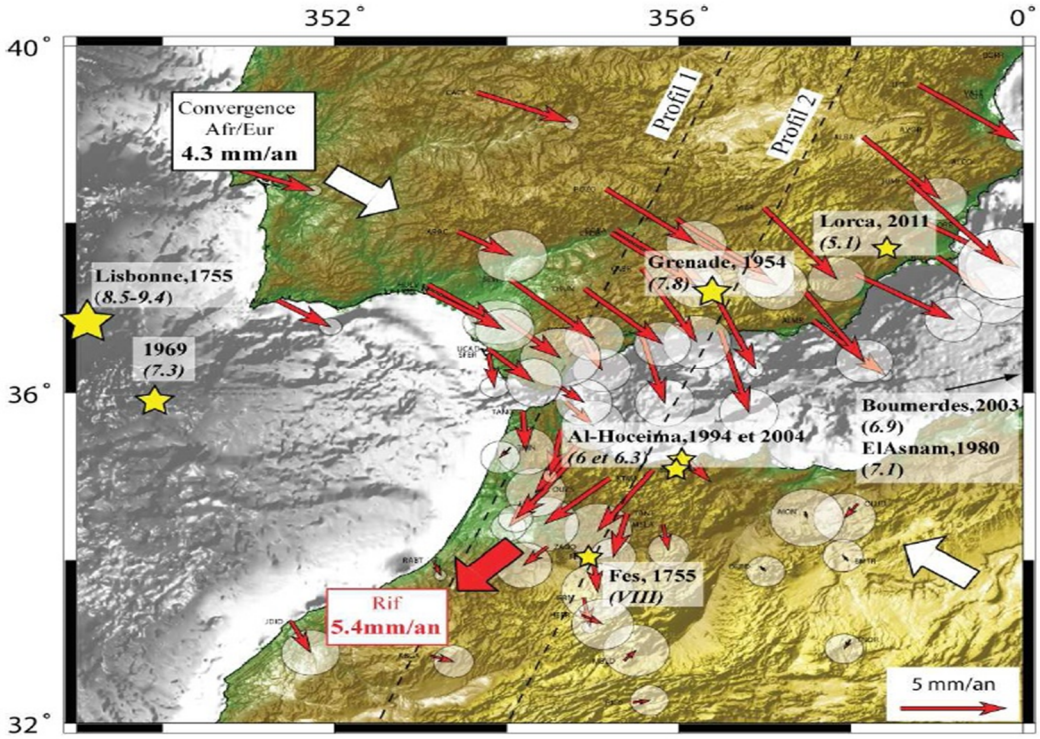
Du Pliocène à l'actuel, l'arc de Gibraltar est soumis à un régime en compression de direction N/S à NW/SE, conduisant à la formation de chevauchements et plis E/W à NE/SW ainsi que des décrochements NW/SE et NE/SW respectivement dextres et sénestres à terre et en mer (L.Aitbrahim et al. 2004 ; Pedrera et al., 2011). De nombreuses observations font état de mouvements verticaux plio-quaternaires (A.Poujol, 2014). En effet, plusieurs bassins marins datés du Pliocène inférieur ont été surélevés, jusqu'à 500 mètres d'altitude comme c'est le cas du bassin de Tirinesse (Saji et Chalouan, 1995). De même, des terrasses marines quaternaires sont surélevées à plusieurs dizaines de mètres hors de l'eau (Morel et al., 1996).

La convergence Afrique-Europe s'effectue relativement rapidement selon une direction ~N/S jusqu'il y a 10 Ma. Ce mouvement a beaucoup ralenti et a pris une direction NW/SE. Cette convergence est perpendiculaire à la direction de migration de l'arc.

Les données géodésiques (Vernant et al., 2010; A.Poujol, 2014) apportent de nouvelles informations sur la cinématique actuelle. La plaque eurasiatique s'approche de la plaque africaine selon une direction vers le SE et à une vitesse de l'ordre de 4 à 5 mm/an, (FigureII.5). Cette vitesse diminue au fur et à mesure que l'on s'approche du bassin d'Alboran. Le Nord du Maroc se déplace vers le SW par rapport à la plaque africaine à une vitesse comprise entre 2 et 4mm/an. Cependant, elle diminue aussi en s'éloignant des côtes.La convergence Afrique-Europe semble être le moteur de la déformation active dans l'ensemble de l'Arc de Gibraltar (A.Romangy.2014).

Enfin, l'évolution du régime tectonique de la chaîne Rifaine, du Miocène à l'actuel, est sous la dépendance d'une phase géodynamique majeure marquée par une compression orientée N-S qui a permis l'individualisation du bloc d'Alboran durant le Miocène inférieur. Ce bloc est glissé vers l'WSW, le long d'accidents décrochant ENE-WSW. Cette évolution a pour résultat la mise en place des nappes de charriage dans le Rif (Durand-Delga, 1980) et la formation de l'arc de Gibraltar (Bourgois, 1978). L'activité tectonique

se manifeste en grande partie par des charriages et des décrochements sénestres (NE-SW, ENE-WSW, E-W) qui affectent le domaine situé au Sud de l'accident majeur de Jebha. La plupart des auteurs (El Hatimi, 1982 ; Morel, 1989 ; Ait Brahim, 1991 ; Chaouni, 1999 ; Ait Brahim et al., 2002) s'accordent sur un régime compressif dominant selon une direction globalement subméridienne au Miocène supérieur.



FigureII.4: Evolution géodynamique de la mer d'Alborant du Pliocène à l'actuel: *Modèle Numérique de Terrain de la région Rif-Bétiques sur lequel sont reportés les champs de vitesse GPS (flèches rouges) dans le référentiel Afrique et les séismes destructeurs des 60 dernières années (étoile jaune). Le taux de convergence entre les deux plaques est de 4.3 ± 0.5 mm/an et le mouvement du Rif est de 5.4 ± 1.5 mm/an. (d'après, A.Poujol, 2014)*

Au Pliocène, la déformation continue et l'arc est soumise toujours à un régime de compression N-S puis NW-SE, à l'origine des chevauchements et des plis E-W à NE-SW, ainsi que des décrochements sénestres NE-SW et leurs conjugués dextres NW-SE visibles à terre et en mer (Aıt Brahim et al., 2002 ; Bargach et al., 2004 ; Chalouan et al., 2006 ; Pedrera et al., 2011a ; Ruiz-Constán et al., 2011) (FigureII.4). Des mouvements verticaux surviennent à la même époque comme en témoignent plusieurs bassins marins datés du Pliocène inférieur surélevés jusqu'à 500 mètres d'altitude le long des côtes méditerranéennes marocaines (Benmakhlouf and Chalouan, 1995 ; Romagny et al., 2014 ; Saji and Chalouan, 1995 ; A.Poujol, 2017). Plus tardivement, durant le Quaternaire, le régime compressif reste inchangé et plusieurs études font état de mouvements verticaux récents en Méditerranée (Cadet et al., 1977 ; El Kadiri et al., 2010 ; Mustapha Meghraoui et al., 1996).

5.3. Situation géo-structurale de la zone d'étude :

La zone d'étude est située dans le Rif septentrional, entre le domaine des flysch au Nord et le domaine externe (FigureII.5). Elle est constituée principalement par **(i)** des terrains intrarifains représentés par l'ensemble des unités de Tanger, Loukkos, et Habt d'âge Crétacé inférieur à supérieur ;**(ii)** des terrains mésorifains formés essentiellement par l'unité des grès numidiennes ;**(iii)** des terrains prérifains, au sud de la région, représentés par une partie de la nappe de Ouazzane d'âge Crétacé inférieur à Miocène moyen. L'ensemble de ces unités sont séparées par de grands accidents chevauchants orientés NW-SE et à vergence

NE. **(iv)** Un peu vers le Nord-Ouest de la région, deux bassins d'avant fosse sont formés au front des anticlinaux faisant partie d'un système de plis et de chevauchement appelé " rampe anticlinale de l'Arbaa d'Ayacha " par Morley,1992. Ce système de plis et chevauchement montre avec le massif numidien de jebel El Kobba une direction subméridienne (NNW-SSE). Ces deux bassins d'avant fosse ont été le siège d'une sédimentation turbiditique syn-tectonique dont l'âge s'étend de l'Oligocéne au Miocéne inférieur (A.Zakir, 2004). Et la partie Sud-Ouest, appelée Bas Loukkos, comprend la plaine alluviale argileuse, le plateau sableux des Rehamna et les collines des Oulad Ogbane (CSE, 1991).

La structuration de la région s'intègre dans l'évolution tectonique Alpine qui marque la chaîne rifaine, les terrains d'âge méso-cénozoïque et mio-plio-quaternaires (Durant Delga et al.1988et 1999 ; Suter,1980 ; ElKadiri et al,1992 ; Chaouni,1996 et 1999 ; Chalouan et al.2008) dominants enregistrent les différentes structures qui marquent la phase major Alpine : plissements ; nappes de charriages ; chevauchements et fracturation.

5.3.1. Les terrains intrarifains au niveau de la région :

5.3.1.1. L'unité de Tanger externe :

L'unité de Tanger couvre une grande surface à l'Est de la région, jusqu'au Jbel Smiâ'a ; ces formations stratigraphiques sont d'âge Cénomanien au paliocène. Nous reconnaissons les séries lithologiques suivantes (FigureII.6.a):

- Pélites noires à verdâtres microplissés, légèrement schistosées, à lits centimétriques de gré quartzitique d'âge Albo Aptein de Kétama, surmonté probablement en contact chevauchant par des marnes schisteuses à minces niveaux de phtanites. Ce terme est d'âge Cénomanien moyen à supérieur.
- Complexe marneux argileux, de couleur grise en altération et bleutée dans les coupes fraîches, épaisses de plus de 500m, finement laminées avec des niveaux déformés en structure de glissement synsédimentaire qui englobe des boules calcaires argileuses et des paquets de marnes d'âge Sénonien. On y repère, surtout vers le sommet, des bancs épais d'une cinquantaine de centimètres, de lumachelle formée essentiellement de débris d'Huîtres. Ce complexe marneux date du Coniacien au Pliocène.

Cette unité est souvent masquée par une épaisse couche d'altération. De ce fait, on a eu du mal à voir les structures qui existent à ce niveau.

Sur cette vaste formation marno-calcaire, on note la présence des lambeaux grèseux, représentant de la nappe numidienne dans le secteur.

5.3.1.2. L'unité de Loukkos :

L'unité de Loukkos est par sa position l'élément structural qui assure la transition entre L'unité du Habt, à l'Ouest, et les épaisses séries monotones du Crétacé supérieur de l'unité de Tanger. L'unité du Loukkos empreinte son nom à l'Oued Loukkos qui y prend naissance (Figure II.6.b).On rencontre des masses d'argiles sombre schisteuses très monotones et des formations calcaires de teinte claire qui déterminent dans la morphologie des arrêtes émoussées et plus rarement des falaises.Au sommet du puisant ensemble argileux sombre d'âge Albien moyen, se placent les bancs calcaires d'âge Vraconien. Auquel se superpose le Cénomanien calcaire à passés de gypse diffus dans une matrice de marnes grises argileuses déformée par glissement synsédimentaires (slumps).

Ces formations sont surmontées par une épaisse série marno-calcaire datée du Sénonien dans laquelle s'intercalent des éléments resédimentés attribués au Trias.

5.3.1.3. L'unité d'El Habt :

L'unité du Habt, définie par Suter et Fiechter, 1966 qui la considèrent comme l'équivalent tectonique de la nappe d'Ouezzane, s'étend entre Arbaoua et Asilah, suivant une bande allongée sur une distance d'environ 80 km, proche de la direction Nord-Sud. Entre Asilah et Larache, sa bordure occidentale chevauche, vers l'Ouest, les terrains constituant le Groupe de Mrayt et sa limite orientale est chevauchée par l'unité de Loukkos ou de Tanger (J.Tejera De Leon, 1997). (Figure II.6.c)

Le log stratigraphique qu'on a relevé sur le terrain montre (au niveau de Boujediane) : (Figure II.6.c)

- Une séquence d'alternance d'argiles et de barres de grès avec une dominance argileuse, d'âge Eocène supérieur-Oligocène moyen surmontée par des barres turbiditiques d'âge Oligocène supérieur.
- Une deuxième séquence formée par l'alternance de grès et d'argiles d'âge Miocène inférieur surmontée par des marnes pélagiques (Miocène moyen).

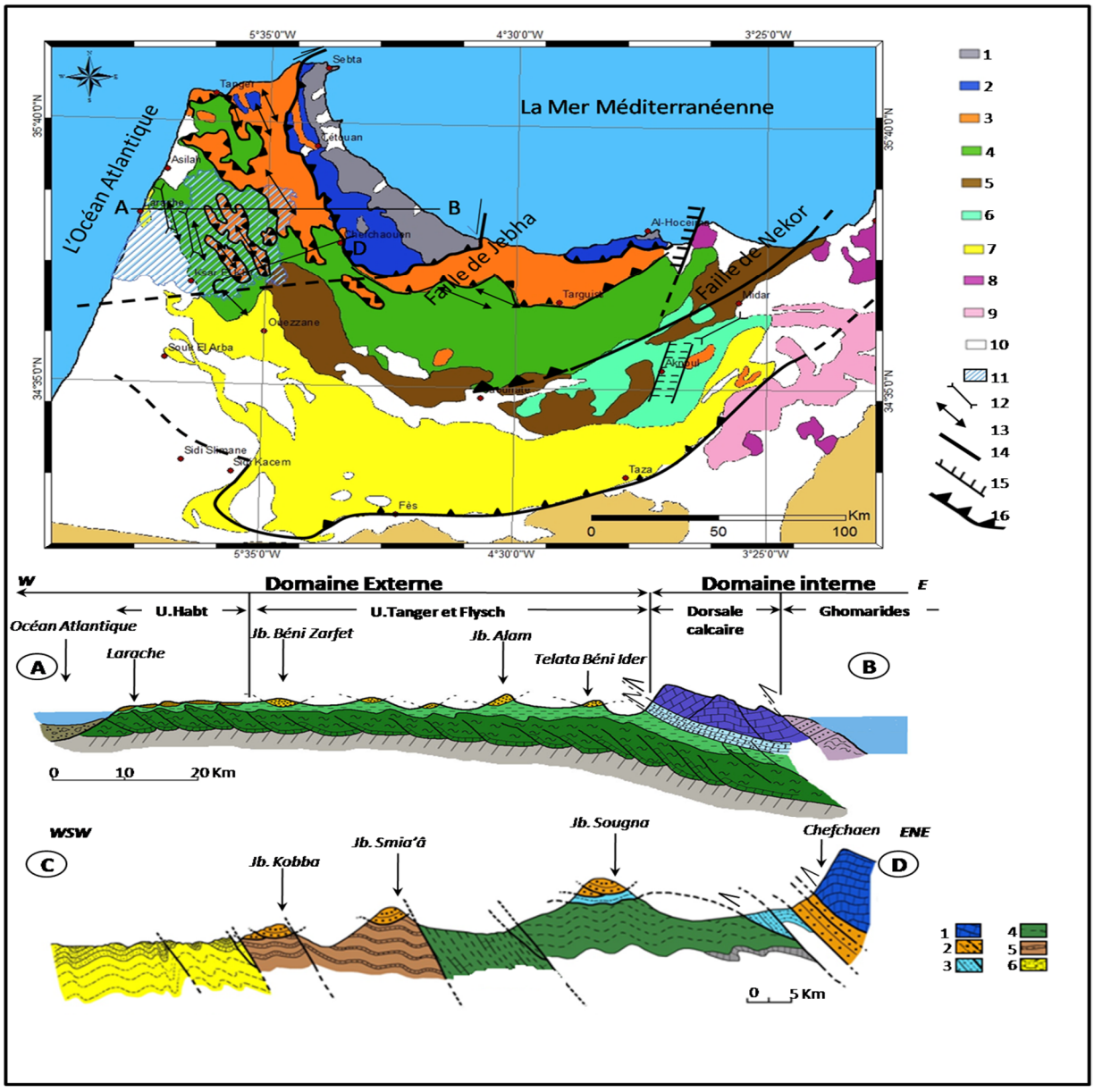


Figure II.5 : Carte géologique et structurale générale du Rif (Maroc) (les structures sont tracées d'après Morel (1987) ; Meghraoui et al. (1996), Aıt Brahim et al. (1990), Chalouan, (2008), Poujol et al. (2014)) :*1, Sébtides et ghomarides ;2, dorsalecalcaire ;3, Nappes des flysch ; 4, Unités de Tanger_Ketama ;5, Zones*

mésorifaines ; 6, Zones intrarifaines ; 7, Zones prérifaines ;8, volcanisme néogène à quaternaire ;9, Avant pays ; 10, Terrain post-nappes ; 11, Zone d'étude ;12, Synclinaux ; 13, Anticlinaux ; 14, Faille ; 15, Faille normale, 16, Chevauchement. AB et CD, sont des coupes qui longent la région ; 1, Dorsale calcaire ; 2, Nappe numidienne ;3, Nappe de Melloussa ; 4, Unité de Tanger ; 5, Unité de Loukkos ; 6, Unité d'El Habt.

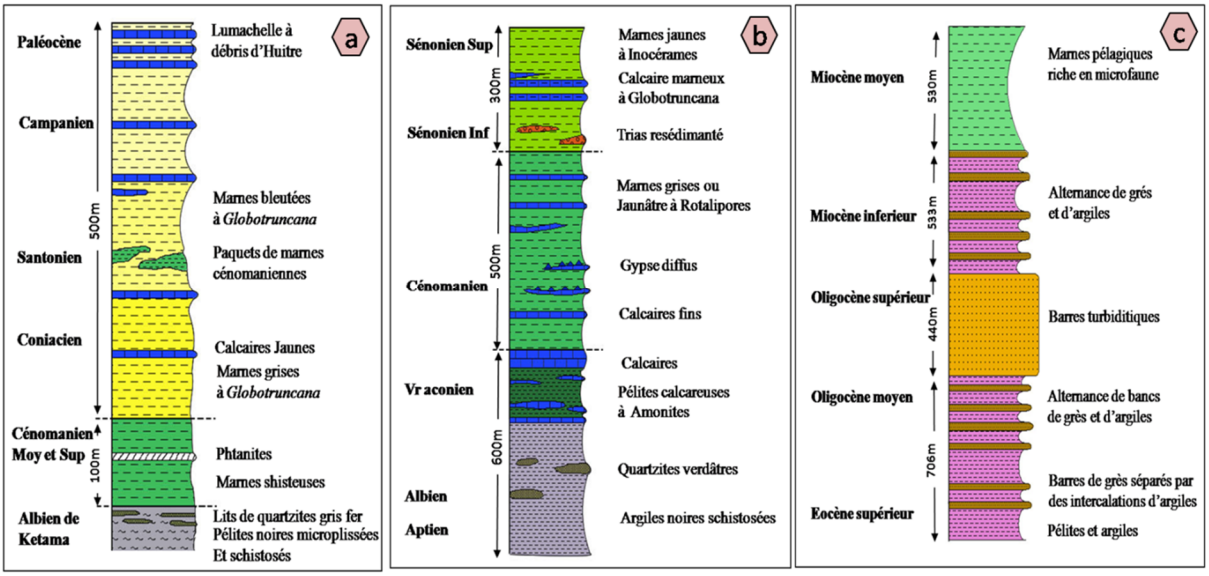
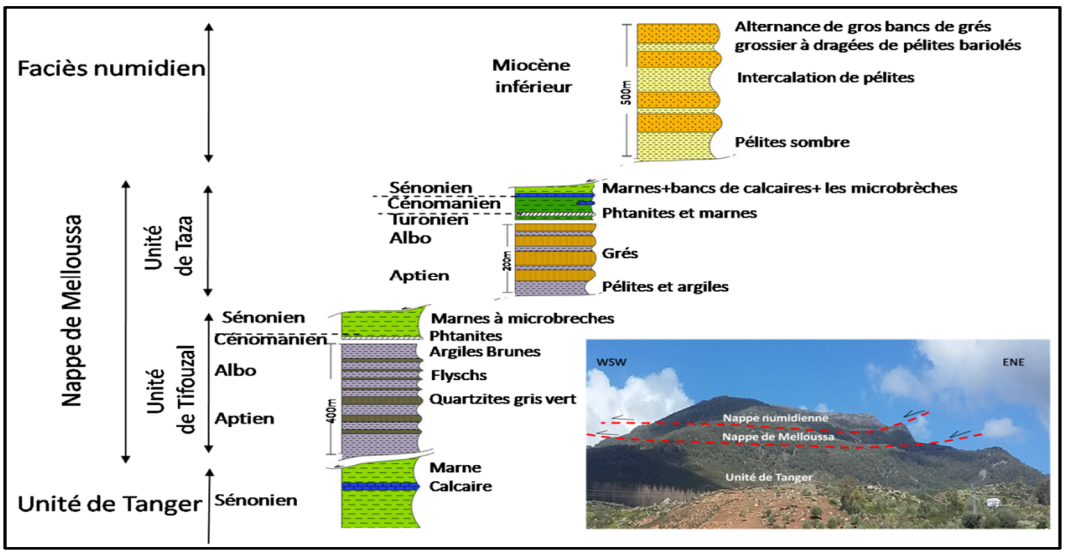


Figure II.6 : Les séries stratigraphiques des terrains intrarifaines *; (a)unité de Tanger externe (Âin Ziaten); (b) unité Loukkos (Safe Trawela); (c) Unité d'El Habt (Boujedian).*

5.3.2. Les séries de nappes de flysch au niveau de la région:

Dans cette unité, nous décrironsles séries stratigraphiques observées au niveau de Jbel Sougna, près de la maison forestière, (Figure II.7).

Au-dessus des marno-calcaires et des marnes grises à boules calcaires d'âge Sénonien de l'unité de Tanger externe, viennent s'installer la nappe de ***flysch de Melloussa,*** représentée par ***l'unité de Tifouzal*** en contact chevauchant, sur lesquelles reposent, toujours en chevauchement, les alternances de grès et de pélites de ***l'unité de Taza*** (selon Lispinasse, 1975). Le faciès ***Nummidien*** d'âge Miocène inférieur surmonte toutes ces séries avec de gros bancs de grès à intercalation pélitiques. Ces unités représentent les formations les plus supérieures, elles surmontent les marno-calcaires et les argilites des unités du domaine externe.

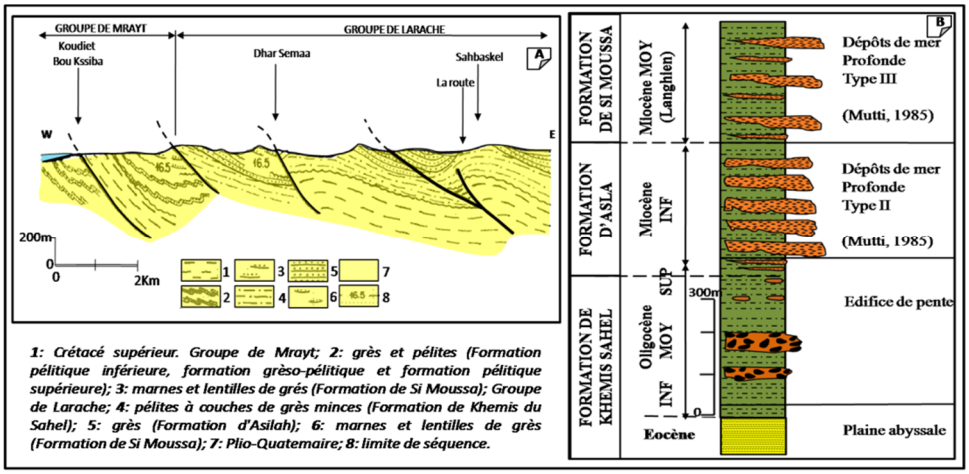


FigureII.7 : Les séries stratigraphiques des flysch au niveau de Jebel Sougna à l'Est de la région. (EL Hamdouni.I., 1999(adaptée)).

5.3.3. Lithostratigraphie du Groupe de Larache à l'Ouest de la région :

Les faciès sédimentaires constituant le Groupe de Larache (FigureII.8) sont essentiellement silico-clastiques et comprennent trois formations, dont I 'ensemble atteint une épaisseur de 800 m :

- La formation de Khemis du Sahel, essentiellement pélitique, est d'âge Eocène probable (la base n'étant pas visible à l'affleurement), Oligocène inférieur à Oligocène supérieur ;
- La formation d'Asilah, constituée de barres grèseuses séparées par des niveaux pélitiques, est d'âge Oligocène supérieur/Miocène inférieur ;
- La formation de Si Moussa, formée de pélites à intercalations lenticulaires grèseuses, est d'âge Miocène moyen (Langhien).



FigureII.8 : A: Coupe structurale à travers les gouttières d'Asilah-Larache. *B : Séries stratigraphique du groupe de Larache (modifier d'après J.Tejera De Leon, 1997)*

Les terrains affleurant entre les villes d'Asilah et de Larache (FigureII.9.A) ont été désignées par la plupart des auteurs sous l'appellation de "grès d'Asilah" ou "grès de Larache" (Suter et Fiechter, 1966; Didon et Hoyez, 1977; Morley, 1987, 1992a, b; Cazzola et Critelli, 1986-1987; Ben Yaïch, 1991; J.Tejera De Leon, 1997). Ils sont organisés en synclinaux et anticlinaux, orientés Nord-sud, séparés par des contacts chevauchants (FigureII.8.A). Les formations montrent de légères discordances entre elles (discordance bien marquée entre la formation de Si Moussa et la formation d'Asilah). Les associations horizontales et verticales de faciès, remplissant les dépressions synclinales, correspondent (J.Tejera De Leon, 1997), FigureII.8.B : **i**) à des milieux de dépôt de bas d'une pente (dont l'orientation était Est-Ouest), dans la formation de Khemis du Sahel; **ii**) à des cônes sous-marins à faible efficacité de transport (correspondant au type II de Mutti, 1985), constitués de lobes de dépôt très sableux attachés aux zones chenalisées et montrant une évolution "proximal-distal" du Sud vers le Nord, dans la Formation d'Asilah; **iii**) à celle d'un cône sous-marin constitué de zones sableuses chenalisées bordées de levées silico-argileuses très développées (correspondant au type III de Mutti, 1985), dans la Formation de Si Moussa.

5.3.4. La marge Nord du bassin d'El Gharb :

Le bassin d'El Gharb est la limite Sud de la région. Les structures observées à ce niveau se présentent sous forme de collines à matériel appartenant à la Nappe prérifaine. L'histoire du bassin a été liée à de nombreux facteurs tels que la subsidence du substratum, les variations eustatiques, les apports sédimentaires et la tectonique régionale (W.Litto et al., 2001). Cependant, le facteur le plus important a été la mise en place de la Nappe prérifaine par glissement gravitaire dans la marge Nord du bassin au cours du Tortonien inférieur,

puis la tectonique locale très prononcée du Tortonien supérieur à l'Actuel (W.Litto et al., 2001). Plusieurs concepts d'évolution ont été proposés jusqu'ici pour expliquer la genèse du bassin. Ainsi, d'aprés Rampnoux et al.,1977, le Gharb aurait pris naissance au cours d'une phase distensive généralisée d'âge Tortonien à Pliocène, avec une direction d'extension NE-SW; ensuite, un épisode compressif durant le Pliocène supérieur et au début du Quaternaire aurait donné naissance à des plis sur la bordure Nord du bassin: enfin, un dernier épisode au cours du Quaternaire aurait été à l'origine de déformation à grand rayon de courbure, et du rejeu de failles. Pour Morel (1988, 1989), l'évolution structurale du bassin du Gharb se serait effectuée dans un contexte essentiellement compressif permanent avec une direction de compression NE-SW. En se basant sur l'analyse des profils sismiques, Flinch, 1993 a suggéré que les structures distensives et compressives observées sont synchrones et dues à des glissements gravitaires au front de la chaîne rifaine. Dans ce dispositif, les failles normales délimitant les parties arrière des bassins ré-emergent à leur front en chevauchements. Cette tectonique aurait eu lieu durant la période allant du Tortonien supérieur au Pliocène inférieur, et c'est à partir du Pliocène moyen, qu'aurait eu lieu le soulèvement général des bordures du bassin, (W.Litto et al., 2001).

En général, le bassin du Gharb est caractérisé par un cadre stratigraphique à dominance argilo-marneuse. Les crêtes sommitales correspondent aux affleurements de grès, de marno-calcaire et de marnes blanches à silex, alors que les basses collines sont façonnées dans les marnes et les flysch. Le bassin du Gharb est caractérisé par des dépôts autochtones, mais aussi allochtones, ayant été mobilisés suite à un charriage et glissement des sédiments du prérif interne et des nappes de la zone intra-rifaine notamment la nappe de Ouezzane (J.Tejera De Leon, 1997).

L'évolution de la sédimentation a favorisé le dépôt de sédiments clastiques d'âge Miocène supérieur sur le complexe de nappes. Des séries turbiditiques très épaisses d'âge Eocène et Oligocène et des sédiments continentaux molassiques d'âge Miocène moyen se sont développés au sein de la séquence infra-nappe couvrant les clastiques et les carbonates mésozoïques (H.Bensalem et al, 2011).

Les formations du bassin du Gharb sont ainsi caractérisées par une répartition différenciée de trois principaux faciès : des conglomérats d'origine fluvio-estuarienne à l'entrée du bassin vers l'Est, des sables et des grès marins dans la partie centrale et des calcaires bioclastiques littoraux sur la bordure côtière. Le Quaternaire ancien (Messaoudien) débute par une sédimentation littorale, qui n'intéresse que la frange côtière sur une largeur d'une vingtaine de kilomètres.
La série mio-plio-quaternaire permet de distinguer deux types de sédimentation : la première est d'origine continentale, très hétérogène, formée d'argiles, de sables et de cailloutis ; la seconde est d'origine marine littorale avec des sables, grès calcaires ou calcaires grèseux (Kili et al.2006). Le substratum de cette série est représenté par le toit des marnes bleues du mio-pliocène. (FigureII.9)

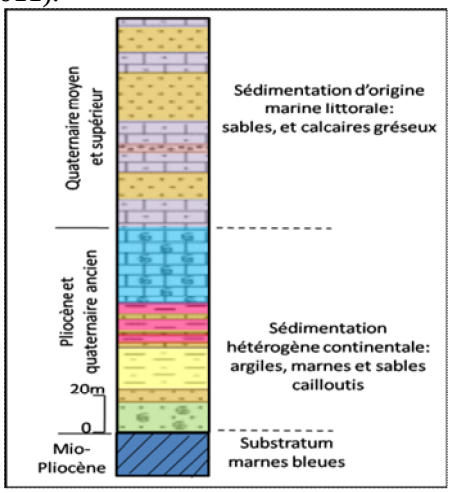


Figure II.9 : Log stratigraphique synthétiques du bassin du Gharb, près d'Arbaoua *(Modifier d'aprés Kili et al.2006,*

6. Conclusion :

Les vitesses mesurées par GPS, (Fadil et al., 2006 ; Fernandez et al., 2007 Tahayt et al., 2008 ; A.Romagni, 2014; A.Poujol, 2017) associées aux données de sismologie, (Tahayt, 2008; L.Aitbrahim, et al 2004) permettent de confirmer que l'arc Bético-Rifain (Maroc et Ibérie) est un domaine toujours en surrection, suite à une convergence continue des deux plaques Eurasie-Afrique. où le Rif peut être subdivisé en trois blocs distincts (Tahayt et al., 2008) : (**1**) le bloc de Tanger se déplaçant vers le Sud-Est, (**2**) le bloc central du Rif se déplaçant vers le SSW et (**3**) le bloc oriental du Rif, avec une rotation dans le sens horaire (FigureII.5). Cette

activité tectonique particulière se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète lapoursuite de la convergence entre ces deuxplaques lithosphériques. Les contraintes sont absorbées par les différentes unités géologiques charriées en nappes imbriquées les unes sur les autres. Ces unités se trouvent fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation ce qui les rend très susceptibles aux mouvements de terrain (Mastere, 2011; L.Aitbrahim, 2002, 2004).

La surrection continue de lachaîne rifaine est l'artisan d'une topographie trop abrupt avec des pentes souvent supérieur à 15° surtout vers l'Est de la région, cette topographie est l'un des moteurs des mouvements de gavitaires dans la région en particulier et au niveau de la chaîne rifaine en général.

Les formations géologiques ont une lithologie hétérogène. Elles se manifestent généralement sous forme de matériaux de base moins résistants et imperméables, surmontés par desmatériaux consistants en relief très abrupt et trop accidenté. Le contact entre ces formations est souvent tectonique. De plus elles sont trop fracturées ce qui rend les terrains encore plus fragiles. A ces caractéristiques lithologiques médiocres, s'ajoutent les manifestations sismo-tectoniquetrès actives de la chaîne rifaine.

l'action climatique (double influence marine atlantique et méditerranéenne) qui se manifeste dans le secteur d'étude principalement par **(i)** l'intensité des pluies (moyenne annuelle>1200 mm) concentrées dans une période trop courte (2 mois), **(ii)** les températures élevées des mois de l'été et le début de l'automne favorisant la fissuration et la dessiccation des sols argileux **(iii)** l'infiltration de l'eau en profondeur qui provoque des pertes de cohésion des formations adjacentes **(iv)** le ruissellement des eaux de pluie menaçant l'instabilité des talus surtout au niveau des berges des cours d'eau. De ce fait l'activitédesrivièresetOuedsemanifeste en s'enfonçant et incisant d'avantage les pieds des versants et en favorisant le déclenchement d'instabilités de ces derniers.

L'assemblage de ces facteurs déterminants dans une même région ne sera sûrement qu'un catalyseur du déclenchement des mouvements de terrain.

CHAPITRE. III: APPROCHES DE CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX INSTABILITES DE TERRAIN : METHODES, UTILITES, AVANTAGES ET INCONVENIENTS

"Il n'y a pas de probabilités en soi, il n'y a que des modèles probabilistes." (G. Matheron, 1978)

1. Méthodes d'évaluation du risque "Mouvement de terrain":

Les méthodes de cartographie de la susceptibilité et de l'aléa "mouvements de versant" ont été développées depuis les années 1970 pour faire face à des problèmes pratiques d'aménagement (Brabb et al., 1979 ; Carrara et al., 1979). Depuis ces premiers essais, les trois décennies suivantes ont été l'occasion d'un développement intensif de la littérature scientifique sur ce propos. Ainsi, de nombreuses études de cas discutant de l'application de ces méthodes peuvent être trouvées (Dai & Lee, 2001 ; Yao et al., 2008 ; Ayalew & Yamagishi, 2005 ; Thiery et al., 2007 ; Thiery et al., 2013) ; d'autres présentent des innovations méthodologiques (Chung & Fabbri, 2003 ; Lee et al., 2004 ; van den Eeckhaut et al., 2006 ; Atkinson & Massari, 2011) ou des synthèses (Soeters & van Ouesten, 1996 ; Guzzetti et al., 1999 ; van Ouesten et al., 2006 ; Chacón et al., 2006).

Les cartes de susceptibilité ou d'aléa présentent d'importantes différences de précision et de fiabilité (Cascini et al., 2005). Ces cartes sont généralement préparées avec une large gamme de données d'entrée qui peuvent être qualitatives ou quantitatives.

Parfois les données nécessaires à la réalisation de ces cartes sont indisponibles. Ainsi, malgré une demande croissante d'outils de gestion de l'aléa et du risque, la majeure partie des démarches opérationnelles, au Maroc comme ailleurs, se base sur des approches type "expert" souvent critiquées par les scientifiques pour leur manque d'objectivité (Malet & Maquaire, 2008 ; Corominas & Mavrouli, 2011-b).

Les procédures cartographiques doivent en effet tenir compte de plusieurs éléments déterminants qui concernent : l'échelle de travail, l'objectif et l'application concrète des cartes, le type de zonage, le niveau de zonage, les données d'entrée, ainsi que la méthode employée ; "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning" (Fell et al., 2008a ; Fell et al., 2008b). L'analyse du risque dans ce travail est volontairement mise de côté pour se focaliser uniquement sur la susceptibilité et l'aléa.

Néanmoins, le SIG est devenu un outil quasi obligatoire dans l'évaluation des risques tel que le risque des glissements de terrain. Lors de l'utilisation du SIG, les composants principaux pour toute évaluation de risque des glissements de terrain, quoi que ce soit l'approche, peuvent se résumer en : collecte de données, saisie de données, gestion des données et modélisation de données.

2. Concept de base de l'évaluation et du zonage de l'aléa "instabilité des versants":

Les méthodes d'évaluation du risque supposent une estimation de l'aléa et une évaluation desconséquences sur les éléments exposés.Selon Varnes (1984), l'évaluation de l'aléa, pour un bassin versant (échelle moyenne ou large), se divise en deux phases successives avec l'évaluation de la susceptibilité puis celle de l'aléa.

Dans la mesure où il est souvent difficile de quantifier un niveau d'aléa "glissement deterrain", très fréquemment seule la susceptibilité est utilisée.

La susceptibilité aux glissements de terrain est une composante importante dans l'équation de ce type de risque, celui-ci étant défini comme la probabilité d'occurrence du phénomène dans un certain secteur. L'évaluation de celui-ci suppose l'appréciation quantitative et qualitative de la classification, du volume, de la superficie et de la distribution spatiale des glissements de terrain qui existent et/ou qui peuvent apparaître (Fell et al., 2008). La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain met en évidence la distribution spatiale des versants potentiellement instables, fondée sur l'analyse des paramètres favorables aux glissements, par la considération de la superposition spatio-temporelle des facteurs qui ont généré de tels processus dans le passé (Guzzetti et al., 1999). A partir du principe "*le passé et le présent représentent la clé de l'avenir*" (Varnes, 1984 ; Hutchinson, 1995), on peut formuler les hypothèses sur lesquelles est fondée l'estimation des risques de glissements de terrain :

- ✓ La distribution actuelle des glissements reflète les conditions géologiques, géomorphologiques, hydrogéologiques, climatiques, occupation du sol, et l'impact des activités humaines ;
- ✓ L'importance des facteurs de prédisposition vis à vis de l'occurrence spatiale des glissements de terrain est variable, d'ou l'obligation de calculer leur poids.
- ✓ Les futurs glissements de terrain vont apparaître dans les mêmes conditions ;
- ✓ Les facteurs déclenchant des glissements peuvent être identifiés, classés, hiérarchisés et évalués par différentes méthodes.

Le degré de fiabilité des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain est influencé par plusieurs facteurs, comme la précision, la quantité et la qualité des données acquises, l'échelle de travail, la méthodologie et la modélisation. (van Ouesten et al., 2006).

L'évaluation de la susceptibilité s'effectue en trois étapes (Varnes,1984;Carrara *et al.*,1995;Soeters et van Ouesten,1996; Leroi,1996; van Ouesten, 2001; van Ouesten *et al.*,2003; van Ouesten *et al.*,2006) avec :

(i) L'inventaire des instabilités de terrain où chaque phénomène est distingué selon son type, son activité, son âge. L'information relative aux phénomènes est plus ou moins détaillée selon les moyens et les documents mis à disposition;

(ii) La cartographie des facteurs de prédisposition les plus significatifs (paramètres de terrain) pour l'occurrence spatiale des phénomènes et leur analyse;

(iii) La définition des pondérations relatives à chaque facteur mis en cause pour la localisation des phénomènes. Celle ci reflète la relation spatiale entre le phénomène mis en cause et les facteurs de prédisposition et se définit par plusieurs méthodes selon l'approche adoptée.

De nombreuses recherches sur les risques d'instabilité des pentes ont été effectuées au cours des quatre dernières décennies. Initialement les enquêtes étaient principalement orientées vers la résolution de problèmes sur des sites particuliers. Peu après, les recherches ont mis l'accent sur les techniques d'investigation et de développement spécifiques sur le plan régional.

Cependant, l'hétérogénéité de l'environnement naturel et la grande variabilité des propriétés géotechniques à l'échelle régionale contrastent fortement avec l'homogénéité requise par les modèles déterministes. Ce contraste, associé aux techniques d'investigation coûteuses et longues, rend ces approches d'ingénierie inappropriées pour une application sur de grandes surfaces. En outre, de nombreuses parties de versants où les gens se sont déjà installés, sans la connaissance des risques associés, doivent faire l'objet d'une enquête spatiale. Par conséquent, de telles activités de planification et de prise de décision dans de vastes zones nécessitent des méthodes alternatives d'évaluation des glissements de terrain qui fournissent des directives appropriées pour les futurs plans de développement et de gestion des catastrophes. La solution classique et pragmatique du contexte ci-dessus est l'estimation de la stabilité des versants en cartographiant leur susceptibilité aux glissements de terrain. Sous ce concept, plusieurs approches d'analyse, qui fournissent une évaluation de la stabilité des pentes basée sur une étude minutieuse des conditions naturelles (paramètres de

prédisposition) d'une région donnée et une analyse de tous les paramètres impliqués dans les processus d'instabilité des pentes (facteurs déclenchant), ont été développées.

3. Apport de l'application de la télédétection et SIG dans la cartographie des instabilités de terrain :

L'extraction d'informations spatiales pertinentes liées à la survenue des instabilités de terrain fait partie intégrante de l'évaluation du risque. Les données de télédétection combinées au système d'information géographique (SIG) se sont révélées être des outils efficaces pour générer et traiter des informations spatiales. Les techniques récentes de l'observation de la terre facilitent la détection, la cartographie, la surveillance et l'analyse des dangers des glissements de terrain (Tofani et al. 2013).

L'examen de quelques études sur l'évaluation des risques des instabilités de terrain à l'aide de données spatiales indique que les photographies aériennes ont été largement utilisées pour la détection et la cartographie de ces phénomènes (Galli et al. 2008 ; Guzzetti et al. 2003 ; Yeon et al. 2010 ; Guzzetti et al., 2005; Pradhan et Lee, 2009 ; Miller et Burnett, 2007 ; Manssour, 1998 ; Mastere, 2011). Des photographies aériennes de bonne qualité aident à la détection et à la cartographie précise des mouvements de terrain.

Le développement récent des données satellitaires et des applications de la télédétection pour les études, la cartographie, et le suivi des glissements de terrain ont permis d'avoir des résultats plus satisfaisants. En Europe plusieurs travaux ont été réalisés et ont montré un succès et un gain du temps dans la cartographie et le suivi des glissements de terrain (Tofani et al., 2013). Les données satellitaires à haute résolution sont efficacement utilisées pour la détection, la cartographie, la surveillance et d'autres applications des glissements de terrain (Ma et al. 2013 ; Tofani et al., 2013).

L'utilisation du modèle numérique d'élévation (DEM) revêt une importance capitale pour l'évaluation des risques de glissements de terrain. Plusieurs couches de données thématiques telles que l'angle de pente, l'aspect de la pente, la courbure, les linéaments, le drainage, l'exposition, etc. peuvent être extraites de DEM avec une bonne résolution. Les études récentes sur le zonage des risques de glissements de terrain ont utilisé le DEM avec une résolution élevée pour générer des couches de données d'informations géographiques relatives aux risques de glissements de terrain (Dahl et al. 2010 ; Miller et Burnett 2007 ; Ma et autres 2013 ; Ghosh et autres 2009 ; Calvello et autres 2013 ; Jelinek et Wagner 2007 ; Chand 2008 ; Ruff et Czurda 2008). Peu d'études ont également utilisé des techniques Radar (par exemple, DInSAR, PSInSAR) pour évaluer les risques de glissements de terrain (Catani et al. 2005).

Le système d'information géographique est largement utilisé dans l'évaluation des risques de glissements de terrain, en particulier pour la génération des couches de données thématiques, le calcul de différents indices, l'attribution de poids, l'intégration de données et la génération de cartes LSZ (*Landslide Susceptibility Zonation*). Plusieurs méthodes LSZ telles que ANN (*Artificial neural network*), modèle d'arbre de décision, pondération superposée, AHP et modèles d'aléa de glissement de terrain qui se fondent sur des facteurs physiques sont des modèles basés sur le SIG pour prédire la probabilité de glissement de terrain (Chang et Liu 2004 ; Yeon et al. 2010). ; Pradhan et Lee 2009 ; Akgun and al., 2010 ; Mondal et Maiti 2012 ; Ma et al. 2013).

4. Méthodes d'évaluation de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain :

Suivant le degré de subjectivité introduit dans l'analyse, six approches peuvent être distinguées.On trouvera dans la littérature (Aleottiet Chowdhury, 1999 ; van Ouesten, 2001; Dai *et al*., 2001 ; van Ouesten *et al*.,2006) : (figure III.1)

(i) L'approche qualitative fondée sur l'opinion de l'expert en charge de l'évaluation et elle est très subjéctive.
(ii) L'approche semi-quantitative qui tend à diminuer la part de subjectivité liée à l'expert ;
(iii) L'approche quantitative qui repose sur des méthodes statistiques diverses mettant en relation les phénomènes observés et les facteurs de prédisposition cartographiés;
(iv) L'approche hybride mêlant approches qualitatives, semi-quantitatives, quantitatives ou intelligence artificielle;
(v) L'approche dite "temporelle" introduisant le facteur temps de manière statistique pour améliorer l'évaluation de la susceptibilité;
(vi) L'approche déterministe ou physique, reposant sur des modèles à base physique, qui donne une information sur la stabilité réelle des versants en calculant la probabilité de la rupture (coefficient de sécurité *Fs*).

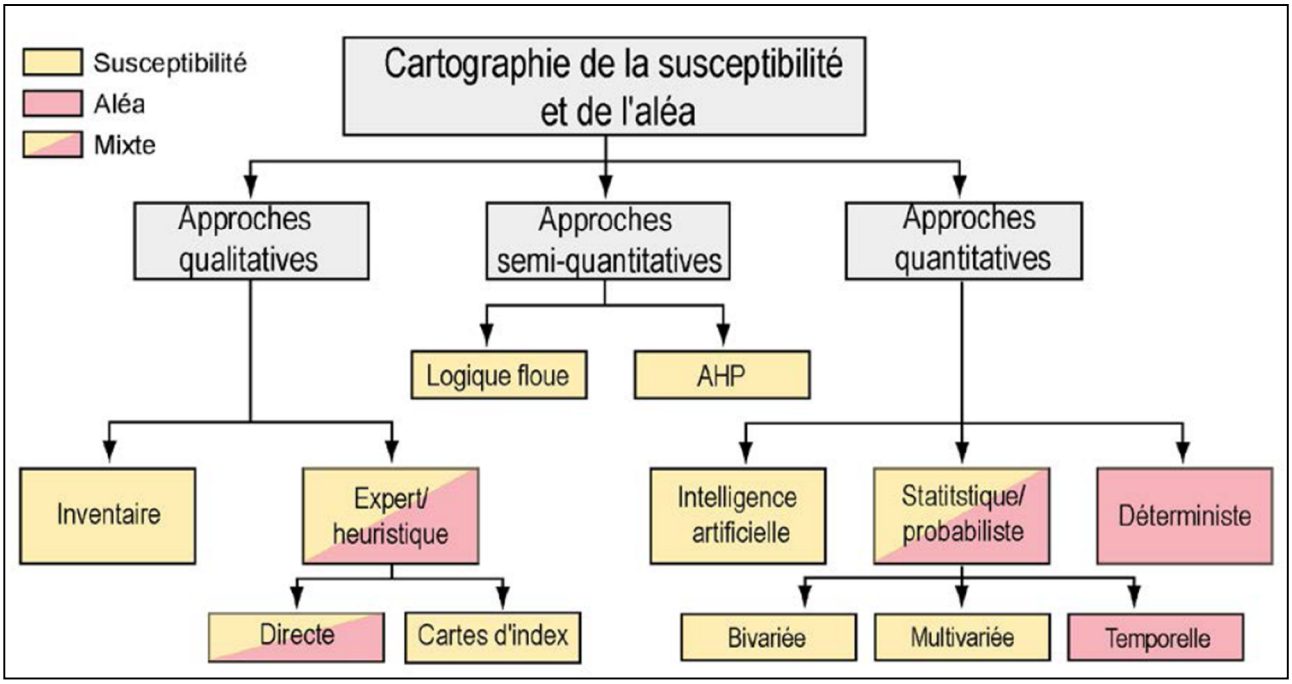


Figure III.1 : Diagramme représentant différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité et de l'aléa *suivant le type d'approche. (M.Fressad, 2013).*

5. Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de la susceptibilité puis de l'aléa :

Il existe différentes méthodes disponibles pour la cartographie des instabilités de terrain, chaque méthode ayant ses propres avantages et inconvénients. Il a été observé qu'aucune méthode unique ne peut décrire le zonage détaillé à long terme des mouvements gravitaires, Van Ouesten, 2003.
Les approches et les techniques décrites précédemment ne sont pas applicables à toutes les échelles de travail (Theiry, 2007). Certaines reposent seulement sur des observations de terrain. D'autres, exigent des données précises qui ne peuvent être collectées que sur de petites zones grâce à des sites instrumentés pour être calées et validées, et d'autres demandent des calcules statistiques et/ou probabilistes, ce qui fait appel à des applications plus compliquées, et des outils plus performants.
Il est possible d'utiliser en cascade plusieurs méthodes distinctes à différentes échelles pour : **(i)** définir à l'échelle régionale les zones fortement susceptibles (en appliquant des approches qualitative ou semi-quantitative), **(ii)** appliquer des méthodes quantitatives indirectes afin de préciser la relation entre les facteurs

prédictifs et l'aléa "glissement de terrain"; et **(iii)** choisir à l'échelle locale, une zone définie comme fortement susceptibles pour analyser l'aléa par des méthodes déterministes (Thiery et al., 2007).

Ce paragraphe présente un examen critique des différentes méthodes de zonage des glissements de terrain avec leurs avantages et inconvénients respectifs (O. dewaite, 2006 ; Thiery et al, 2007 ; Fressard, 2013). Les méthodes qualitatives prenant en compte la subjectivité initiale, ces méthodes conviendraient au concepteur expérimenté, tandis que les interdépendances quantitatives ne sont pas correctement prises en compte, ces approches sont très fréquemment utilisées. Des méthodes semi-quantitatives et quantitatives sont appropriées pour les régions plus étendues et à long terme. La méthode géotechnique est plus appropriée dans des petites régions (analyse de la stabilité de la pente) à court terme mais, à long terme, cette méthode ne prend pas en compte les facteurs de causalité tels que la végétation, les intempéries, l'aspect et le drainage qui influent sur la stabilité à long terme de la pente. Ilestpossible de synthétiser succinctement ces avantages et ces inconvénients pour les approches décrites précédemment comme suit (Theiry, 2007) :

(i) ***Pour les approches qualitatives*** : les avantages résident surtout dans la rapidité de mise en place des méthodes et ce même avec un grand nombre de facteurs. Le principal inconvénient réside dans l'évaluation subjective des facteurs, ne permettant pas la transposition de résultats sur d'autres sites ; tableau. III.4.a.

(ii) ***Pour les approches semi-quantitatives*** : les avantages sont dans la réduction de la subjectivité et la transposition desrésultats à des environnements similaires. Le problème est double avec : un doute possible pour le choix de certaines valeurs d'appartenance (pondérations) lorsqu'un facteur est mal connu ou mal apprécié, et un nombre d'itérations conséquent lorsque plusieurs facteurs sont choisis afin de trouver la bonne combinaison selon l'opérateur ; tableau. III.4.a.

(iii) ***Pour les approches quantitatives (probabilistes)*** : l'avantage le plus souvent cité est l'objectivité des pondérations affectées pour chaque facteur. Parmi les différentes méthodes, les méthodes bivariées (notamment celles fondées sur les théorèmes de Bayes) sont considérées comme les plus souple et les plus fiable en terme de calcul ; chaque facteur n'ayant aucune influence sur l'autre lors du calcul des pondérations. Leursouplesse demiseenœuvre estégalement appréciée car, même avecpeu données, il est possible d'introduire l'opinion experte dans le processus de calcul. Toutefois, les méthodes bivariées présentent l'inconvénient majeur d'avoir l'indépendance conditionnelle entre les facteurs avant le calcul des pondérations et la détermination de la susceptibilité. Pour les méthodes multivariées, si leur grand avantage est une objectivité totale du calcul des pondérations, leur aspect "boîte noire": et le grand nombre de facteurs requis pour obtenir de bons résultats restent leurs grands inconvénients ; tableau. III.4.b

(iv) ***Pour les approches hybrides*** : l'avantage principal est la formalisation des règles subjectives de cartographie en règle(s) mathématique(s) de manière automatique ou semi-automatique. L'inconvénient majeur est l'aspect encore exploratoire de chaque approche ; tableau III.4.c.

(v) ***Pour les approches 'temporelles'*** : l'avantage réside dans l'introduction de l'aspect temporel des phénomènes pour les cartes de susceptibilité. L'inconvénient est que cet aspect est fondé sur des résultats de lois statistiques qui ne prennent pas en compte les processus physiques du déclenchement des phénomènes ;

(vi) ***Pour les approches déterministes*** **:** l'avantage est que tous les processus physiques qui influencent le déclenchement des phénomènes sont pris en compte. Les inconvénients sont le large jeu de données à collecter (dont certaines ne peuvent pas toujours être obtenues) et la grande expérience nécessaire pour les utiliser.

Tableau III.4. a : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles:approches qualitatives et semiquantitatives *(adapté Soeters et van Ouesten, 1996 et Aleotti et Chowdhury, 1999; Theiry, 2007).*

***Utilité du SIG** : H : haute ; I : intermédiaire ; F : Faible. **Echelle de travail** : R : régionale ;M : moyenne ; L : large ; Lo : locale. Op : optimale ; Na : non adaptée ; Dps : développement de procédures spécifiques pour la recherche.*

Approches		Avantages	inconvénient	SIG	Échelle			
					R	M	L	Lo
QUALITATIVE	Carte d'inventaire	Information sur la localisation des phénomènes. Base pour toutes les autres approches.	Aucune évaluation de la susceptibilité et de l'aléa.	F	R	Op	Op	Op
	Analyse géomorphologique	Evaluation rapide tenant compte d'un grand nombre de facteurs.	Méthodologie subjective utilisant des analyse critique des résultats. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	Na	R	Op	Op
	Combinaison de cartes d'index	Diminue le problème des règles subjectives. Automatisation des étapes. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites.	I	R	R	Op	Op
SEMI-QUANTITATIVE	Logiques floues	Diminue le problème des règles subjectives. Permet une transposition dans des environnements similaires; Simplicité de mise en place,	Subjectivité dans l'attribution des pondérations des classes de chaque facteur. Recherche des règles combinatoires longues à mettre en œuvre	H	Op	Op	Dps	R
	Système de décision multicritères	Diminue le problème des règles subjectives (hidden rules). Rapidité de mise en place. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Méthode peu transposable sur d'autres sites actuellement.	H	R	Op	Dps	R

Tableau III.4. b : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles *: approches quantitatives (adapté Soeters et van Ouesten, 1996 et Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Theiry, 2007).*

Approches			*Avantages*	*inconvénient*	*SIG*	*Échelle*			
						R	*M*	*L*	*Lo*
QUANTITATIVE / PROBABILISTE	*Bivariées*	*Méthode de susceptibilité*	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		Méthode par pondération de l'information	Simplicité de mise en place, rapidité des calculs. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée.	H	Op	Op	R	R
		Méthodes Bayésiennes	Technique la plus souple et modulable pour la modélisation. Permet l'introduction de l'opinion 'expert' pour améliorer les résultats. Possibilité d'automatiser la procédure.	Collecte systématique de certaines données. Evaluation de la dépendance conditionnelle des données d'entrée. Procédure à adapter pour l'échelle large.	H	Op	Op	Dps	R
	Multivariées	*Analyse discriminante*	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Nécessite un large jeu de données Nécessite de caractériser les facteurs les plus influents avant le calcul Calcul par cellules déconseillé. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG. Collecte systématique de certaines données.	H	Op	Op	R	R
		Régressions multiples	Résultats très fiables si les facteurs les plus influents sont caractérisés avant le calcul. Généralisation aisée à un site large si les unités homogènes sont bien définies avant le calcul.	Nécessite un large jeu de données Calcul par cellules déconseillé. Généralisation des facteurs trop grande si unités homogènes par polygones (slope-units) utilisées. Résultats peu acceptables si le site est complexe. Nécessite un traitement par logiciel externe au SIG.	H	Op	Op	R	R
		Régressions logistiques	Possibilité de calcul cellules par cellules. Pas d'analyse préalable sur les facteurs. Modules développés sous SIG existants.	Nécessite un large jeu de données Adaptation d'une stratégie spécifique si le terrain est complexe. Les distributions des probabilités sont difficiles à analyser pour de faible niveau d'aléa.	H	Op	Op	Dps	R

Tableau III.4. c : Avantages, inconvénients et utilité des SIG pour les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa à différentes échelles *(adapté Soeters et van Ouesten, 1996 et Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Theiry, 2007).* ***Utilité du SIG*** *: H : haute ; I : intermédiaire ; F : Faible.* ***Echelle de travail*** *: R : régionale ;M : moyenne ; L : large ; Lo : locale. Op : optimale ; Na : non adaptée ; Dps : développement de procédures spécifiques pour la recherche*

Approches		***Avantages***	***inconvénient***	***SIG***	***Échelle***			
					R	***M***	***L***	***Lo***
HYBRIDE	*Logiques floues combinées à une autre méthode*	Diminue le problème des règles subjectives. Rapidité de mise en place. Standardisation de la gestion des données.	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes de chaque facteur. Recherche des règles combinatoires longues à mettre en œuvre	H	R	Op	Dps	R
	Intelligence artificielle (Réseaux de neurones artificiels)	Méthode objective. Ne demande aucune connaissance théorique sur les processus physiques. Peut-être couplé avec d'autres approches.	Approche encore expérimentale. Peut nécessiter un calage long. Demande une vérification systématique de tous les facteurs les plus influents.	H	R	Dps	Dps	R
TEMPORELLE	*Analyse de fréquence des précipitations*	Information rapide à obtenir. Donne un aperçu de l'influence des précipitations.	Nécessite un inventaire précis des phénomènes.	F	Op	R	Na	Na
	Analyse de fréquence des précipitations couplées aux approches statistiques	Information rapide à obtenir après calcul de la susceptibilité. Donne un aperçu sur l'influence des précipitations.	Les processus physiques ne sont pas pris en compte. Nécessite un inventaire historique précis des phénomènes.	H	Na	R	Dps	R
	Approche par analyse en retour des phénomènes	Permet d'élaborer des scénarii à court et moyen terme.	Nécessite un inventaire historique précis des phénomènes. Les processus physiques ne sont pas pris en compte. Beaucoup d'incertitude entre les périodes de retour et la réalité. Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude.	H	Na	Dps	Na	Na
DETERMIN-ISTE	*Approche géotechnique*	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles géotechniques. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables.	H	Na	Na	Op	Op
	Approche par précipitations critiques	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles géotechniques. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Ne prend pas en compte l'incertitude des variables. Simplification des processus physique pour certains modèles. Ne prend en compte qu'un type de mouvements de versant.	I	Na	Na	Op	Op
	Approche par zonage dynamique	Méthodologie objective et quantitative. Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques. Fournit des champs de pression et de déformations. Permet l'élaboration des scénarii prédictifs.	Besoin de connaissances détaillées de la zone d'étude. Besoin d'une grande expérience pour utiliser les modèles. Besoin de codes de calcul spécifiques, de longs paramétrages. Problèmes d'interface.	H	Na	Na	Dps	Op

6. Validation des modèles de prédiction :

"In prediction modelling, the most important and the absolutely essential component is to carry out avalidation of the prediction results. Without some kind of validation, the prediction model and image are totally useless and have hardly any scientific significance." –Chung and Fabbri (2003)

Selon Oreskes *et al.*, 1994, la vérification et la validation des modèles de prédiction des systèmes naturels sont quasiment impossibles étant donné que les systèmes naturels ne sont jamais fermés et que les résultats du modèle ne sont jamais uniques. Ceci vient du fait que les modèles requièrent des données souvent incomplètes et aussi l'estimation ou le calcul du poids et de la probabilité apriori ne sont jamais totalement exactes. En fait, les modèles ne peuvent être évalués que de manière relative et leur valeur prédictive est toujours discutable.

La notion "vérification" signifie l'établissement de la vérité. Le fait de dire qu'un modèle est vérifié consiste à dire que sa vérité a été démontrée. Ce qui est difficile de confirmer pour un phénomène naturel qui dépend de plusieurs facteurs.

Le terme "validation" s'applique à la mesure de l'adéquation entre les modèles de prédiction et les observations de terrain non impliquées dans l'établissement du modèle. On parle aussi de l'estimationou de l'évaluation de l'exactitude du modèle (Oreskes *et al.*, 1994 ; Kohavi, 1995 ; Guisan et Zimmermann, 2000). La validation dans ce contexte signifie simplement une cohérence avec un système et ne nécessite en aucun cas une quelconque fiabilité du système dans la représentation de phénomènes naturels. Deux approches principales sont souvent appliquées pour évaluer le pouvoir prédictif d'un modèle (Olivier Dewaite, 2006).

La validation d'un modèle de prédiction permet d'évaluer sa performance et sa robustesse spatiale et temporelle, et de comparer plusieurs modèles. Elle permet également de rendre compte de l'efficacité relative des différentes variables prédictives (Chung et Fabbri, 1999, 2003, 2005 ; Davis et al., 2003 ; Kojima et al., 1998 ; Fabbri et Chung, 2001).

6.1. Méthode de validation "holdout" :

La méthode "holdout" consiste à employer deux ensembles de données indépendants (par exemple des occurrences de glissements de terrain) pour calibrer le modèle. La calibration d'un modèle signifie la manipulation des variables indépendantes pour obtenir une adéquation entre la ou les variables dépendantes observées et simulées. La calibration englobe également la validation du modèle.

Pour se faire, un échantillon d'apprentissage est utilisé pour réaliser le modèle de prédiction et un autre échantillon (test) servira pour l'évaluation du modèle (Kohavi, 1995). Il est préférable, si c'est possible, de réaliser la partition en deux périodes de temps (Fabbri et Chung, 2001 ; Fabbri *et al.*, 2002 ; Chung et Fabbri, 2003, 2005 ; Dewaite, 2006), plutôt que de séparer spatialement les glissements en deux groupes (aléatoires ou non) (Manel *et al.*, 1999 ; Fabbri et Chung, 2001 ; Gritzner *et al.*, 2001 ; Pistocchi *et al.*, 2002 ; Ercanoglu, 2005 ; Lee *et al.*, 2005a). La séparation temporelle, où les occurrences de la période la plus ancienne sont utilisées pour construire le modèle de prédiction et celles de la plus récente pour le valider, permet de réaliser une validation a posteriori. Par contre, la séparation spatiale tend à surestimer l'exactitude des prédictions. Ceci n'est possible que s'il y a un suivi du phénomène dans le temps, afin d'effectuer un échantillonnage sur deux périodes.

6.2. Méthodes de validation croisée et "*bootstrap*" :

Lorsque la séparation des occurrences des glissements de terrain en deux époques est impossible à afin d'éviter une séparation spatiale inappropriée, il est possible d'appliquer les méthodes de validation par rééchantillonnage croisée et de "*bootstrap*" (Lebart *et al.*, 2000).

La validation croisée consiste à (Chung et Fabbri, 2002 ; Davis *et al.*, 2003 ; Fabbri et Chung, 2003 ; Dewaite, 2006) :**(i)** éliminer à tour de rôle chacun des individus constituant l'échantillon initial, en formant

de cette manière *n* sous-échantillons d'effectif *n-1* ;**(ii)** calculer la valeur du paramètre sur l'individu exclu pour chacun des n sous-échantillons et **(iii)**étudier la distribution des valeurs ainsi obtenues. Il s'agit de la validation croisée "*leave-one-out*" alors que la validation croisée "*k-fold*" opère de la même manière mais avec *k* sous-échantillons de taille égale. L'avantage de la validation croisée (Mark et Ellen, 1995 ; Chi *et al.*, 2002 ; Chung et Fabbri, 2002 ; Fabbri et Chung, 2003), contrairement à la méthode "*holdout"* est d'utiliser toutes les occurrences dans la prédiction après avoir sélectionné le meilleur modèle. La validation croisée, c'est la seule façon d'estimer l'erreur après que le modèle final ait été choisi.
La méthode de "*bootstrap*" étudie la variabilité d'un modèle en procédant à des tirages aléatoires avec remise dans l'ensemble de données. Le nombre d'échantillon peut être ici beaucoup plus important que le nombre d'occurrences, une même occurrence pouvant par conséquent être utilisée plusieurs fois pour la validation. (Lebart *et al.*, 2000 ; Dewaite, 2006)
Au cours de notre travail, nous avons utilisé des tests de validation, selon les méthodes de validation croisée et "*bootstrap*", du fait que les données temporelles des instabilités de terrain recensés au niveau de la région ne sont pas disponibles pour la plupart des cas.
Les tests que nous avons utilisés, pour nos modèles probabilistes, sont : La courbe du taux de succès (SRC), le test aveugle et la courbe de prévision (PRC) ; ils seront décrits dans le chapitre.VII.
En plus de la validation, il est intéressant de comparer le résultat final de la prédiction avec l'ensemble des glissements existants ayant été utilisés pour cette prédiction. Comme l'ont souligné Chung et Fabbri, 2003, il ne s'agit pas ici d'une validation au sens strict mais d'une estimation du taux de succès de la prédiction.
Il faut rappeller que l'exactitude d'une prédiction de l'aléa "glissement de terrain" dépend de plusieurs facteurs: **(i)** de l'expérience des chercheurs, **(ii)** de l'exactitude des données utilisées, **(iii)** du modèle utilisé **(iv)** et de la taille de la zone d'étude (Soeters et van Ouesten, 1996). Ces facteurs sont souvent en corrélation. Par exemple, la taille de la zone d'étude détermine largement le genre, la densité et la précision des données qui peuvent être collectées, ainsi que le choix de la technique d'analyse qui sera appliquée dépend de l'échelle d'étude.

Conclusion :

Le zonage des risques des instabilités de terrain est une tâche critique dans le processus de gestion de ces phénomènes. Les mouvements de pente sont influencés par plusieurs facteurs prédictifs et déclencheurs qui varient considérablement d'une région à l'autre. Il est donc difficile de déterminer les poids pour un paramètre donné ; du fait que l'attribution des poids, fondés sur l'importance relative des facteurs causaux des mouvements de terrain, sont déterminés différemment par plusieurs méthodes. Les techniques heuristiques et semi-quantitatives impliquent la subjectivité dans l'attribution des poids, de sorte que la validité de ces cartes ne peut être évaluée. L'approche de décision multicritères(AHP) fournit des outils pour déterminer les poids sur la base d'une comparaison par paires. Les méthodes quantitatives, d'autre part, fournissent des méthodes objectives pour déterminer les poids d'un paramètre donné en fonction de leurs relations avec l'occurrence des instabilités de terrain.
En général, toutes les approches et modèles d'analyse ci-dessus présentent des avantages et des inconvénients caractéristiques. Il est donc important d'appliquer la méthode appropriée ou d'intégrer plusieurs méthodes pour la préparation optimale des cartes de susceptibilité aux instabilités de terrain (LHZ). Par exemple, même si l'expert peut évaluer qualitativement les conditions générales et extraire les combinaisons de paramètres critiques comme le fait l'approche heuristique, des procédures objectives, telles que statistiques et déterministes, sont souvent souhaitées pour étayer quantitativement l'évaluation de l'instabilité de la pente et inversement. L'application des systèmes d'informations géographiques et de télédétection revêt d'une importance capitale pour une évaluation efficace des risques d'instabilités de terrain. Les données satellitaires haute résolution combinées à de puissantes techniques SIG ont récemment amélioré le niveau de précision des cartes de susceptibilités aux mouvements de terrain.

Avec l'introduction du SIG, les méthodes indirectes ont acquis une énorme popularité. La capacité unique du SIG : (**i**) à gérer les ensembles de données complexes pour une analyse et des calculs efficaces, (**ii**) à améliorer les modèles en évaluant leurs résultats et en ajustant les variables d'entrée par une méthode d'essai et d'erreur, et (**iii**) à mettre à jour la base de données de manière simple et rapide ; offre un environnement efficace d'études et de cartographie des instabilités de terrain. Aussi d'autres atouts du SIG méritent-ils d'être mentionnés; vu sa capacité : (**iv**) à intégrer des données qualitatives et quantitatives via des relations spatiales, (**v**) à utiliser des fonctions de superposition permettant de combiner plusieurs cartes et (**vi**) à développer des modèles numériques d'élévation (DEM) pouvant ensuite être utilisés pour la préparation de cartes de pente, d'aspect et d'ombrage et la modélisation hydrologique.

L'utilisation du SIG permet de développer avec précision et impartialité le poids des facteurs utilisés dans une telle analyse. Cependant, il convient de noter que ces poids de facteurs ne sont acceptables que si les bases de données à partir desquelles ils sont dérivés sont exactes. De plus, il semble qu'avec le développement croissant des SIG, de la télédétection et des outils statistiques/ analytiques, on a tendance à se concentrer davantage sur les nouvelles méthodes plutôt que de se limiter à comprendre les liens de causalité pour des types spécifiques des instabilités de terrain (par exemple, Lee et al., 2002, 2004a).

Dans cette étude, des modèles à la fois heuristiques, statistiques, et déterministes ont été utilisés pour l'analyse de la susceptibilité aux mouvements de terrain, dans une région où peu d'études sur les instabilités de terrain ont été effectuées (et seulement sur des échelles locaux). L’objectif secondaire de l’étude est d’évaluer l’efficacité des différents modèles utilisés dans l'étude des mouvements gravitaires dans de telles régions.

DEUXIEME PARTIE: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN

CHAPITRE. IV : LA CARTOGRAPHIE DES INSTABILITES DE TERRAIN (APPROCHE EXPERTE ET ETUDE DE CAS)

Introduction :

Les mouvements de terrain se définissent comme un déplacement lent ou rapide du matériel superficiel de l'écorce terrestre (sol, sable, roche), vers le bas de la pente, dû à une augmentation de poids, perte de la consistance des matériels ou autre facteur qui génère un déséquilibre dans le versant.

L'expression "instabilité de terrain" renferme donc toute modification de la surface terrestre due à la pesanteur. Il s'agit soit d'une remise à l'équilibre, soit d'une manifestation naturelle de l'évolution morphologique au même titre que l'érosion. L'extrême variété des facteurs mis en jeu, (condition géologique, géomorphologues, climatique, etc.…) conduit à une grande diversité de mouvement d'où le problème de classification dont le principal avantage est de permettre aux spécialistes d'utiliser un langage commun.

Selon C.Désodt; J.Launa; H.H. Molinaro, 2017, les mouvements gravitaires 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. Le matériel déplacé peut bouger de façon lente (millimètres par an), rapide et extrêmement rapide (mètres/jour) selon la topographie, le volume de la masse du sol ou de la roche, le mécanisme de rupture et l'action de l'eau, parmi d'autres facteurs. Certains matériaux réagissent particulièrement aux glissements de terrain, comme les argiles, les marnes, les gypses ou les formations superficielles d'altérites. En plus, ils peuvent s'activer ou s'accélérer à cause des précipitations, d'augmentation du niveau des eaux souterraines, de l'érosion, du débordement des rivières et de l'activité humaine, aussi des tremblements de terre, et les éruptions volcaniques. Leur composition influe sur leur gravité, ils deviennent destructeurs lorsque la teneur en eau atteint un pourcentage de 30%, ils forment alors des coulées torrentielles. Dans ce sens, les facteurs qui contribuent à créer une situation d'instabilité sur un versant (déclinaison) sont multiples (un facteur agit rarement seul). Ces facteurs se divisent en facteurs conditionnants (intrinsèques tel que la géologie la topographie, l'hydrogéologie, l'occupation du sol…) et facteurs déclencheurs ou facteurs extérnes (climat, seisme, activités antropiques…) (Ineter et Cosude, 2005).

En anglais, tous les mouvements de terrain sont appelés "landslide" ce qui facilite la terminologie, en français le terme glissement de terrain ne recouvre qu'une partie des mouvements de terrain ou mouvements de versant ou instabilités de versant. Les mouvements de pente regroupent tous les processus de transport en bloc, un volume plus au moins grand de matériaux d'un versant (R. Coque, 1977).

La classification des mouvements est une tâche difficile, car chaque cas est, en quelque sorte, particulier. Néanmoins les principes généraux régissant ces mouvements se résument à un petit nombre. La plus grande difficulté réside pourtant dans l'identification des éléments nécessaires à la classification, et ceci pour deux raisons :

- Les mouvements de versant se déroulent en trois dimensions alors que notre accès direct n'est qu'en deux dimensions, soit en surface, même si les méthodes géophysiques peuvent fournir un certain nombre d'informations sur la troisième dimension.
- L'accès à ce que l'on appelle souvent la quatrième dimension, le temps, est souvent tronqué, car l'historique des données disponible ne concerne, pour la plupart du temps, que de courtes périodes.

Ainsi, lorsqu'on décrit des mouvements de terrain, il faut constamment avoir en tête les deux éléments précédents, non seulement pour l'interprétation des mécanismes, mais surtout en termes pratiques, car la récolte d'informations est souvent onéreuse (M. Jaboyedoff, 2012).

1. Les critères de classification:

L'établissement d'une classification n'est pas une chose usuelle. Le problème majeur réside dans le passage d'une classification régionale à une classification à valeur générale ou universelle, d'autres difficultés surviennent quand il s'agit de caractériser le type de rupture, le mode de déplacement, la taille des constituants, ou d'avantage encore, quand il s'agit de déterminer les degrès d'activités actuelles du phénomène ou de sa stabilisation. Plusieurs classifications ont été proposées par des géologues, des mécaniciens ou des géotechniciens. Ces classifications permettent de dénommer les principaux types de mouvement de pentes, de telle façon qu'elles évoquent certaines de leurs caractéristiques essentielles ou permettent de les retrouver.

Les premières classifications étaient simples car elles s'appuyaient sur des observations. En 1846, A. Collin, propose une classification basée sur la forme et la dimension de la masse déplacée. K.Terzaghi, 1925 fait intervenir la mécanique des sols pour le classement des mouvements de terrains. Il distingue d'une part les mouvements se produisant à sec, et d'autre part, les mouvements impliquant des formations plastiques. Mais cette classification ne mentionne pas les mouvements liés à la solifluxion. Sharpe en 1938, propose une classification fondée essentiellement sur trois facteurs : le mode de mouvement, la teneur en eau et le type du matériau. J.P. Bombard, 1968 propose quatre critères qui peuvent être à la base d'une classification des mouvements de terrain : Le mode de mouvement, le type du matériau, les dimensions du mouvement, la vitesse du mouvement. L'inconvénient de cette classification, reste que la vitesse du mouvement est difficile à mesurer avec précision, et elle est très variable dans l'espace et dans le temps, du fait qu'il y a des phases d'accélération et de ralentissement dans la cinétique du mouvement. J.P. Mougin, 1973 intègre l'existence et la forme de la surface de rupture. G. Colas et G. Pilot (1976) proposent une classification basée sur deux critères fondamentaux, qui sont : la nature du matériau, le type de déplacement.K. Sassa (1985) a proposé une classification plus géotechnique en fonction de deux critères: l'un est relatif au matériau, l'autre est relatif au type de mouvement.

Pour des classifications plus récentes, on peut citer à titre d'exemple, P.Antoine, 1992 propose une classification basée sur les mécanismes de déformation et de rupture. Cruden et Varnes, 1996 se sont basés d'une part sur la nature des matériaux en cause (rocher, sol ou débris) et d'autre part sur le type de mécanisme de déformation et de rupture (chutes de matériaux, basculements, glissements plans ou rotationnels, etc.). Toutefois, il faut noter que ces classifications ne doivent pas faire oublier les associations possibles de mouvements de différentes familles, soit se succédant dans le temps (fauchage aboutissant à un éboulement, par exemple), soit se juxtaposant dans l'espace (glissement d'un versant marneux et éboulement de la corniche rocheuse à l'amont, par exemple).

2. Classification des instabilités (D'après Cruden and Varnes, 1996):

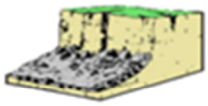
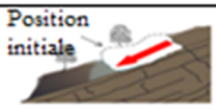
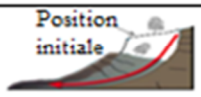
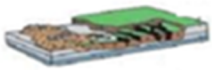
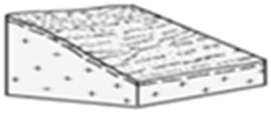
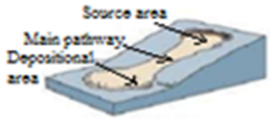
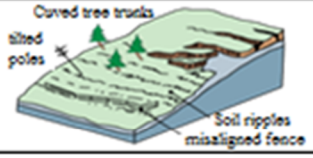
La classification la plus citée est celle de Varnes, 1978, sur laquelle repose la plupart des classifications récentes comme par exemple Cruden et Varnes, 1996 qui s'appuie sur : les types de mouvements, les types de matériaux, l'activité, la description du mouvement.

Les mouvements de versant sont premièrement caractérisés par leurs types de mouvements qui s'apparentent aux mécanismes, ils se décomposent en cinq grandes catégories : chutes, basculement, glissement, étalement et écoulement.

Plusieurs types d'instabilités peuvent coexister en un même lieu et forme des glissements complexes. Ce sont des mouvements où on assiste à la transformation d'un mouvement en un autre, ou bien la superposition de deux types de mouvements. Selon la combinaison des mouvements, la morphologie de ce type est très variable. C'est le cas par exemple pour les glissements ± écoulements, les glissements composites, les glissements ± sapements ; et les éboulements en masse ± coulée de débris ; glissements qui évoluent en coulée boueuse ; glissement+éboulement, ce qui est le cas pour plusieurs cas de mouvements de versants

dans la région. Le tableau IV.1 résume les types des mouvements gravitaires selon la classification de Cruden et Varnes (1996).

Tableau IV. 1: Classification des mouvements de pentes selon Cruden et Varnes, 1996

Type d'instabilités de terrain		Schéma	Contextes et exemples	Vitesse
Chutes	**Chute de pierres**		Chutes de blocs à partir de falaises ou de simples affleurements instables. Chute de berges dans les rivières	Rapides à très rapides
	Eboulement			
	Ecroulement			
	Avalanche rocheuses			
Basculement	**Basculement de blocs= Fauchage**		Mouvements qui affectent les versants à grande échelle. Basculement de blocs	Lent à extrêmement lent
Glissement	**Glissement translationnel**		Mouvements qui affectent les versants dont la pente moyenne est le plus souvent inférieure à 35°	Lent à extrêmement lent
	Glissement rotationnel			
	Expansion latérale			
Etalement	**Reptation**		Affectent des dépôts sédimentaires subhorizontaux contenant des alternances de matériaux plastiques, comme les argiles. Argile sensibles	Extrêmement lent à rapide
	Solifluxion			
Ecoulement laminaire	**Ecoulement laminaire**		Comportement des boues, des laves torrentielles, des avalanches de neige lourde, des eaux dans des zones peu montagneuses. Avalanches rocheuses vue macroscopiquement.	Rapide à extrêmement rapide
Ecoulement turbulent	**Coulée de boue**		Situation réelle de nombreux écoulements tels que : les avalanche de poudreuses, les torrents, les laves torrentielles, etc...	Rapide à extrêmement rapide
Mouvements Complexe	**Glissement coulée**		Toutes types de roches	Lent à rapide
	Déformation lente de versant rocheux			
	Avalanche de débris			

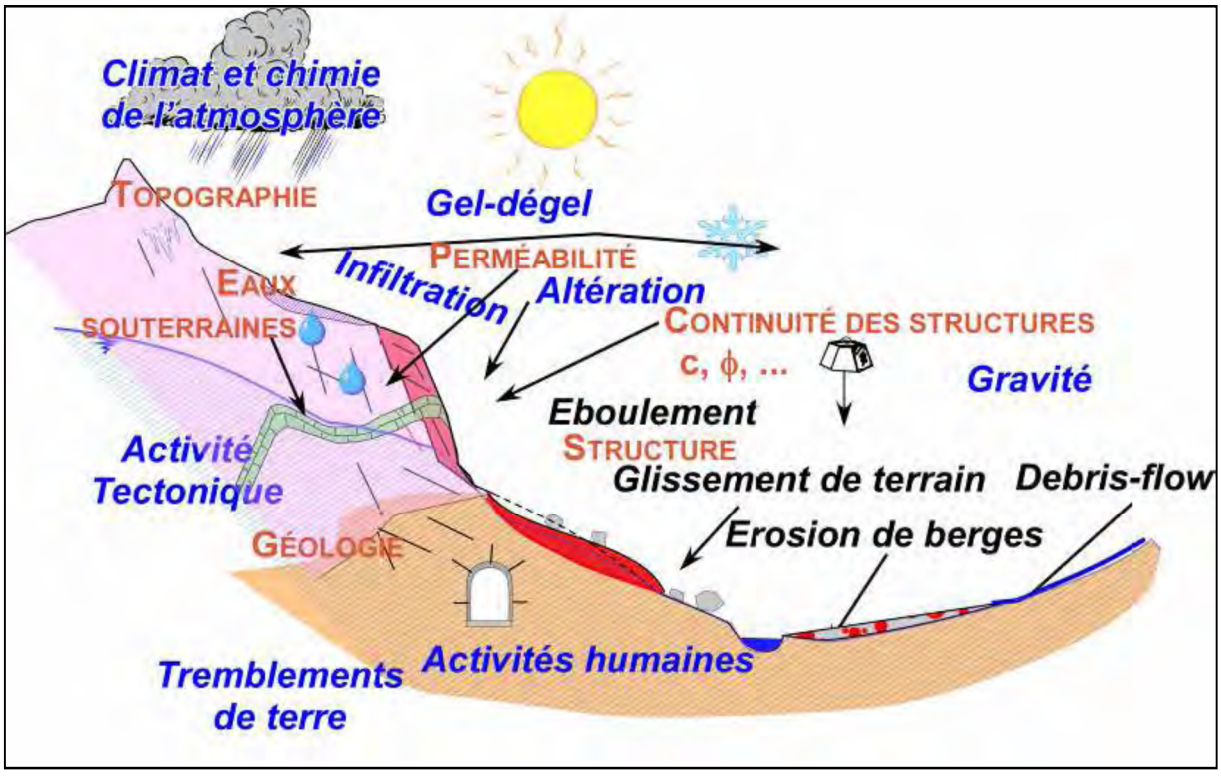
3. Facteurs d'instabilité :

Les mouvements de pente sont des manifestations naturelles de l'évolution du relief, en action, à la surface terrestre depuis des millions d'années. Les observations et les études effectuées à partir d'événements passés ont permis de mettre en évidence certaines conditions de site favorables à l'apparition de tel ou tel phénomène d'instabilité.

L'analyse de la stabilité des versants s'effectue sur la base d'un certain nombre de paramètres qui vont dépendre du niveau de détail de l'étude. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories (FigureIV.1) :

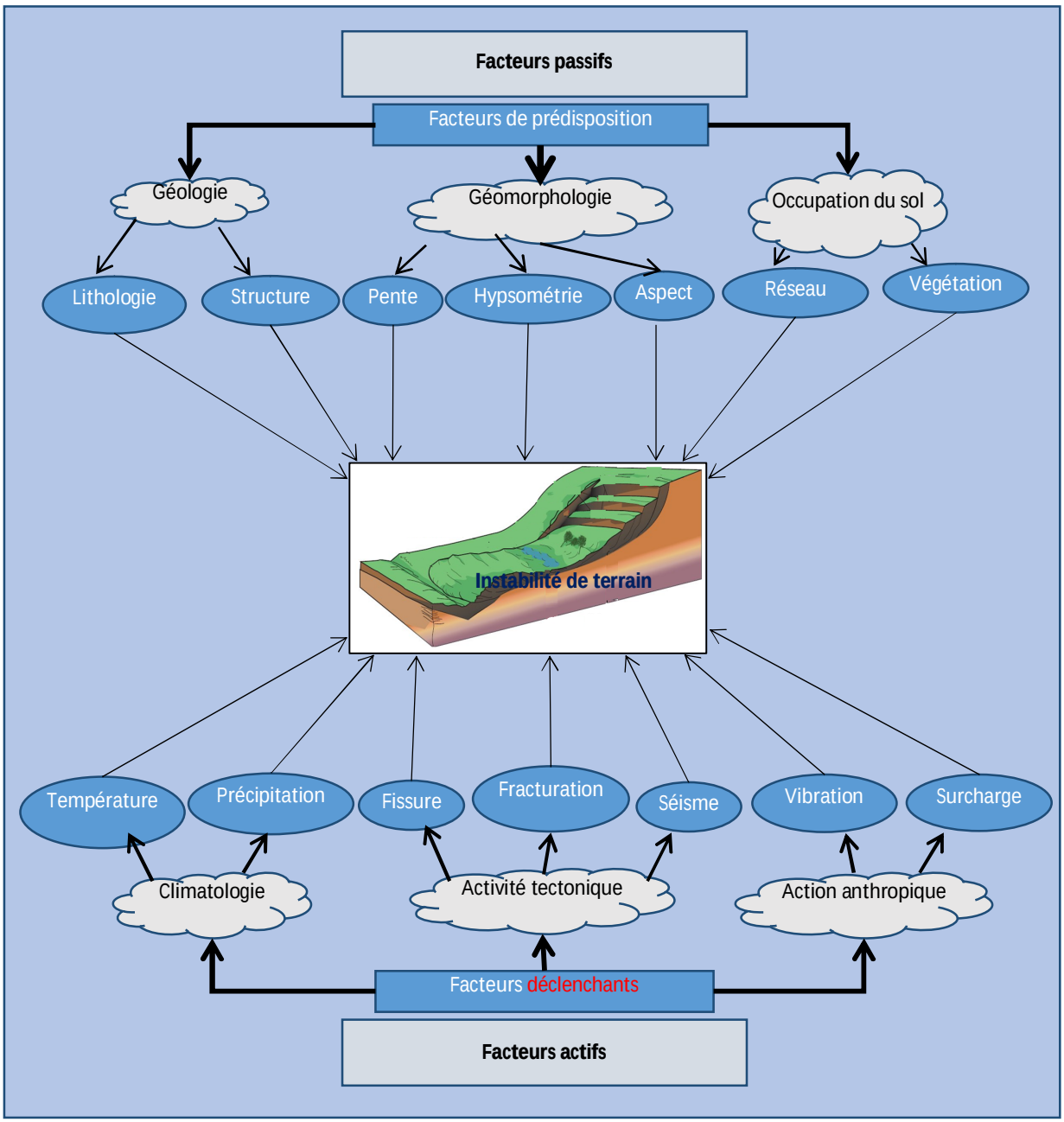
- Les caractéristiques intrinsèques (permanents)
- Les facteurs externes, variables dans le temps (déclencheurs)

Les premiers sont toutes des propriétés du milieu dans lequel est susceptible de se développer un mouvement de versant. Cela va des propriétés mécaniques à la forme du relief. Les facteurs externes sont les phénomènes qui, par leur action, modifient les premiers.



FigureIV.1: Illustration des caractéristiques intrinsèques et des facteurs externes. *(en rouge, les facteurs permanents et en bleu les facteurs externes).*

Beaucoup de difficultés surviennent quand il s'agit de classer les mouvements de pente. Certains s'interrogent même sur la légitimité d'une telle entreprise, à cause de la diversité des facteurs d'instabilité et des paramètres à prendre en compte, malgré qu'elle réduise la complexité de ces événements. Ceci est bien représenté par le fait qu'il y a d'autres phénomènes, comme le ravinement (qui est considéré comme une instabilité dans notre cas d'étude) ou l'érosion, qui ne sont pas décrites ci-dessus à cause de la divergence du point de vue des auteurs de ces classifications. Aussi dans une perspective de gestion du risque, faire la différence entre les familles de mouvements de pente est-elle primordiale. Ainsi faut-il noter l'importance de la cinématique du développement de la rupture et du déplacement des masses rompues, où l'eau joue très souvent un rôle majeur. (FigureIV.2)



FigureIV. 2: Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité.

4. Cadre théorique des méthodes et outils de cartographie des instabilités de terrain :

La carte des inventaires des glissements de terrain montrent l'emplacement des mouvements gravitaires qui ont laissé des caractéristiques visibles dans une zone (F.Guzzetti et al., 2000; 2012) et fournit des informations utiles sur la dynamique et la réactivation des glissements de terrain à l'échelle des bassins versants. Afin d'évaluer la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain, les inventaires des mouvements gravitaires sont des éléments fondamentaux, quoi qu'il soit le modèle utilisé (R.Soeters et Van Ouesten, 1996; F.Guzzetti et al.,2012) indiquent que les inventaires de glissements de terrain peuvent être préparés en utilisant différentes techniques, par conséquent, le choix de la technique appropriée dépend de

l'objectif de l'inventaire, de la taille de la zone couverte, du temps requis, de l'expérience des chercheurs, en plus des ressources disponibles (F. Guzzetti et al., 2000).

Une synthèse détaillée du cadre théorique et des principes de base des inventaires des mouvements de versant peut être, entre autres, trouvée dans Guzzetti, 2006; Guzzetti et al., 2012, dont s'inspirent largement les descriptions suivantes (Fressard, 2013):

- Les mouvements de versant laissent des signes discernables pouvant être reconnus, classés et cartographiés sur le terrain et/ou par interprétation d'images aériennes (Varnes, 1978 ; Hutchinson, 1989). Ces signes sont morphologiques, pour la plupart, caractérisés notamment par des changements dans la position, la forme ou l'apparence de la topographie. Mais, les mouvements de versant peuvent également impliquer des changements sur la lithologie ou l'occupation du sol.
- La signature morphologique des mouvements de versant est intimement liée à leur nature. Elle peut donc être interprétée pour délimiter l'étendue et le type de mouvement. À partir de la morphologie de surface, il est également possible de proposer une évaluation qualitative de l'âge, du degré d'activité et de la profondeur des mouvements de versant (Varnes, 1978 ; Mc.Calpin, 1984 ; Hutchinson, 1989 ; Cruden & Varnes, 1996 ; Dikau et al., 1996a). Les mouvements de versant ne surviennent pas au hasard. Ils sont le résultat de processus physiques plus ou moins complexes contrôlés par des lois mécaniques pouvant être déterminées empiriquement, statistiquement ou de manière déterministe. Les phénomènes peuvent ainsi être généralisés (Aleotti & Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999a).
- Le principe d'actualisme est souvent adopté pour la caractérisation des mouvements de versant considérant que "le passé est la clé pour comprendre le futur". Ainsi ce principe implique-t-il de supposer que les mouvements de versant se déclencheront dans les mêmes conditions ayant mené, dans le passé, à l'instabilité (Varnes et al., 1984 ; Carrara et al., 1991 ; Aleotti & Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999b).

4.1 Méthodes de cartographie des instabilités de terrain :

Les inventaires des mouvements de versant peuvent être réalisés avec une large gamme de méthodes :

- la cartographie géomorphologique de terrain (Mahieu et al., 1977 ; Brunsden, 1985 ; Brunsden, 1993) ;
- l'interprétation d'images aériennes verticales et/ou obliques (Porcher & Guillope, 1979 ; Parise, 2001 ; Guzzetti et al., 2012) ;
- l'analyse d'archives historiques (travaux antérieurs, des études des Laboratoirs, bases de données d'incidents, etc.) (Helluin, 1988 ; Domınguez Cuesta et al., 1999 ; Salvati et al., 2009) ;
- les méthodes issues de la télédétection telles que l'interprétation d'images multispectrales haute résolution, l'interprétation d'images radar (SAR, Synthetic Aperture Radar), ou l'analyse de MNT-LIDAR à très haute résolution (van den Eeckhaut et al., 2011; Lissak, 2012).

Dans ce contexte, les techniques de télédétection (photo-interprétation, photogrammétrie, traitement d'images aériennes et satellite, modèles numériques de terrain, et autres) constituent un moyen intéressant pour caractériser l'aléa. Les avantages qu'offre la télédétection sont multiples. Principalement, elle permet l'acquisition d'une vision globale de l'état du paysage, de son évolution et ses limites, ainsi que les prospections de terrain surtout dans les zones montagneuses difficiles d'y accéder, et permet un gain de temps et d'argent. C'est une source commode à consulter et relativement facile d'accès. De plus, elle permet la fixation de l'information à une date donnée et le suivi temporel de changements.

La sélection de la méthode d'inventaire est extrêmement dépendante des relations entre :**(i).** L'objectif de l'étude, **(ii).** la taille du site à investiguer, **(iii).** L'échelle des documents disponibles (cartes topographiques, images aériennes, etc.) et **(vi).** Les moyens (matériels, financiers, humains, temporels) disponibles pour mener le travail (Guzzetti, 2000).

Le résultat cartographique peut aussi être considéré comme une forme élémentaire de carte d'aléa (Soeters et van Ouesten, 1996 ; Valadão et al., 2002 ; Colombo et al., 2005 ;Y. Thiery,2007). En effet, les caractéristiques associées comme le type de phénomène, l'activité, l'âge et les périodes de retour, permettent d'obtenir des informations sur l'occurrence des phénomènes et sur l'évolution de certains facteurs, tels que l'occupation du sol (Soeters et van Ouesten, 1996).

4.2. Utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain :

Les types de supports de télédétection optique utilisés actuellement pour la détection des mouvements de terrain sont diverses : orthophotos (noir et blanc, couleur, infrarouges) uni- et multitemporelles, images satellites classiques PAN ou XS (images Landsat TM, SPOT) uni- et multitemporelles, images satellites à très haute résolution (Ikonos, Quickbird), ondes infrarouges thermiques (capteur ASTER du satellite Terra)... Parmi les techniques numériques de détection des instabilités de terrain, malgré la disponibilité théorique d'images satellite, les photographies aériennes sont davantage utilisées pour les études de glissement de terrain, car elles existent depuis longtemps et présentent une résolution spatiale appropriée. Les techniques de détection des déplacements à l'aide de photos aériennes numériques reposent souvent sur la génération d'ortho-photos de haute précision, utilisant des points de contrôle GPS de haute précision, pour des images de différentes périodes. Une procédure détaillée est donnée dans Casson et al., 2003 avec un exemple multi-temporel du glissement de terrain de "La Clapière" en France. Hervas et al., 2003, ainsi que Van Ouesten et Lulie, 2003 ont tenté de manière similaire le glissement de terrain de "Tessina" en Italie. Powers et al., 1996 ont mis au point une méthode numérique permettant de comparer visuellement deux séries de photographies aériennes multitemporelles de la partie active du flux terrestre de "Slumgullion" dans le Colorado, afin de déterminer les vecteurs de déplacement horizontal à partir des mouvements d'objets identifiables visuellement, tels que des arbres et de gros rochers. Baum et al. (1998), décrivent le résultat des gradients de déplacement obtenus par le travail photo-grammétrique de photographies aériennes multi-temporelles à Honolulu, Hawaii. Maas et Kersten (1997), présentent deux études pratiques sur l'utilisation par hélicoptère d'une caméra vidéo fixe numérique haute résolution pour l'aéro-triangulation numérique et la génération automatique de modèles altimétriques numériques et d'ortho-photos ; les régions testées étaient un village alpin et une zone de glissements de terrain en Suisse.

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

Les tableaux IV.2.a et b, présente un résumé des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées pour chaque type d'application dans la littérature scientifique publiée ces 10 dernières années.

Tableau IV.2. a : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application. (Monique Moine, 2008 ; adapté)

Type d'application	Technique de télédétection	Site d'étude	Support image	Méthode de traitement	Article
Localisation et inventaire	Optique	Mouvements de terrain de la région de Taïwan	Images satellites Quickbird, MNT, données vecteurs (routes, rivières)	Réseau de neurones (automatique)	Chang et Liu, 2004
		Unités géomorphologiques et mouvements de terrain, région de Montafon, Autriche	MNT, photos aériennes (vraies couleurs et infrarouges), images satellites Ikonos et Landsat, cartes topographique et géomorphologiques, données SIG (vecteurs)	Création d'un algorithme de détection automatique	Molenaar, 2005
		Unités physiographiques et cônes de déjection, Nevada, USA	Image satellite ASTER, MNT	Analyse d'image 'orientée objet' (semi-automatique)	Argialas et Tzotsos, 2006
	Radar	Mouvements de terrain de la région de Seattle, Washington, USA	LiDaR, observations de terrain	Cartographie manuelle à partir d'un LiDaR	Schultz, 2004
		Unités géomorphologiques, région de Montafon, Autriche	MNT (1 m de résolution), LiDaR, carte géomorphologique, connaissance	Méthode semi-automatique experte	Van Asselen et Seijmonsberg en, 2006
Caractérisation	Radar	Mouvements de terrain de la zone de Higashikubiki, Japon	MNT, carte d'inventaire des mouvements de versant, carte géologique	Analyse de la morphologie des composantes (escarpement, fissures, partie stable)	Iwahashi et al., 2000
		Complexe de glissements de terrain de Coringa, Nouvelle Zélande	LiDaR	Caractérisation de la topographie par analyses statistiques du LiDaR (non automatisé)	McKean et Roering, 2003
Suivi spatial et temporel	GPS	Glissement	coulée de Super	Sauze, Alpesde	Malet et al., 2002
	Optique	Glissement de La Clapière, Mercantour, France	Photos aériennes multitemporelles, MNT	Corrélation d'images	Casson et al., 2003
		Glissement de Tessina, Italie	Imagerie optique	Corrélation automatique d'images	Hervas et al., 2003
		Glissement de Tessina, Italie	Photos aériennes	Photo-interprétation visuelle	Van Ouesten et Getahun, 2003
		Glissement de La Clapière, Mercantour, France	Photos aériennes stéréoscopiques, images satellites Quickbird	Corrélation d'images	Delacourt et al., 2004
		Glissements de terrain de la région de Hong Kong	Images satellites SPOT et Ikonos multi-temporelles	Corrélation d'images	Nichol et Wong, 2004
	Radar	Glissement de Tessina, Italie	Linear SAR (LISA)	Mesure du déplacement des pixels	Tarchi et al., 2002
		Glissement-coulée de La Valette, Alpes-deHaute-Provence, France	Interférométrie SAR (satellites ERS-1, ERS-2)	Traitement d'interférogrammes différentiels	Squarzoni et al., 2003
		Glissement de La Clapière, Mercantour, France	MNTs multi- temporels	Soustraction de MNTs	Casson et al., 2005
		Glissements de terrain du bassin de la rivière Arno, Italie	Interférométrie SAR, photos aériennes, images satellites, carte topographique, MNT	Technique des points de repère permanents (Permanent Scatterers processing)	Farina et al., 2006

Tableau IV.2. b : Tableau récapitulatif des techniques de télédétection et des méthodes de traitement recensées dans la littérature en fonction des types d'application, au Maroc.

Type d'application	Technique de télédétection	Site d'étude	Support image	Méthode de traitement	Article
Localisation et inventaire	Optique Et Radar	Péninsule tangéroise	Images satellites ASTER, MNT, données vecteurs (routes, rivières) RADARSAT, observations de terrain Carte géomorphologique, connaissance	Réseau de neurones (automatique) Analyse d'image Cartographie (semi-automatique) Méthode semi-automatique experte	F.Sossi Alaoui et L.Aitbrahim. 2004
	Radar	Prérif Central	MNT, données vecteurs (routes, rivières) observations de terrain Carte géomorphologique, connaissance	Cartographie manuelle Méthode semi-automatiqueet experte	H.Tabyaoui & al,2017
Caractérisation	Radar	Mouvements de terraincoulée d'Ametrass, Chefchaouen, Maroc.	MNT, carte d'inventaire des mouvements de versant, carte géologique LiDaR	Analyse de la morphologie des composantes (escarpement, fissures, partie stable) analyses statistiques du LiDaR (non automatisé)	M.Manssour, L.Aitbrahim 1998
Suivi spatial et temporel	Optique Radar	Coulée de débris d'Ametrass,	Photos aériennes multitemporelles, MNT Imagerie optique Images satellites SPOT et LandsatTM carte topographique, LiDaR	Corrélation automatique d'images Photo-interprétation visuelle Mesure du déplacement des pixels	M.MAstere et L.Aitbrahim, 2011
	Optique	Rif Central	Photos aériennes multitemporelles, MNT Imagerie optique, google earth image Images satellites SPOT	Corrélation automatique d'images Photo-interprétation visuelle	A. EL-Fengour, 2016

La télédétection hyperspectrale est l'un des domaines d'observation de la terre qui est en évolutionrapide et continue. Cependant peu de travaux ont été menés pour explorer les possibilités des capteurs disponibles pour la cartographie des mouvements de terrain. La télédétection hyperspectrale, ou spectroscopie d'imagerie, consiste à acquérir des images dans de nombreuses bandes spectrales (>100) étroites et contiguës, à partir desquelles un spectre continu est obtenu pour chaque pixel, au lieu d'une information large dans quelques bandes spectrales étendues. Les images hyperspectrales permettent une identification spectrale détaillée des minéraux, des roches, des sols et des types de végétation (Curran, 2001) à la surface. Les spectres de systèmes aéroportés tels que le spectromètre d'imagerie infrarouge visible aéroporté (AVIRIS) et l'outil de cartographie hyperspectral (HyMap) ont été utilisés par Chabrillat et al, 2002, pour cartographier avec succès des types de sol et des argiles gonflantes. Sauf que les données hyperspectrales aéroportées sont

disponibles pour des régions limitées du monde. Des spectromètres d'imagerie spatiaux sont disponibles, tels que l'ASTER et le MODIS à bord de l'EOS-AM1 et le MERIS sur ENVISAT. La résolution spatiale de ceux-ci est encore trop générale pour être utile pour la détection des glissements de terrain, à l'exception d'ASTER, bien qu'elle puisse être utilisée pour la cartographie de type de sol (van der Meer et al., 1999). ASTER possède trois bandes spectrales dans le proche infrarouge visible (VNIR), six bandes dans l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) et cinq bandes dans l'infrarouge thermique (TIR), avec des résolutions au sol respectives de 15, 30 et 90 mètres. Cette combinaison d'une large couverture spectrale et d'une résolution spatiale élevée permet à ASTER de discriminer une grande variété de matériaux de surface, de part ces qualités, elle est jugée idéal pour les études géologiques (C.J. Van Ouesten, 2004).

4.3. Les échelles adoptées pour chaque type d'inventaire :

Différents types d'inventaires peuvent être distingués sur la base del'échelle de travail et/ou du type de cartographie (Guzzetti, 2006 ; Fressard, 2013) :

- les inventaires synoptiques à petite échelle (<1/200.000ème) sont réalisés àpartir d'archives historiques ou bibliographiques, de données d'incidents, derapports techniques, etc. (Guzzetti et al., 1994 ; Dominguez Cuesta et al., 1999; Mirgon, 2002 ; Couëffé et al., 2005 ; Günther et al., 2011 ; Mirgon, 2012) ;
- les inventaires à moyenne échelle (du 1/200.000ème au 1/25.000ème) sont généralement réalisés à partir de l'interprétation systématique d'images aériennes verticales ou d'images satellite haute résolution (à des échelles généralement comprises entre le 1/60.000èmeet le 1/10.000ème), couplée avec quelques retours terrain ponctuels (Antoine et al., 1995 ; Duman et al., 2005) ;
- les inventaires à grande échelle (>1/25.000ème) sont effectués sur dessurfaces limitées (quelques centaines de kilomètres carrés au maximum), en couplant l'analyse systématique d'images aériennes à des investigations géomorphologiques de terrain (Wieczorek, 1984 ; Guzzetti et al., 2000 ; Reichenbach et al., 2004 ; Thiery, 2007 ; Galli et al., 2008).De larges variations dans la précision et l'exhaustivité de l'information existent entreles différents types d'inventaires. Par exemple, il peut être difficile, dans le cas de laphoto-interprétation, de distinguer avec précision les limites de larges glissements profonds, anciens, notamment du fait de l'estompage des formes avec le temps. Le couvert végétal (notamment le couvert forestier dense) peut constituer une sérieuse limite dans l'observation des formes par photo-interprétation (Brardinoni et al., 2003 ;van den Eeckhaut et al., 2006 ; van den Eeckhaut et al., 2011). La comparaison avec des inventaires réalisés par des investigations de terrain peut ainsi, dans certains cas, montrer de sérieuses différences en termes de précision et de quantité de phénomènes identifiés (Brardinoni et al., 2003). L'expérience du (des) géomorphologue(s) en charge de l'inventaire peut également avoir une influence importante sur la qualité, l'exhaustivité et les erreurs. Les inventaires de mouvements de versant restent ainsi des procédures cartographiques hautement subjectives (Ardizzone et al., 2002 ; Zêzere et al., 2009).

5. Inventaires des glissements de terrain au niveau de la zone d'étude :

La méthode d'inventaire des mouvements 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 témoignant de la présence des glissements de terrain. Cela nécessite une connaissance experte des caractéristiques spécifiques des mouvements de terrain et beaucoup de temps ainsi que des financements.

5.1. Les techniques utilisées pour la cartographie des instabilités de terrain dans la province de Larache:

Compte tenu de la complexité des phénomènes d'instabilité au niveau de la région, nous avons opté pour la mise en placed'une démarche méthodologique pluridisciplinaire associant géomorphologie, géologie, hydrogéologie et géotechnique. Cette démarche se compose d'une phase d'analyse del'instabilité suivie d'une phase de classificationet de cartographie, puis une étude de cas.Pour cela, nous avons effectué plusieurs visites du terrain, consulté la littérature antérieure (El Gharbaoui, A., 1980 ; Sossey Alaoui, F., 2005), des images satellitaires, desdonnées disponibles au Laboratoire public d'essais et d'études (LPEE) et à la Direction provinciale de l'équipement et des transports de Larache (DPLL). Après avoir rassemblé et analysé les donnés, nous avons discuté les facteurs qui peuvent affecter la qualité d'un inventaire de mouvements de terrain. La carte d'inventaire des instabilités de terrain que nous avons élaboré, a été comparée avec d'autres cartes, ensuite nous avons procédé à une description de quelques cas des mouvements de versants au niveau de la région d'étude.

Plusieurs méthodes ont été largement décrites dans des littératures antérieurs (Ferssad, 2013, Theiry, 2007 ; Mastere, 2011). Nous avons utilisé ces méthodes en suivant les processus et les outils adoptés par ces auteurs. Cependant, l'efficacité et la précision de la cartographie des éléments de surface, en particulier les cicatrices de glissements de terrain, reposent sur les compétences géomorphologiques (Guzzetti, F. et al., 2012) et sur la connaissance du terrain (Zêzere, JL et al., 2009), et aussi sur une bonne combinaison entre la connaissance du terrain et la métrise des outils SIG.

Face aux objectifs de l'étude, deux inventaires des mouvements de versant ontété réalisés : **(1)** un inventaire couvrant l'intégralité du territoire de la zone d'étude (2690 km²), réalisé à partir des données disponibles, de l'interprétationsystématique des images aériennes récentes et de campagnes devalidation terrain. L'inventaire est publié à l'échelle du 1/100.000ème ; **(2)** un inventaire couvrant trois sous-secteurs d'étude (respectivement les cartes topographiques de Larache, Ksar El Kebir et EL Quola), réalisé à partir des données du premier inventaire, couplé avec unedémarche de terrain systématique àl'échelle du 1/50.000ème.Pour l'étude de cas particulier, nous avons aussi élaboré une cartographie locale, morpho-dynamique à l'échelle 1/10000ème, pour le glissement de Taria qui a connu plusieurs réactivations ces dernières années.

5.2. Etude bibliographique et analyse des documents existants :

Pour réussir un inventaire des instabilités des versants récentes et anciennes, une étude bibliographiqueest nécessaire ; ceci pour une analyse globale des mouvements de terrain dans la région, l'élaboration d'une banque de données sur leur historique et la classification des différents types de mouvements de terrain déjà recensé dans notre secteur d'étude ; sauf que les références sont trop rares au niveau de la région d'étude. D'autres travaux dans des secteurs voisins au sein de la chaîne rifaine ont été consultés (Maurer, 1968 ; Fares, 1994 ; Margaa, 1994 ; Azzouz et al., 2002 ; El Khatabi et Carlier., 2004 ; El Kharim, 2002 ; Mansour, 1998 ; Mansour et Ait Brahim, 2005 ; Sossey Alaoui, 2005,M.Mastere,2011; …).

Au niveau régional, plusieurs renseignements ont été obtenus à partir des travaux existants, notamment ceux de Milliés-Lacroix, 1968 ; Maurer, 1968 ; El Gharbaoui, 1980 ; Pascon et Vander Wusten, 1983 ; Mansour, 1998 ; F.S.Alaoui, 2005, Abdelouafi, A., 2007 ; M.Mastere, 2011…).

Les **cartes topographiques** sont parmi les documents qui ont servis comme base de notre étude, une couverture de cartes topographique de différentes échelles a été consultée simultanément (1/100000ème, 1/50 000ème et 1/25 000éme). Ces dernières peuvent montrer plusieurs indices indiquant une dynamique des versants, tel que les replats et les corniches "décrochés" qui sont de bons indicateurs de l'instabilité (M. Lacroix, 1968 ; M. Mastere, 2011). Dans une telle région où les pentes sont très importantes, les replats sont souvent structuraux, mais peuvent éventuellement être liés à des glissements ou à des coulées. Quant aux corniches, elles caractérisent les grands bancs grèseux. Elles sont souvent dues à des arrachements marqués

sur des escarpements importants ; ces corniches sont également affectées par des éboulements et des écroulements. (Figure IV.3. B)

La **carte géomorphologique** de la péninsule de Tanger a été également consultée puisqu'elle couvre presque la totalité du secteur étudié et illustre une activité morphologique très intense. Les schémas géomorphologiques réalisés par El Gharbaoui en 1980 (FigureIV.3. D) décrivent les principaux secteurs de mouvements de terrain, à travers une série d'interprétations géomorphologiques. Cette carte présente une grande densité d'indices liés à une dynamique plutôt superficielle. On peut y distinguer différents phénomènes, ainsi que des signes morphologiques (niches d'arrachement) sans attribution de fonctionnement actuel ou fossile. En 2004 et 2005, les cartes d'inventaire des instabilités de terrain effectuées par L.Aitbrahim et F.S.Alaoui rendent compte avec plus de précision de la dynamique qui touche la péninsule tangéroise dans sa totalité. Ces cartes ont servi pour comparer les résultats de cartographie des instabilités de terrain élaboré par méthode semi automatique (base pour l'inventaire des MT), en utilisant les images satellitaires (FigureIV.3. C).

Une **carte géologique**, moins précise, donne également un aperçu de la répartition générale des instabilités dans le Rif ; c'est la carte géologique du rif à l'échelle de 1/500 000ème, Suter, 1980 (FigureIV.3. F), la carte géologique de Larache au 1/50 000ème, où nous avons relevé un certain nombre d'informations, notamment sur la lithologie et la structure. En particulier, des formations superficielles de type turbiditique, éboulis récents et anciens, et des zones décrites "en reptation". Ces phénomènes sont de bons indicateurs qui renseignent sur l'instabilité et la dynamique anormale du versant, car dans la plupart des cas, ils coïncident avec une activité hydrologique importante.

Suite au manque de cartes géologiques, à grande échelle, dans le secteur d'étude, nous étions obligés de se référer aux **images satellitaires** et des **visites sur le terrain**. L'interprétation de ces documents (cartes topographiques, géologiques et géomorphologiques) est le plus souvent accompagné par une quantité d'erreurs, surtout s'ils sont suffisamment anciens (50 ans et plus dans notre cas).

Le développement des technologies de l'informatique a permis la mise en place de la cartographie numérique et d'un nouveau moyen de représenter le relief de la Terre : le MNT (Modèle Numérique de Terrain). Cette information spatialisée particulière et ses applications permettent via des procédures automatiques, d'analyser et représenter des phénomènes liés à la surface topographique ; c'est ainsi qu'il est utilisé depuis les années cinquante dans le domaine des géosciences (Miller et Laflamme, 1958). Dans notre travail, c'est l'un des documents les plus utiles pour l'analyse des formes terrestres liées aux instabilités de terrain (FigureIV.3.A)

Ces documents apportent donc une information de base non négligeable à la répartition spatiale de l'aléa gravitaire dans le secteur d'étude, mais leur intérêt reste limité dans le cadre d'une analyse "réglementaire" du risque au niveau des réseaux routiers au Maroc.

Pour cette recherche, nous avons donc formulé la problématique suivante : *"est-il possible de mettre en place une méthode semi-automatique d'inventaire et de caractérisation des glissements de terrain à partir d'images aériennes et/ou satellites en utilisant les ressources disponibles ?"*

L'objectif principale de ce chapitre est donc la mise en place et le test d'une méthodologie semi-automatique permettantd'inventorier et de caractériser certains types de glissements de terrain à partir d'une ou de plusieurs données image (aérienne ou satellite). Les objectifs principaux sont :

(1) d'inventorier et de caractériser les indices observables sur des images satellites qui permettent d'identifier et de caractériser les glissements de terrain,

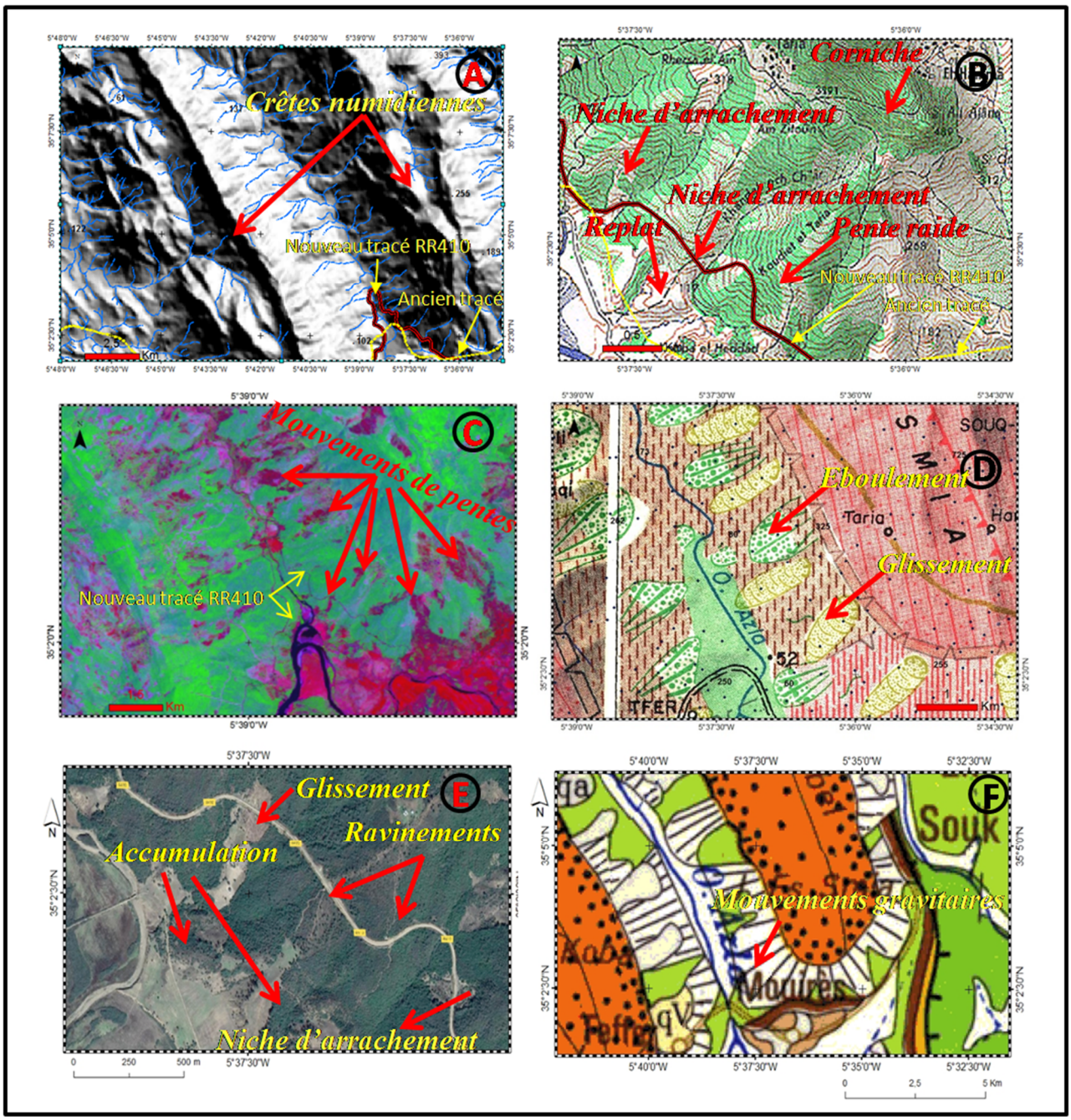
(2) de définir une base de règles pour l'identification automatique des glissements de terrain.

(3) la méthode peut être appliquée à des échelles spatiales différentes :

- à une échelle régionale afin d'identifier les glissements de terrain de taille moyenne et spatialement très fréquents,
- à une échelle locale, qui focalise sur de grands glissements de terrain,

Le site d'application choisi pour la mise en place et le test de la méthode est la région de Souk El Quola. Le choix de cette zone vient du grand nombre et de la variété des glissements qui y sont présents, malgré la rareté des données disponibles.

La démarche proposée pour qualifier l'activité repose sur la description et l'analyse de trois indicateurs (Y.Thiery. 2007) : la morphologie, l'état de la végétation, la perturbation du réseau hydrographique. D'autres indices ont été observés, comme les zones humides ou l'état des aménagements.



FigureIV.3: Données utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain : (A) MNT (ASTER GDEM) après estompage par l'application d'un filtre convolutif et ombrage directionnel. (B) Extrait de la carte topographique 1/50 000. (C) Extraitdel'imageLandsat 7 ETM+, après estompage par l'application d'un filtre spectral "ACP".(D): Extrait de la carte géologique 1/500 000 (Suter, 1980). (E) Extrait d'image satellite THR Spot (Google Earth Pro). (F) Extrait de la carte géomorphologique (d'après El Gharbaoui,

1980). Des extrais de la même zone "Taria"sur la route régionale RR410 qui relis La ville de Ksar El Kebir à la ville de Chaouen (Cette région est l'objet d'une étude de cas).

5.3. Apport de la télédétection pour la cartographie des instabilités de terrain:

Au cours des dernières décennies, l'utilisation des données satellitaires est devenue une technique usuelle à l'évaluation et la cartographie des risques de glissements de terrain. Il y a peu de temps que la télédétection est utilisée pour l'identification et la cartographie des ruptures de pente à petite échelle. Cependant, il existe maintenant des techniques potentielles pour l'application du multispectral et du panchromatique, avec une résolution spatiale jusqu'à 1 mètre (Singhroy et al., 2000). Les données LANDSAT sont restées assez populaire pour la cartographie des zones de glissements de terrain, en particulier dans les situations où la zone de glissement de terrain est dépourvu de végétation, et qui peut être différencié spectralement du reste de la région (Honda et al., 2002). Également, la haute résolution des images, telles que SPOT (Yamaguschi et al., 2003) et IRS-1C (Nagarajan et al., 1998) offre la possibilité de détecter les changements morphologiques des versants au cours du temps et de cartographier les glissements de terrain. Là n'y a-t-il pas tant d'auteurs rapportant l'utilisation des images de très haute résolution, telles que IKONOS ou Quickbird dans l'inventaire des glissements de terrain et l'évaluation des dangers (De la Ville et al., 2002 ; Hervas et al., 2003).

D'autres méthodes sont employées pour l'inventaire des instabilités de terrain, le traitement et l'analyse des données, qui sont basées sur l'analyse des images Google Earth (FigureIV.3.E). 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 ; Corminas et al., 2014). Il faut cependant reconnaitre 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). Pour la zone d'étude, les images sont de sources différentes (p. ex., Landsat, SPOT) impliquant des résolutions variables et des qualités différentes en fonction de la couverture nuageuse et de la hauteur du soleil au moment de leur acquisition. 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 spécifiques.

A cause de l'étendue de la surface du secteur d'étude et des difficultés pour atteindre certaines zones ou la topographie trop accidenté, les visites du terrain restent insuffisantes. Pour cela les données de l'imagerie spatiale et aéroportée ont été consultées tout aulong de notre travail. Elles ont constitué le support principal pour la cartographie et l'inventaire des mouvements de versants au niveau de la province de Larache. Deux types d'images satellitaires ont été utilisées : la première Landsat7 ETM+ acquise le 06 Juin 2006 (FigureIV.7), issu du site (https://earthexplorer.usgs.gov/), de 30 m de résolution en modemulti-spectral,et la deuxième qui est la plus importante par sa haute résolution spatiale, de l'ordre de 2m, présenté par les images provenant de la base de données du programme Google Earth Professionnel (FigureV.3.E); ainsi qu'un modèle numérique de terrain MNT (ASTER) de 30 m de résolution. Celles-ci permettent de repérer les zones d'instabilités à l'avance et ainsi de cibler les sites à prospecter. De ce fait, plusieurs cas de versants instables ont été repérés sur des images satellitaires, comme elles ont confirmé d'autres.

Dans ce paragraphe, nous discuterons l'apport de la télédétection dans la cartographie des instabilités de terrainau niveau de notre zone de travail, Plusieurs sources de données ont été utilisées pour ce travail, dont la liste est indiquée dans le tableauIV.3.

Tableau IV. 3: Données sources utilisées.

Type de Donnée	Nom	Résolution/ Echelle	Date
Images	Image SPOT 5 (Google Earth)	2m	2017
	Google Imagerie © 2018 CNES, Airbus Digital Globe	2.5m	2018
	MNT LiDaR	30m	2014
	Landsat ETM+	30m	2006
SIG	Inventaire "expert" des mouvements de terrain du (contours des mouvements sous environnement SIG)	1/100 000 1/50 000 1/10 000	2015
	Base de données des caractéristiques Morpho-métriques des mouvements de terrain et de leurs zones d'ablation et d'accumulation pour le versant Taria	1/10 000	2016
	MNT issu de la digitalisation des courbes de niveaux	5m	2013

5.3.1. L'image LANDSAT 7 ETM+:

Le programme américain de télédétection spatiale (NASA et USGS) est le premier programme civil d'observation de la terre par satellite. Il a commencé avec le lancement du premier LANDSAT en 1972. L'objectif principal de la mission Landsat 7 est de fournir en temps voulu des images de haute qualité, dans le visible, l'infrarouge et le thermique, sur l'ensemble du globe terrestre, et aussi d'actualiser en permanence les archives Landsat existantes. Les données récentes acquises doivent être suffisamment cohérentes avec les données archivées en termes de géométrie d'acquisition, d'étalonnage, de couverture et de caractéristiques spectrales pour permettre une comparaison entre la détection et la caractérisation des changements globaux et régionaux.

Le projet Landsat continue également de mettre à disposition gratuitement toutes les données Landsat pour les utilisations civiles. À partir de 2008, toutes les archives Landsat sont disponibles au téléchargement gratuitement. Ce programme a donc permis d'accumuler des millions de données formant une librairie exceptionnelle des conditions sur terre depuis presque 40 ans. Aujourd'hui, l'imagerie spatiale s'est largement diffusée et vulgarisée (la navigation sur Internet possible sur une couverture d'images spatiales continue : http://earth.google.com/ ou https://earthexplorer.usgs.gov/.

Le capteur ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) est un scanner à haute résolution possédant 7 bandes spectrales plus une large bande panchromatique à haute résolution. Il couvre une zone de 185 km sur 185 km. Le tableau .IV.4, illustre les caractéristiques des bandes, et leurs utilisations.

Tableau IV. 4: Caractéristiques du capteur ETM+.

Bandes de fréquence de l'instrument ETM+	Spatialelongueur d'onde	Bandes spectrales	Résolution	Utilisation
Bande 1	0,45-0,5 µm	Bleu (visible)	30m	Différenciation sol/ végétation, zones côtières.
Bande 2	0,52-0,6 µm	Vert (visible)	30m	Végétation
Bande 3	0,63-0,69 µm	Rouge (visible)	30m	Différentiation des espèces végétales
Bande 4	0,75-0,9 µm	IR proche	30m	Biomasse
Bande 5	1,5-1,7 µm	IR moyen	30m	Différentiation neige/nuage
Bande 6	10,4-12,5 µm	Thermique	60m	Thermique
Bande 7	2,08-2,35 µm	IR moyen	30m	Lithologie
Bande 8	520-900nm	Panchromatique (vert-rouge-IR)	15m	

Les images satellitales Landsat 7 ETM+ du Rif septentrional ont été téléchargées sur le site internet: https://earthexplorer.usgs.gov/. Leurs caractéristiques sont les suivantes :
Nom : *LE07_L1TP_201035_20060620_20170108_01_T1* du 20 juin 2006 ; Type de fichier : GEOTIFF ; Capteur: ETM+ ; Projection : UTM, zone 30 Nord ; Ellipsoïde : WGS-84 ; Résolution : 30 mètres ; Description : GEO-TIFF_Orthorectifiée. Nous avons utilisé au total 4 images (bandes 1, 2, 3, 4, 5, 6-1, 6-2, 7 et 8). La bande 8 est la bande panchromatique de résolution 15 mètres au sol. La localisation de la zone couverte par nos images est indiquée sur la FigureIV.4.

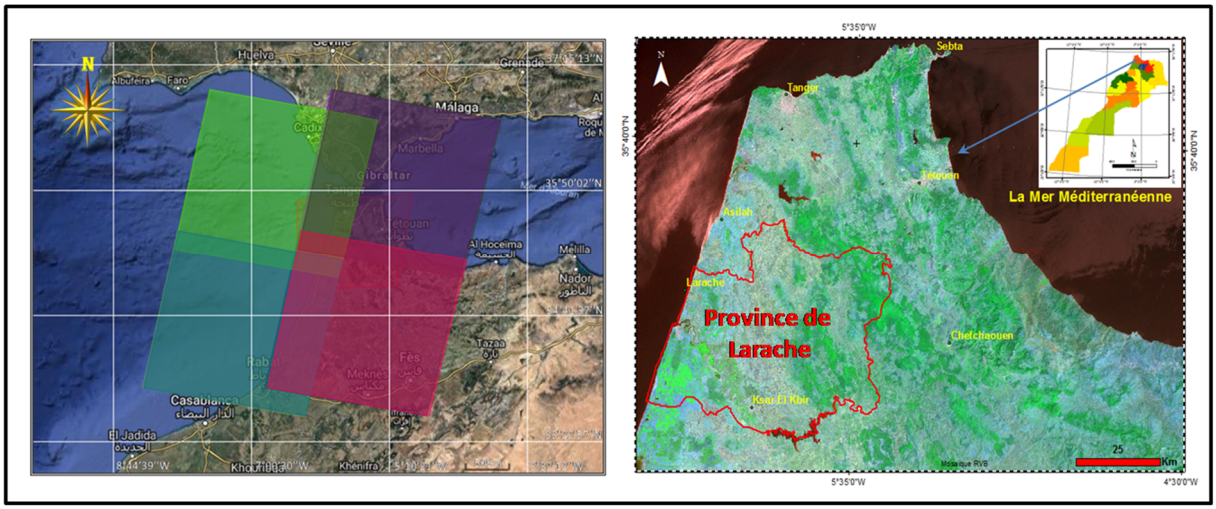


Figure IV.4: Une mosaïque de quatre images Landsat ETM+ utilisées.

5.3.1.1. Le choix des dates des images :

Le choix des images Landsat a été basé principalement sur leurs disponibilités dans les sites web de la NASA. Ainsi les capteurs satellitaires sont-ils exposés habituellement aux effets atmosphériques (nuages, poussière et autres) ce qui rend la vision et l'interprétation de l'image parfois pénible, d'où le choixdu mois de juin, vu que l'atmosphère reste relativement claire, ce qui permet au capteur de prendre une image propre qui ne nécessite pas trop de correction atmosphérique pour la visualiser.

5.3.1.2. Les traitements de correction de l'image :

Pour une bonne visualisation et interprétation de l'image, trois types de corrections sont effectuées :

- *Correction atmosphérique* : afin d'éliminer l'action de l'atmosphère et isoler les signatures Spectrales des objets terrestres.
- *Correction radiométrique* : afin d'éliminer le bruit des capteurs et corriger les comptes numériques des scènes.
- *Correction géométrique* (redressement géométrique) : afin d'éliminer les distorsions lors des enregistrements par le satellite (Altitude, rotation, courbure…). La superposition de deux images nécessite une correction géométrique.

Les opérations de prétraitement, parfois appelées restauration et rectification d'image, sont conçues pour corriger les distorsions géométriques et radiométriques des plates-formes et capteurs spécifiques. Les corrections radiométriques peuvent être nécessaires à cause des variations dans l'illumination et dans la géométrie de visée d'une scène, des conditions atmosphériques, du bruit et de la réponse du capteur. Chacun de ces facteurs variera selon le capteur et la plate-forme utilisés, et selon les conditions d'acquisition des données. Aussi peut-il être souhaitable de convertir et de calibrer les données avec une unité de rayonnement ou réflexion connue (absolue) pour faciliter la comparaison entre les données.

5.3.1.3. Rehaussement des images :

On applique le rehaussement des images afin de faciliter l'interprétation visuelle et la compréhension des images. Les images numériques ont l'avantage de nous permettre de manipuler assez facilement les valeurs enregistrées pour chaque pixel. Même s'il est possible d'effectuer les corrections radiométriques pour les effets de l'illumination solaire, les conditions atmosphériques et les caractéristiques des instruments utilisés avant de distribuer les images aux usagers, il s'avère que, probablement, l'image ne soit pas idéale pour l'interprétation visuelle. Les systèmes de télédétection, et spécialement ceux qui utilisent une plate-forme spatiale, doivent être conçus de façon à pouvoir traiter les différents niveaux d'énergie propres aux cibles et à leur environnement, susceptibles d'être rencontrès dans une utilisation normale. Aussi, la variation importante dans la réponse spectrale des différents types de cibles (ex. : forêt, désert, neige, eau, etc.) rend impossible l'application d'une correction radiométrique générale capable d'optimiser le contraste et les niveaux d'intensité dans chacune des conditions. Il faut donc faire un ajustement différent des tons en fonction de l'utilisation et de l'état de chacune des images.

Dans une image brute, les informations utiles sont souvent contenues dans un ensemble restreint de valeurs numériques parmi les valeurs possibles (256 dans le cas de données à 8 bits). Le rehaussement des contrastes se fait en changeant les valeurs initiales de façon à utiliser toutes les valeurs possibles, ce qui permet d'augmenter le contraste entre les cibles et leur environnement. Pour bien comprendre comment fonctionne ce type de rehaussement, il faut premièrement comprendre le concept de l'histogramme d'une image.

Un histogramme est une représentation graphique des valeurs numériques d'intensité qui composent une image. Ces valeurs (de 0 à 255 pour des données à 8 bits) apparaissent le long de l'axe des X du graphique. La fréquence d'occurrence de chacune de ces valeurs est présentée le long de l'axe des Y.

En manipulant la distribution des niveaux d'intensité (appelés aussi les tons de gris) dont l'histogramme est la représentation graphique sur l'ensemble des valeurs admissibles pour une image, il est possible de produire différents types de rehaussement. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de rehausser le contraste et les détails d'une image.

La méthode la plus simple est un rehaussement linéaire du contraste. Afin d'appliquer cette méthode, on identifie les limites supérieures et inférieures d'intensité représentées sur l'histogramme (les valeurs minimales et maximales), et à l'aide d'une transformation linéaire, on étire ces valeurs sur l'ensemble des valeurs disponibles. Ce procédé rehausse le contraste dans l'image en pâlissant davantage les régions claires de l'image et en assombrissant davantage les régions plus foncées. Ceci facilite l'interprétation visuelle.

Un étirement uniforme des valeurs initiales sur l'ensemble des valeurs disponibles n'est pas toujours approprié, particulièrement lorsque la distribution initiale n'est pas uniforme. Dans certains cas, un étirement pondéré de l'histogramme peut donner de meilleurs résultats. Cette méthode assigne un intervalle de valeurs plus grand dans les portions de l'histogramme pour lesquelles les valeurs d'intensité ont une fréquence plus élevée. De cette façon, les détails de ces régions seront mieux rehaussés que les détails des régions pour lesquelles la fréquence des valeurs d'intensité de l'histogramme est plus faible. Dans d'autres cas, il peut être préférable de rehausser le contraste dans une portion spécifique de l'histogramme.

Afin d'améliorer la visualisation, on peut posséder à des rehaussements spectraux en utilisant des "filtres spectraux", ce qui mène à transformer les images en manipulant plusieurs bandes de données. La transformation d'images génère une "nouvelle" image en combinant les différentes sources d'information de manière à rehausser certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données qui sont moins évidentes dans l'image originale.

Par exemple, l'analyse des composantes principales peut transformer des données provenant de sept bandes du capteur TM/Landsat (Thematic Mapper) de façon à ce que les trois principales composantes de la transformation contiennent plus de 90% de l'information contenue dans les sept bandes initiales. L'interprétation et l'analyse de ces trois composantes, en les combinant visuellement ou numériquement, est plus simple et plus efficace que l'utilisation des sept bandes initiales. L'analyse des composantes principales ou d'autres transformations complexes peuvent être utilisée comme techniques de rehaussement visuel pour

faciliter l'interprétation ou pour réduire le nombre de bandes qui seront fournies comme données d'entrée à une procédure de classification numérique.

Dans le but d'extraire des instabilités de terrain à partir de l'image Landsat ETM+ de nombreuses techniques de rehaussement et de classification ont été utilisées, celles qui ont donné des résultats satisfaisants sont :

- Natural Color, (FigureIV.5.a)
- Decorrelation Strech, (FigureIV.5.b)
- Principal Compoments (Analyse en composantes principales, ACP), (FigureIV.5.c)

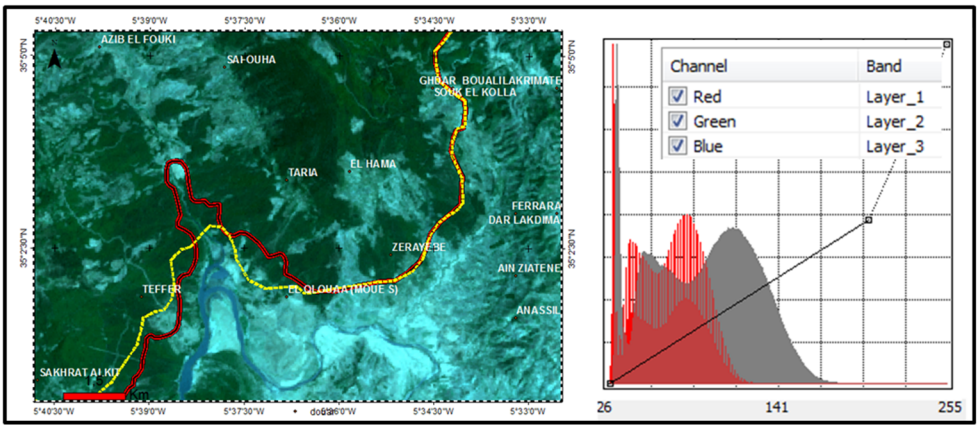


Figure IV.5.a: Composition colorée RVB (Natural color), *(extrais de l'image Landsat ETM+).*

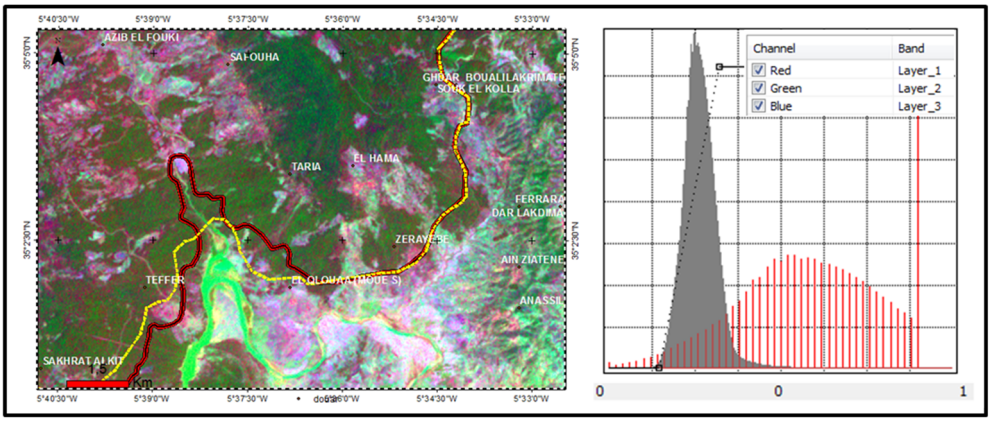
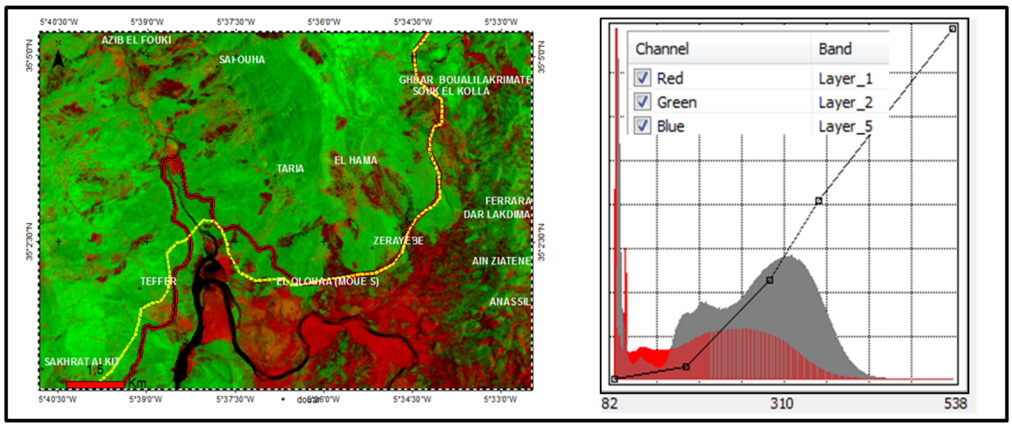


Figure IV.5.b: Composition colorée 123 rehaussée par Decorelation Strech, *(extrais de l'image Landsat ETM+.*



FigureIV.5.c: Composition colorée issu de l'ACP, *extrais de l'image Landsat ETM+.*

D'après l'analyse des résultats issus des différents traitements élaborés, nous constatons que le canal 1 offre des informations précieuses sur les zones qui ont subi une rupture de pente ou une action érosive.
Les compositions colorées, qui ont été adoptées, offrent plusieurs avantages, telles que la préservation de l'espace de stockage informatique et l'amélioration de la qualité de l'information.
La discrimination des glissements est fondée sur la différence de tonalité due à l'exposition de la roche fraîche et des débris. L'exposition de la roche fraîche et débris associés aux glissements de terrain actifs montre des valeurs légèrement plus élevées (compte numérique) ainsi que le rayonnement par rapport aux glissements de terrain anciens et inactifs. C'est la composition colorée issu de l'ACP (CP1, CP2, CP5), qui a donné les meilleurs résultats, du fait que les zones ou le substrat subit des ruptures dus aux mouvements gravitaires, à l'action érosive, ou sapement de berge apparaissent clairement en rouge.

5.3.2. Acquisition de l'information avec Google Earth :

L'utilisation des images Google Earth a permis de détecter plus de 100 glissements de différents types au niveau de la province de Larache, sur une surface de 2574km^2 km².
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).
Les méthodes employées pour la récolte, le traitement et l'analyse des données ont été basées aussi sur l'analyse des images Google Earth (Figures IV.6). Il faut cependant reconnaitre quelques difficultés dues au fait que les images peuvent être de qualité variable et que des décalages peuvent exister au niveau des jointures (Fischer et al., 2012), ce qui implique des résolutions variables et des qualités différentes en fonction de la couverture nuageuse et de la hauteur du soleil au moment de leur acquisition. Au stade actuel, il est difficile d'avoir des informations plus précises sur les résolutions, vu que Google Earth ne publie pas les caractéristiques spécifiques des images (Fisher et al., 2012 ; J.C.Maki Mateso, 2014).
La reconnaissance de différents processus de mouvement gravitaire n'est pas facile 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 (Guzzetti et al., 2012 ; J.C.Maki Mateso, 2014), 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 (Cruden & Varnes, 1996 ; Glade & Crozier, 2005).

5.3.2.1. Les indices des mouvements de terrain recensés sur les images Google Earth :

Les principaux indices de cartographie des instabilités de terrain actifs, repérées sur des images *Google Earth* sont liés à des versants où la pente est comprise entre 10° et 45°, versant à courbure convexo-concave, ou des zones ou le sol est potentiellement exposé (champs non cultivé). Ces indices peuvent aussi indiquer clairement un glissement de terrain (escarpement, bossellement…), on note :

- **La forme géométrique** d'un élément du paysage peut signaler un glissement de terrain (en arc de cercle à l'amont, étalée à l'aval), rapport longueur/largeur et orientation. Les glissements sont typiquement allongés dans le sens de la pente (Mantovani et al. 1996 ; Chang and Liu, 2004 ; M.Moine& al., 2009).
- **L'escarpement principal** (niche d'arrachement), qui représente la zone d'arrachement du matériau déplacé. Pour un glissement de terrain actif, la forme est fraîche (Thiery, 2007) et laisse apparaître le sol/la roche dénudée de la surface de glissement. Cette surface de glissement apparaît lissée et striée (Dikau et al., 1996). Les rebords de l'escarpement sont nets et ouverts (Dikau et al., 1996).

L'escarpement est souvent marqué à l'amont par des fissures de régressions. Des escarpements secondaires peuvent être présents à l'aval de l'escarpement principal, à l'intérieur du matériau déplacé, (Dikau et al., 1996 ; M.Moine& al., 2009).

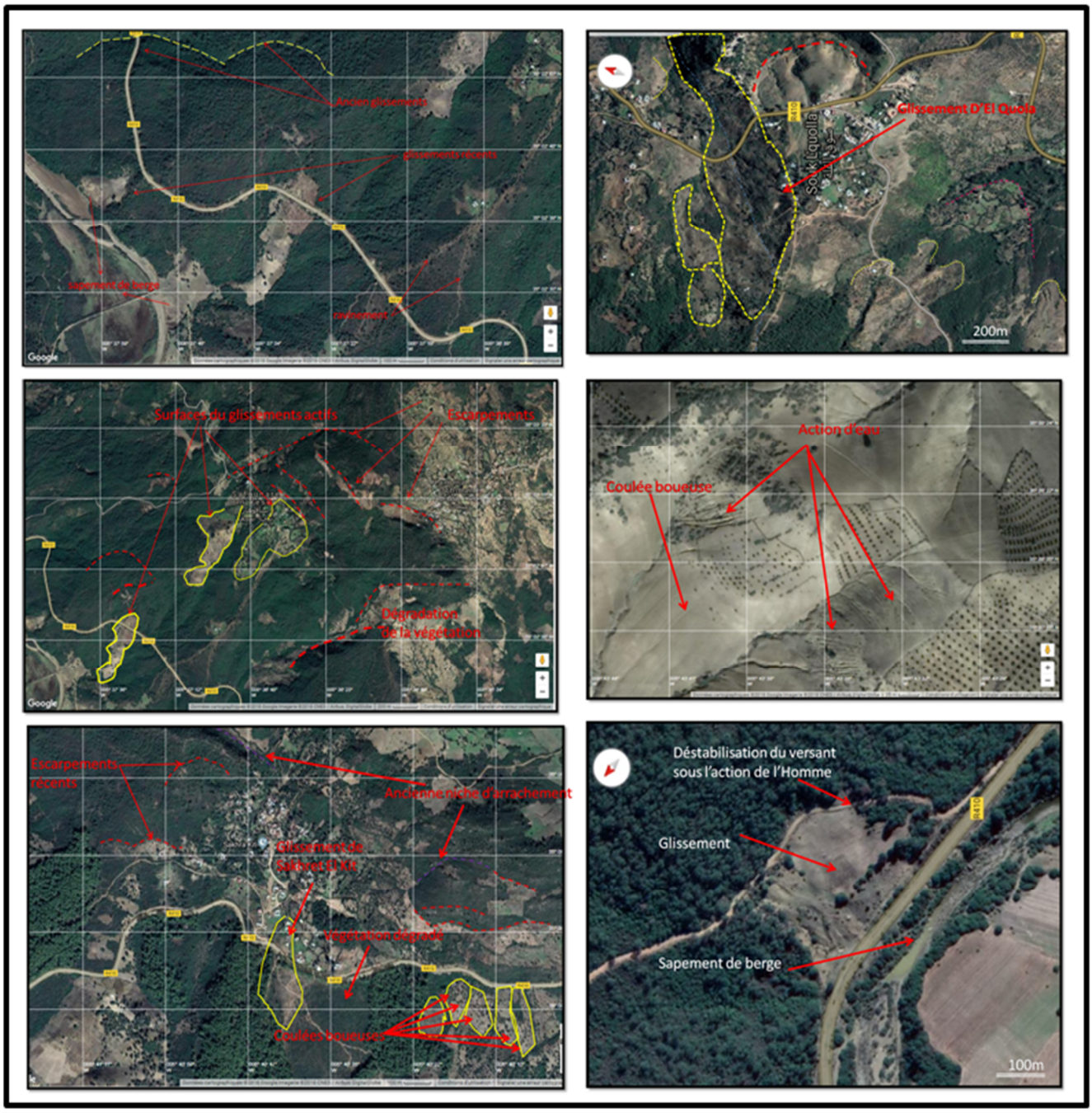
- L'escarpement peut être suivi d'une **contrepente**, surtout dans le cas des glissements de type rotationnel (Thiery, 2007, Dikau et al., 1996 ; M.Moine& al., 2009), ou d'une zone de dépression.
- **La dégradation de la végétation** au niveau des glissements actifs. Du fait de l'activité du glissement de terrain, la végétation y est souvent dégradée et peu dense. On peut y observer des arbres penchés dans tous les sens "forêts ivres", (Thiery, 2007): allongés vers l'amont sur la partie haute du glissement et vers l'aval sur le pied du glissement (Dikau et al., 1996; M.Moine, 2008). La limite de la végétation peut adopter la forme des caractères du glissement (corniches, fissures...) du fait de la modification des conditions (lumière et/ou nutriments) à cet endroit (Molenaar, 2005).
- **Le corps des glissements** de terrain, dont la surface peut être irrégulière (forte rugosité) du fait de la déformation du sol. La surface est aussi marquée par du bossellement, principalement à l'aval, où le matériau s'accumule. La texture du corps du glissement apparaît de ce fait hétérogène.
- **Les fissures** indiquent qu'il y a eu un mouvement/déformation. Elles peuvent être de deux types : **fissures de traction**, localisées surtout dans la partie supérieure du glissement où le matériau, emmené vers l'aval, provoque une force de traction étirant le matériau à l'amont ; ou **fissures de compression** (crevasses fermées) se forment au pied du glissement par accumulation du matériau à l'aval (Thiery, 2007). L'orientation des fissures indique quelle partie du glissement elles occupent (Dikau et al., 1996; M.Moine, 2008). Les fissures longitudinales sont localisées préférentiellement sur les bords du glissement contrairement aux fissures transversales qui marquent la zone d'arrachement et la zone de transition entre la zone d'ablation et la zone d'accumulation (Flageollet, 1988). Des fissures de régression témoignant de la traction infligée par le déplacement de matériau sont observables à l'arrière du glissement (Dikau et al., 1996).
- **La perturbation du réseau de drainage :** Un glissement peut être à l'origine de création de petit ravin et d'une modification du tracé d'un cours d'eau ou d'une route (Molenaar, 2005 ; Thiery, 2007).
- **La présence d'eau :**sources, zones humides (Thiery, 2007) ou de flaques d'eau (Dikau et al., 1996) peut signaler un glissement de terrain, étant donné que les processus liés à l'eau sont des facteurs déclenchant des glissements de terrain (Flageollet, 1999) et l'humidité signale donc les zones à forte susceptibilité de glissements, d'autre part, les dépressions et contre-pentes modelant le corps du glissement favorisent la formation de flaques (M.Moine, 2008).

5.3.2.2. Quelques exemples de mouvements de terrain repérés sur les images Google Earth:

Sur la base de différents critères cités précédemment (forme de la niche d'arrachement, trace de coulée, déplacement superficiel, bourrelet, drainage superficiel, forme générale du glissement, position sur le versant, dimensions, l'aspect de la couverture végétale) nous sommes parvenus à réaliser un inventaire incluant une typologie des processus à l'aide de Google Earth. La Figure IV.6, montre quelques exemples d'indices d'instabilitédes versants qui ont été repérés sur des images Google Earth.

L'état de la végétation et pluparticulièrement la présence de zone sans végétation nous a renseigné sur l'âge relatif de l'instabilité (Sidle et al., 2006). Nous sommes dans une région où la croissance naturelle de la végétation est très rapide. De plus, les parcelles cultivées mises à nu par un mouvement de terrain sont très souvent replantées dans l'année qui suit l'évènement. La présence de zones sans végétation (ou avec une couverture plus clairsemée) dans un glissement témoigne donc d'une activité qui remonte à quelques mois voire à quelques années maximums. C'est un des critères qui nous a permis de différencier les glissements anciens (ou moins récents) des autres glissements plus récents. Selon le type de processus, la couverture végétale est plus ou moins affectée (Cruden et Varnes, 1996). En général, en présence d'un mouvement

profond, c'est-à-dire dont la surface de rupture est plus de 3m de profondeur (Keefer, 1984), la végétation de la masse déplacée peut rester presque intacte au niveau des blocs homogènes ; à cette profondeur, la rupture affecte peu la zone d'enracinement. Par contre, dans le cas d'un glissement de type coulé, une grande partie de la couverture végétale peut disparaitre suite au déplacement.



FigureIV.6: Quelques exemples d'indices d'instabilité des versants repérés sur "Google Earth".

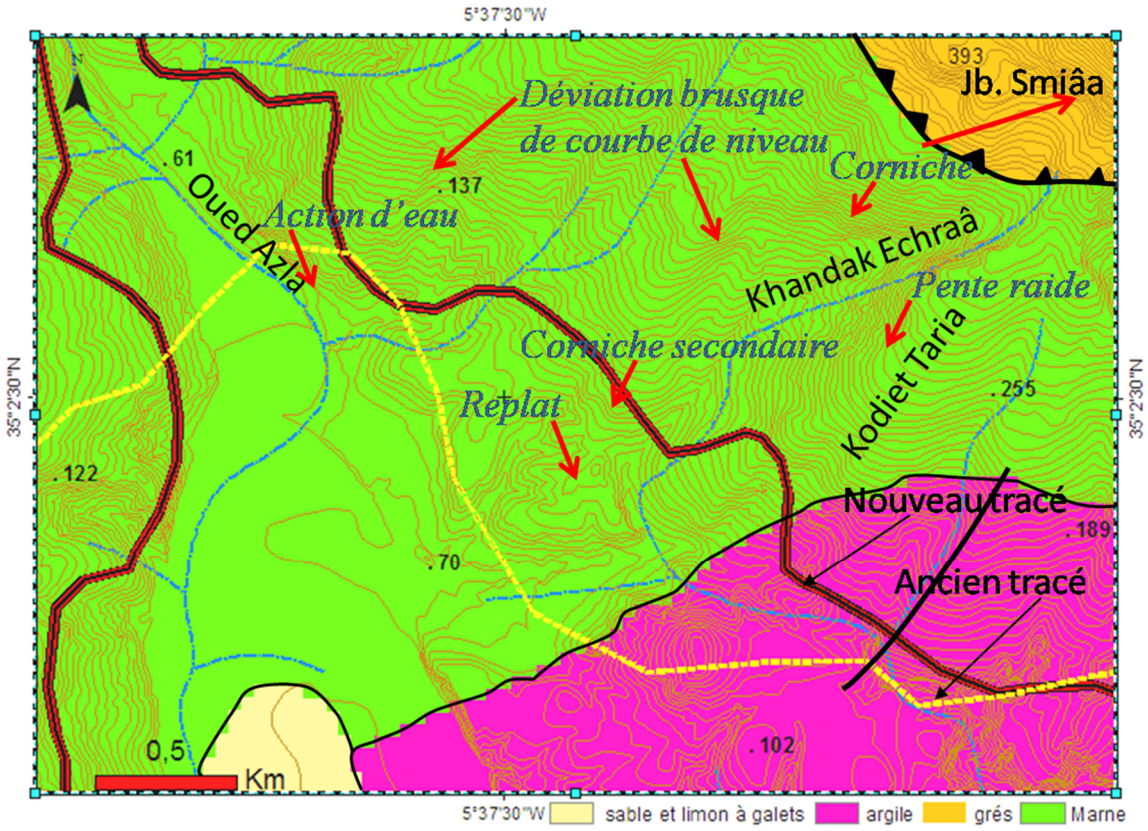
Une cartographie préliminaire des instabilités de terrain a été effectuée à partir de la photo-interprétation d'images gratuites à haute résolution (images récupéré via l'application Great Maps For Windows Forms de Google Earth® au format .pngw, ce qui a permis de conserver les informations de géoréférencement des images). Ces dernières ont été directement chargées dans le module ArcMap® du logiciel ArcGIS® 10.3. Il s'est agi ensuite de digitaliser l'ensemble des glissements de terrain sous forme de polygones vectoriels.

5.4. L'analyse des cartes topographiques :

La cartographie morphologique initiale, d'après le comportement des courbes de niveau sur la carte topographique, est basée sur l'approche de Savigear, 1965. Pourtoute interprétation d'une cartographie morphologique, il est essentiel que tous les changements de pente soient enregistrés. Selon Savigear, 1965 *"chaque forme de surface, dans des limites raisonnables, peut être enregistrée à l'échelle de la carte, doit être représentée, qu'elle soit d'origine naturelle ou humaine. Bien qu'elle ne semble pas significative au moment de l'étude, la présence d'une forme particulière peut conduire à une compréhension du caractère et de l'origine d'un relief, si elle est vue dans le contexte plus large du reste des caractéristiques cartographiées"*. Ceci doit être compléter par une interprétation des types de matériaux, en mettant l'accent sur l'identification des affleurements rocheux, de la saprolite et de l'altération des matériaux superficiels par des processus érosifs (Parry et al., 2010).

Plusieurs indices indiquant une dynamique de versants ont été relevés sur les cartes topographiques. Ces indices ont permis de compléter les informations issues de l'analyse des images satellitaires. Parmi ces indices Figurent :

- les replats et les corniches, sont également de bons indicateurs de l'instabilité. Dans une telle région où les pentes sont assez importantes, les replats peuvent être liés à des glissements ou à des coulées, J. El Khatabi, 2002. Quant aux corniches, elles caractérisent souvent les arrachements au niveau des ensembles grèseux appartenant au numidien (FigureIV.7).
- les conditions hydrologiques (relevées au niveau des cartes à 1/25000, 1/50 000 et à 1/100000), plusieurs indices ont été relevés, il s'agit de l'action de l'eau ou des signes hydrologiques (sources, eau stagnante et réseau hydrographique,…) en relation avec les mouvements de terrain.



FigureIV.7: Quelques exemples d'indices d'instabilité des versants repérés sur la carte topographique.

5.5. Analyse de la carte géomorphologique et géologique :

La carte géomorphologique de la péninsule tangéroise (El Gharbaoui, 1980) illustre une activité morphologique très intense.Par la forte densité d'indices liés à la dynamique superficielle, plusieurs types de mouvements gravitaires sont illustrès sur la carte consulté (glissements, éboulements, coulées boueuses...).
Au niveau de la carte géologique du Rif (Suter, 1980), nous avons relevé un certain nombre d'informations, notamment sur la lithologie, la structure en particulier des formations superficielles et les dépôts de pentede type éboulis récents et anciens ont été repérés. Ces dernières sont un bon indicateur de l'instabilité.

5.6. Résultats de la prospection des sites cartographiés : visites du terrain :

Les observations de terrain ont montré que les mouvements gravitaires dans la région affectent des matériaux marqués par des alternances de grès et des schistes (domaine des flyschs), et des altérnances de marne et des bancs calcaire.Cette disposition donne naissance à des mouvements complexes, quelquefois indissociables et surtout difficilement identifiables. Flotte (1984), les a défini dans toute l'Afrique du Nord (Flageollet, 1989), où les glissements se transforment souvent en coulées mixtes, de boue et de débris. C'est pourquoi au niveau de la carte géologique du Rif (Suter, 1980) et la description des turbidites par Zakir, 2004, la dénomination de certaines formations superficielles (quaternaires) d'éboulis anciens et récents pourrait éventuellement correspondre à des glissements de terrain qui ont évolué en coulées. Les observations actuelles au niveau de ces mouvements sont embrouillées par l'intense activité superficielle qui leur a succédé. La prospection terrain a montré que ces mouvements correspondent à des glissements. L'analyse des données du terrain a permis de vérifier la typologie de ces glissements et leur lien avec les dépôts de pente.
Les grès du numidien trop fracturés, perchés sur un substratum schisteux oumarno-pélitique, est caractérisé par une perméabilité élevée ; ils permettent à l'eau de percoler à travers des fissures et des pores pour atteindre le substrat rocheux imperméable, ce qui provoque des mouvements de terrain sous la pression de l'eau interstitielle et la force de gravité. Les photos de la FigureIV.8, montrent l'infiltration des eaux vers le substratum imperméable.



FigureIV.8 :L'action de l'eau sur la réactivation des mouvements de terrain dans la régionde Souk El Quola

En outre, ces bancs grèseux qui constituent des crêtes trop abruptes, subissent souvent des éboulements et des écroulements. Les photos de la Figure IV.9, illustrent des éboulements récents au niveau du secteur d'Etude.



FigureIV.9:Ecroulement des blocs de grès *sous l'action de la circulation des eaux au niveau des bancs grèseux.*

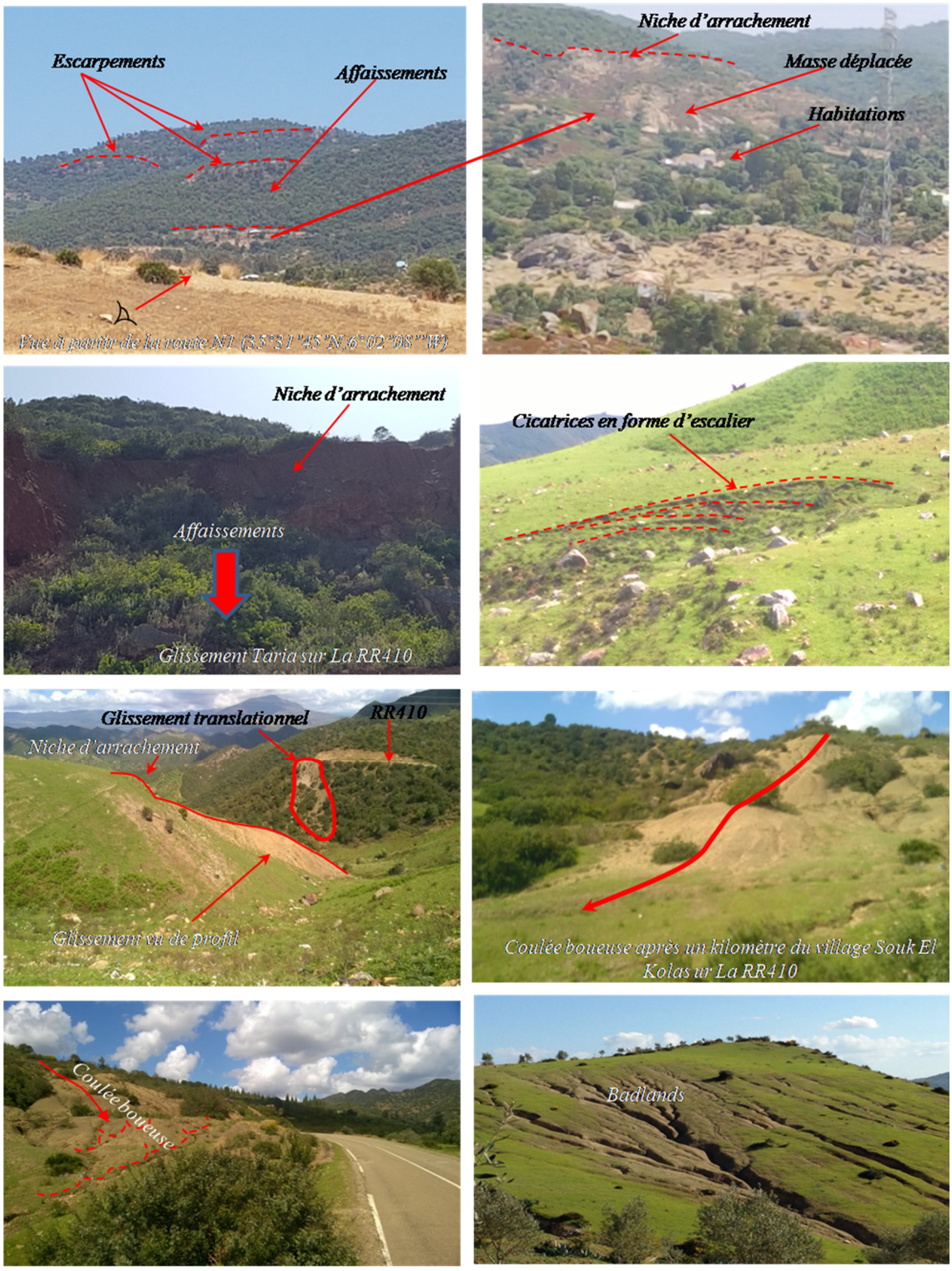
D'après des observations sur les sites visités, nous constatons qu'il y a une variété d'indices témoignant d'une succession d'activité des mouvements de pentes: des escarpements principaux de glissement de terrain originaire du Quaternaire (Maurer, G., 1968), d'autre escarpements qui révèlent des mouvements plus récents (cas du glissement de Taria, Safe Traoula, Souk El Quola) FigureIV.10.

La principale cause de la réactivation des mouvements de terrain, c'est l'augmentation de la pression interstitielle liée aux fortes pluies qui sont concentrées dans une courte période, ce qui a causé des pertes considérables sur la route RR410, les habitations au niveau de certains villages qui ont été endommagées, et le basculement des terrains agricoles.

En plus du facteur physique, il y a l'intervention anthropique au moyen de coupes de route et de l'installation des conduites d'eau potable dans une pente relativement abrupte, ce qui conduit à un changement dans les caractéristiques géophysiques des sols, ce qui les rend sensibles aux mouvements de terrain. Aussi la surcharge des pentes par les constructions de logements, ce poids supplémentaire augmente les risques de rupture de pente. A tous ces paramètres, se rajoute la déforestation qui favorise l'érosion des sols et affaiblit le soutien des sols par les racines des arbres.

il est à retenir que les différents types de mouvements se rencontrent avec de grandes fréquences au niveau des formations entre 20° et 45° de pente. Quant aux éboulements, ils sont liés à l'existence des massifs rocheux et des corniches de grès avec des pentes fortes (supérieurs à 45°). D'autre part, l'analyse de la relation entre les instabilités de terrain et l'altitude montre que ces derniers existent au niveau des altitudes moyennes et hautes. Cependant, on note que les instabilités de type glissements sontabondantes dans les classes hypsométriques basses, par contre les coulées boueuse et les éboulements se développent plutôt au

niveau des versants à hypsométrie élevée, conditionnées par la présence des massifs rocheux résistants (barres grèseuses).

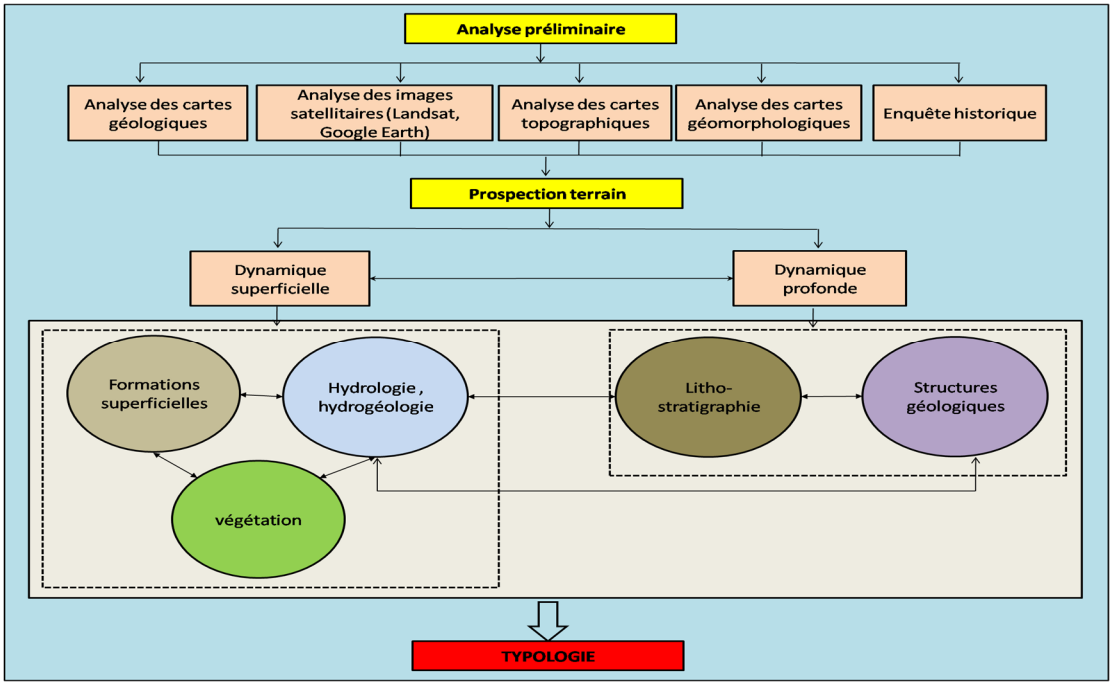


FigureIV.10 : Exemples d'indices d'instabilité repérer lors des visites sur le terrain.

6. Présentation des résultats :

6.1. Typologie et inventaire des mouvements de terrain:

La typologie présentée dans cette section repose sur la combinaison des descriptions recueillies dans la bibliographie, les cartes géomorphologiques et géologiques, l'analyse des images satellitaires, ainsi que des diverses investigations engagées sur le terrain (reconnaissance, inventaires et études de cas), FigureIV.11. Le passage par la distinction entre la dynamique superficielle et profonde est une étape importante dans ce processus. Cette distinction repose sur un certain nombre d'observations. La compréhension de la dynamique superficielle se base sur les observations au niveau des formations superficielles, la végétation ainsi que l'hydrologie et l'hydrogéologie. Quant à la dynamique profonde, elle nécessite, en plus de l'analyse de la lithostragraphie et de la structure géologique, la distinction des dynamiques des versants et la reconnaissance des types de mouvements ; (Khatabi, 2002).



FigureIV.11 : Démarche d'identification des types d'instabilités.

La présentation de la typologie des mouvements de versant constitue un préalable nécessaire, pour toute étude de la susceptibilité aux instabilités de terrain.

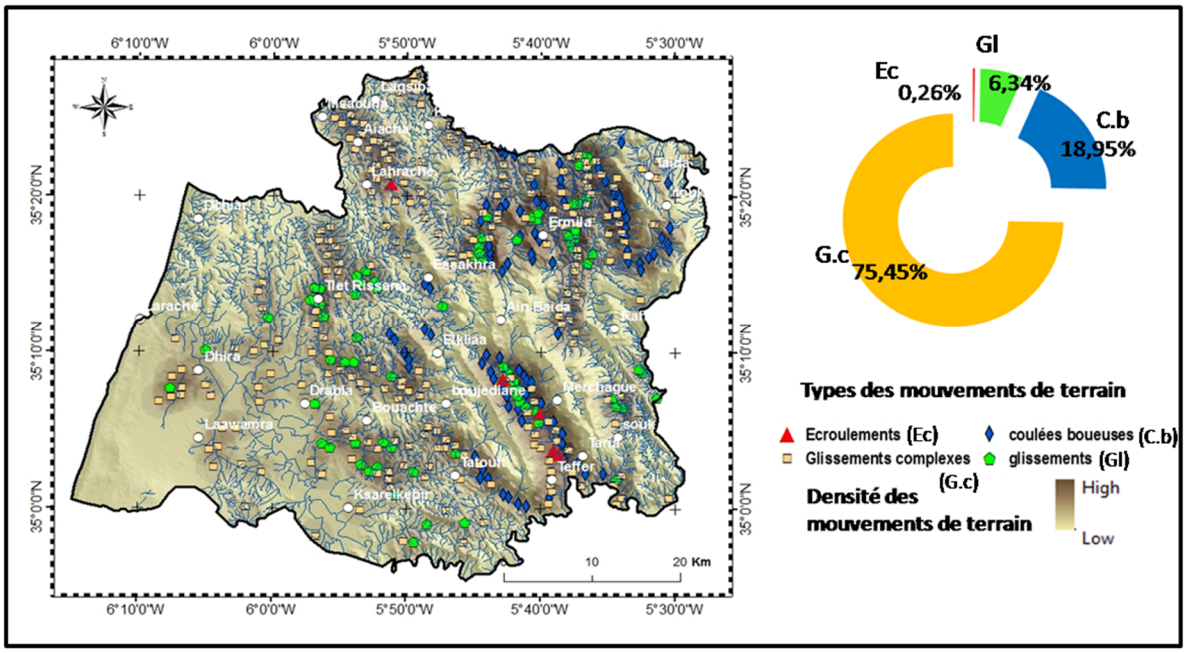
La zone d'étude est prédisposée aux différents types de mouvement de pentes : éboulements, glissements rotationnels, glissements planes, coulées boueuses et sapements de berges (générés par l'action mécanique des Oueds,ou par l'intervention humaine telle que la construction des routes),avalanches rocheuses, badlands (qui correspondentà des phénomènes de ravinement et de dégradation des sols). Ces derniers peuvent constituer un risque aussi important que les mouvements gravitaires tels que les glissements superficiels. La plupart du temps ces phénomènes sont associés formant des glissements complexes.

Du fait de la grande variabilité de la nature desterrains et la complexité morphologique, nous avons simplifié la classification en gardant quatre grandes familles de mouvements de versants, Varnes, 1978 (Figure IV.12). Ces mouvements de terrain résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques (Lacroix, 1968). Il s'agit des glissements stricto-sensu (rotationnels et translasionnels), glissements par sapements, des écroulements, des coulées boueuses, etdes glissements complexes :

- les glissements qui correspondent à des déplacements lents d'une masse de terrain cohérente, le long d'une surface de rupture généralement courbe ou plane.

- les coulées boueuses sont des déformations de versant rencontrées principalement dans des terrains marneux, pélitiques, ou argileux.
- les écroulements qui regroupent un ensemble de phénomènes rapides et brutaux qui affectent des roches rigides, au niveau des crêtes numidienne.
- glissements complexes, qui sont soit une association de plusieurs phénomènes (glissement, badlands, éboulement...) ou le résultat de l'évolution de glissement translationnel en coulée boueuse. Ce type d'instabilité est le plus répondu dans le secteur d'étude (plus de 70%), du fait de la complexité des structures lithologiques et morphodynamiques de la région.

La majorité des instabilités de terrain observés dans la région sont réactivées plusieurs fois dans le temps, certaines se sont déjà stabilisées, d'autres sont toujours actives. La figure IV.12, résume l'inventaire des instabilités de terrain en termes de typologie, avec les pourcentages de chaque type d'instabilité de terrain.



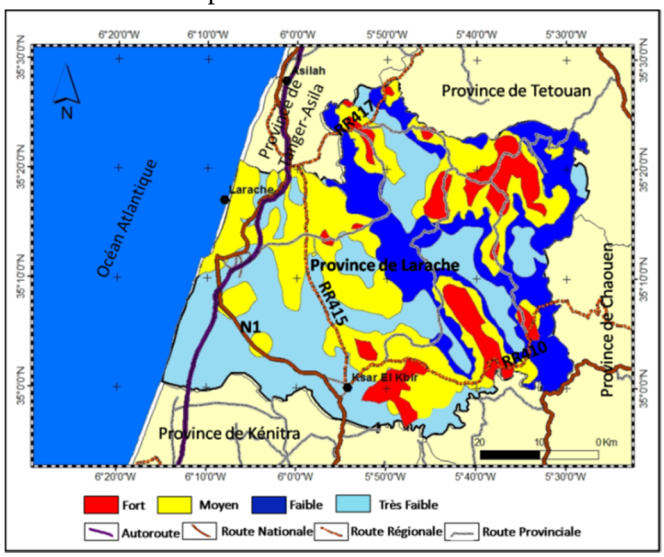
FigureIV.12 : Cartes d'inventaire des mouvements de terrain de la province de Larache.

6.2. Vers une carte "expert" (qualitative) des "mouvements de versant" :

La cartographie morphodynamique s'est inscrite dans une approche qualitative de l'évaluation de l'aléa. Rapide à mettre en ouvre et ne nécessitant pas de moyens et d'appareillage "démesurés", elle repose sur l'analyse de différents documents existants et sur les observations de terrain pour réaliser la carte. C'est une première étape d'inventaire pour évaluer l'aléa "mouvements de versant". Les principales informations qu'elle apporte (typologie, densité et degré d'activité) peuvent être croisées avec un certain nombre de données (topographie, occupation du sol, etc.) afin de produire une carte "expert" basée sur des classes de susceptibilité. La méthode adoptée consiste à déterminer quatre niveaux de susceptibilité (faible, moyen, fort, très fort), auxquels correspondent un certain nombre de règles, puis à les digitaliser sous SIG (Malet et al., 2006). Les polygones obtenus rassemblent des caractéristiques environnementales proches et constituent une "facette" (Thiery, 2007). À chaque "facette" est associée plusieurs informations, notamment : le degré d'activité des mouvements, la pente, l'occupation du sol et sa dégradation. Chaque polygone digitalisé dans une classe de susceptibilité présente donc des caractéristiques précises. La figure IV.13, présente une carte de susceptibilité des glissements de terrain que nous avons réalisé au niveau de la province de Larache.

Cependant, l'inconvénient de cette approche réside dans son aspect "subjectif" de l'évaluation de l'aléa. L'estimation et l'interprétation des phénomènes dépendent de l'opinion de la personne qui effectue les levés

de terrain. Ainsi, même avec une méthodologie commune (légende morphodynamique, etc.), le résultat cartographique peut-il être différent selon l'observateur. L'aspect "subjectif" de la méthode se fait ressentir également lorsqu'il faut définir le type de mouvement et son activité. C'est pourquoi un certain nombre d'indicateurs qualitatifs relevés sur le terrain (attributs qualitatifs de la base de données) peuvent permettre de s'affranchir des différentes approches scientifiques en privilégiant la pertinence des observations de terrain pour définir le type et l'activité d'un phénomène.



FigureIV.13 : Cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la province de Larache.

6.3. Etude de cas :

Afin de mieux illustrer ces études (en particulierles prospections du terrain), nous développerons dans le détail l'étude de deux glissements : celui du "Taria" et celui de "Souk El Quola" au niveau de la route RR410 qui relie la ville d'EL Ksar El Kebir à Chaouen. La route se développe en grande partie sur des terrains montagneux. Elle présente un tracé très sinueux avec des caractéristiques géométriques réduites à médiocre, sur laquelle on a pu repérer plusieurs zones de désordres causés par les instabilités des versants, à savoir les coulées de pierres, les coulées boueuses, les glissements de terrain au sens strict et des glissements complexes. Les versants sont généralement de pente raide et de nature lithologique, argileuse, pélitique ou des flyschs.

Au niveau de la zone visitée, la plupart des versants sont couverts par des colluvions issues d'un remaniement de blocs de grès numidiennes avec les argilites des unités intra-rifaines (l'unité de Tanger externe, l'unité de Loukkos et l'unité du Habt), et forment ce qu'on appelle en géomorphologie un glacis d'accumulation. La région est un lieu où l'érosion est très poussée, cela s'exprime par le taux d'envasement du barrage (au niveau de Sakhret El Kett), par la présence de nombreux talwegs et ravins dont certains sont d'origine d'arrachement amorcé, et aussi par le déchaussement de nombreuses racines des arbustes, ce qui favorise la mise à nu de certains secteurs. La région connaît aussi des instabilités de terrain qui concernent la plupart du temps l'ensemble du versant. Ces deux phénomènes, voire l'érosion et les instabilités de terrain, de part leur fréquence font de la région un vrai laboratoire géomorphologique.

La région connaît chaque année une quantité importante des précipitations, elle est caractérisée aussi par un été très chaud. Cette alternance de saison humide et de saison sèche donne naissance à des fissures de dessiccation responsables de l'infiltration des eaux en profondeur, ce qui agit sur la qualité des argiles qui sont généralement de portance médiocre et provoque les glissements de terrain.

6.3.1. Glissement de Souk El Quola : Glissement complexe :

Le glissement de Souk El Quola est un glissement complexe qui associe, en amont, des caractéristiques d'un glissement rotationnel (avec deux escarpements juxtaposés) et des caractéristiques d'un glissement translationnel en aval. Il se distingue assez bien par ces variations topographiques (FigureIV.14). Les escarpementsmontrent une série lithologique de l'unité de Tanger marquée par l'alternance de marne grise et de bancs de calcaires très fracturés, et qui montre un pendage conforme à la pente. **C**e glissement affecte profondément les saprolites et les marno-calcaire, sur une longueur d'environ 1200 m pour une largeur de 300menmoyenne. Le glissement est proche de la zone de contact entre la nappe des flysch numidiennes et l'unité de Tanger. (Figures IV.14, 15)

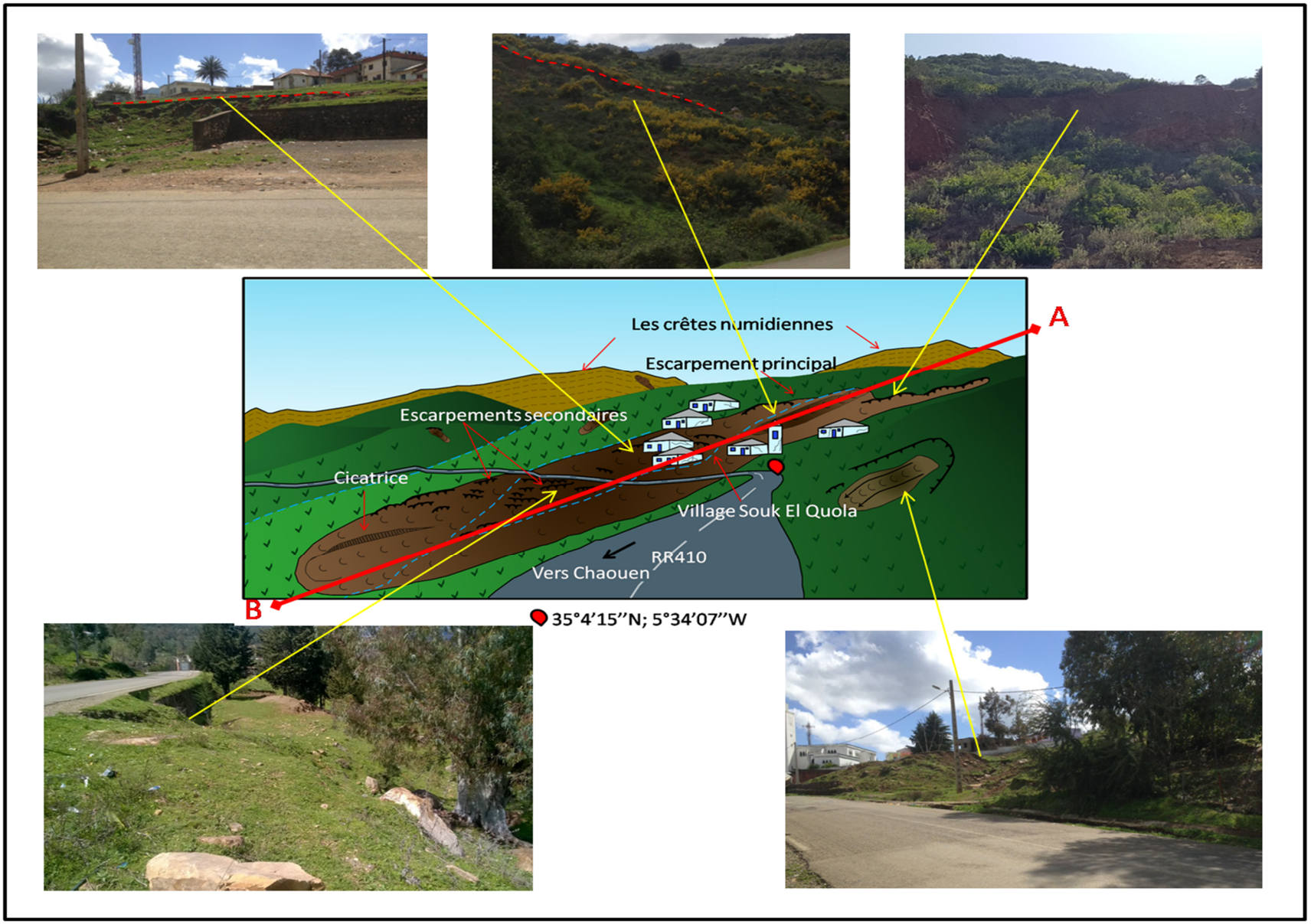
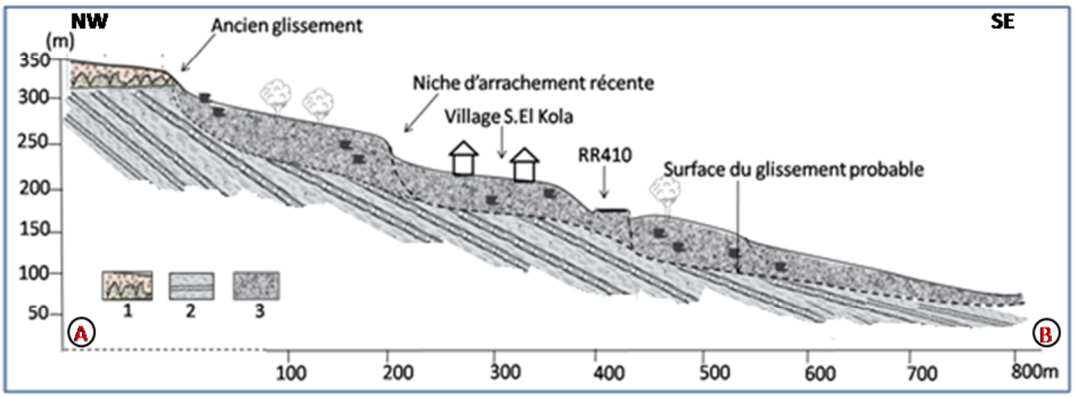


Figure IV.14 : Vue de paysage au niveau glissement de Souk EL Quola.

Les parties amont, du glissement de "Souk El Quola", sont caractérisées par des bombements dans la topographie, traduisant des processus de reptation. De même, en bas des escarpements les plus abruptes, s'étendent des replats plus ou moins réguliérs. En partie moyenne et basse du talus, apparaissent des niches d'arrachements mineurs tout à fait actuels, sur des lobes d'accumulations anciennes, mais qui n'affectent que la couverture détritique, sans faire apparaître le substratum rocheux. Le plus souvent, ces cicatrices prennent une forme semi-circulaire.



FigureIV.15: Coupe interprétative au niveau du glissement de Souk EL Quola. *1: grès numidien fissuré; 2:alternance des marnes et des bancs calcaire; 3:masse affectée par le glissement.*

6.3.2. Glissement de "Koudiet Taria": Glissement rotationnel :

Le glissement de Koudiet Taria a été responsable de plusieurs désordres, il a été la cause, à plusieurs reprises, des coupures au niveau de la route RR410, notamment lors des crues de 1996, février 1999, 2002, 2010, 2016, et février 2018.

6.3.2.1. Analyse géomorphologique:

Le glissement de Koudet Taria s'étend sur tout le versant avec une superficie de plus de 13 hectares, avec une pente accentuée à l'amont d'ordre de 35° environ. Le glissement s'exprime beaucoup plus en bas du versant, au niveau de la route, mesurant environ 1100 mètres de long pour 600 mètres de large. Il se présente sous forme d'un micro-relief mamelonné, laissant penser aux vestiges d'une succession des glissements qui auraient affecté ce secteur. Cette remarque est justifiée par la forte présence de bourrelets et d'anciennes cicatrices d'arrachement avec un rejet important en amont de la route. A l'aval de la route, il y a des cicatrices d'arrachement qui commencent à partir de la route même, et un mur en gabion déformé et déplacé, son déplacement marque une distance de 15m par rapport à la route. La Figure IV.16, montre une vue 3D issu d'un MNT.

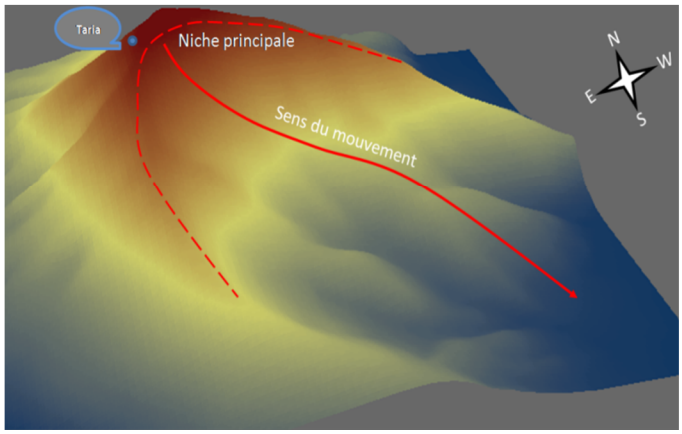


Figure IV.16 : glissement de Taria en 3D.

Ce glissement est délimité à l'amont par un large escarpement principal de 12 à 15 mètres de commandement, de forme semi-circulaire, avec un rejet qui dépasse 2m. Celui-ci est largement enfiché par une végétation de type broussailles ne laissant apparaître aucun signe d'activité. Cet escarpement est entaillé dans les marno-calcaires d'âge sénonien, visible par endroit, lorsqu'elle n'est pas recouverte par l'argile graveleuse, venant progressivement colluvionner les parties basses. La zone d'ablation se présente sous

forme d’une multitude de petits escarpements d’un commandement généralement métrique. Deux principaux grabens peuvent être identifiés, dans la partie centrale du glissement. La zone d’ablation est caractérisée par de légères ondulations dans sa partie centrale ; des lobes massifs viennent délimiter le glissement à l’aval dans sa partie terminale (voir coupe, FigureIV.17).

La zone d'ablation est suivie directement par un vaste replatcaractérisé par des pentes très faibles de l’ordre de 7°à 5°. La surface de ce replat est légèrement irrégulière, laissant apparaître quelques douces oscillations dans la topographie. Localement, la concentration des eaux a entraîné le creusement d’un petit vallon dans lequel le glissement s’est produit. Cet espace a ainsi été cartographié en tant que processus latent (FigureIV.18).

La zone d’accumulation est caractérisée par une succession de bourrelets de tailles hectométriques. La topographie bosselée de la région (FigureIV.18) est preuve d'une érosion assez forte, celle ci est conditionnée par un climat : fortement pluvieux, avec des averses torrentielles de fortes intensités et de courte durée, lors de la saison froide ; et assez chaud et sec, amenant à des fissurations au niveau des argiles qui piégeront les eaux de pluie. De nombreuses fentes de traction et de nombreuses fissures ouvertes sont visibles sur les marges latérales de ces bourrelets. Ces fissures de retrais sont liées à la nature des formations telle que le gonflement des argiles. C'est surtout la partie aval de la route qui est intensément affectée par ces fissures dont l'ouverture atteint 20cm. Il s’agit donc vraisemblablement d’un glissement à commande hydrologique déclenché par la saturation locale due à la décharge concentrée de la nappe sans véritable chenalisation, facilitant l’imbibition du substratum.

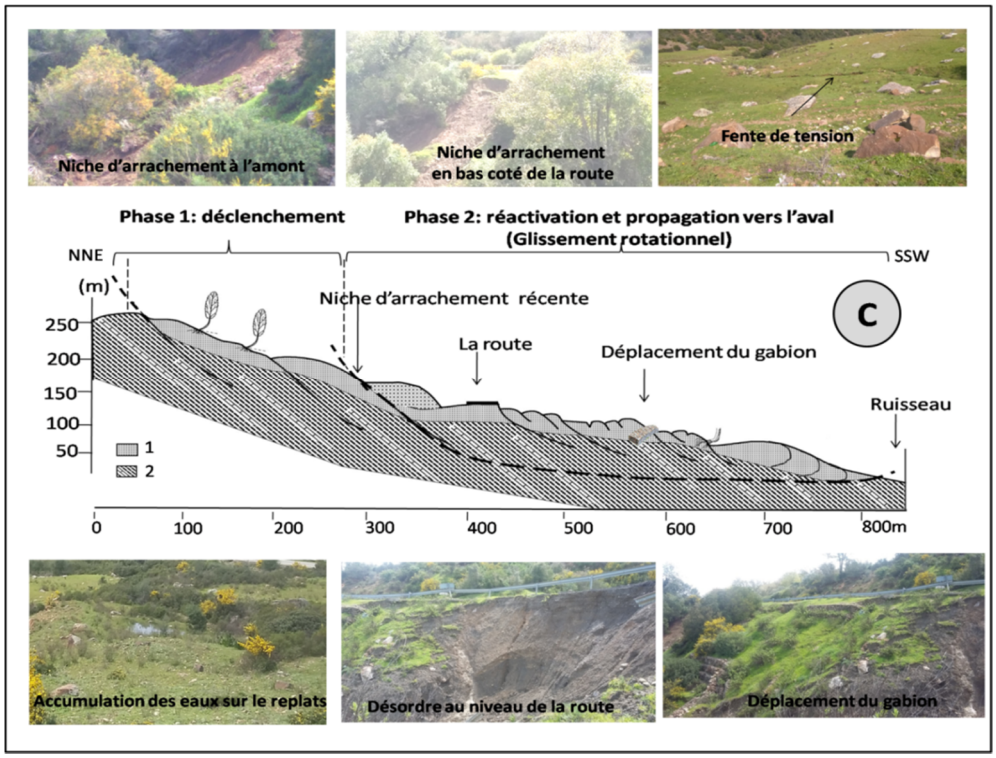


*Figure IV.17 : Coupe interprétative au niveau du glissement de Taria. Avec des images qui illustrent les perturbations causées par le glissement; 1: couverture de colluvions argileux graveleux; 2:substratum; alternance des marnes et des bancs calcaire.*Le déplacement général du glissement s’est réalisé sous forme d’un glissement rotationnel profond affectant les étages inférieurs de l'unité de Loukkos. Les divers sondages montrent une fragmentation importante des bancs calcaire, les marno-calcaires du substratum sont largement recouvertes d’une épaisse couche d’argile grumeleuse et graveleuse provenant à la fois de l’altération des grès numidienne en amont du versant instable, et du colluvionnement progressif par le plateau.

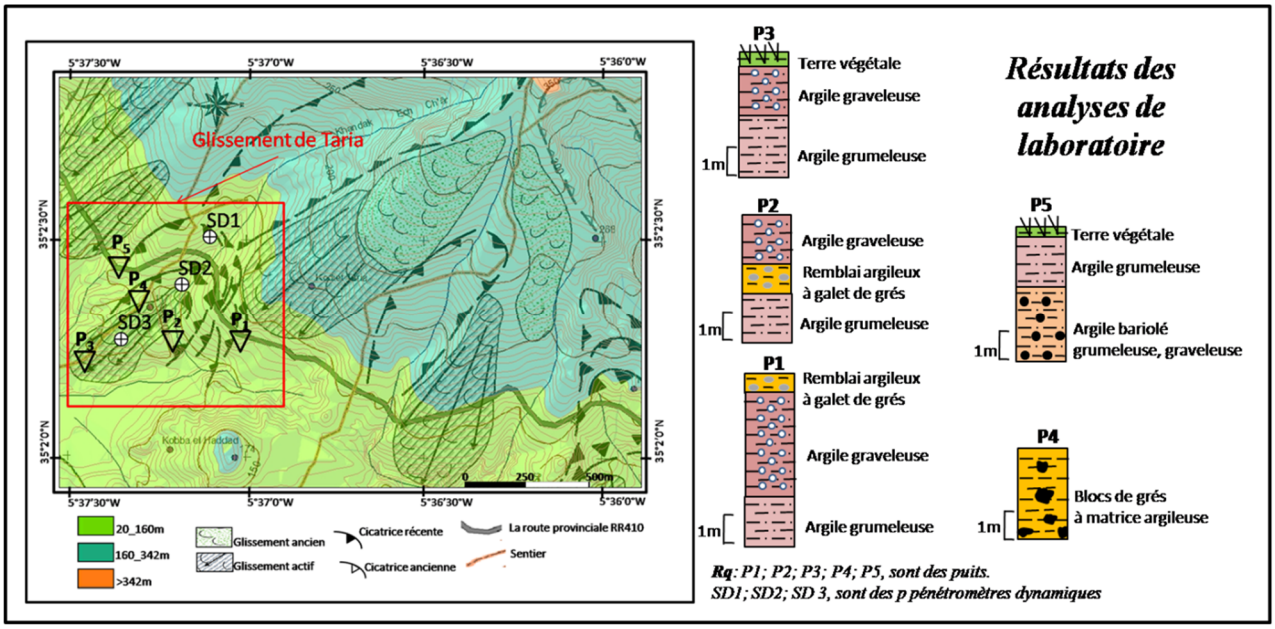


Figure IV.18:Carte morpho-dynamique du glissement Taria, *avec le positionnement des puits et des pénétromètres (puits réalisés par le laboratoire LPEE).*

6.3.2.2. Altération et colluvionnement :

Les marnes sont constituées par des proportions variables d'argiles et de calcaire. Elles ne s'altèrent généralement que sur de très faibles épaisseurs du fait de leur imperméabilité (I.El Hamdouni, 1999; A.Faleh et al, 2002). Elles subissent une dissolution des carbonates, une rubéfaction et un ameublissement d'ordre décimétrique à métrique. Sur les versants en pente, elles s'altèrent d'autant plus rapidement que les facteurs déterminant la perméabilité sont actifs :

- la densité des fentes de retrait due à l'alternance régulière de l'humectation pendant la saison hivernale et de la dessiccation profonde pendant la saison estivale ;
- la porosité, la faible cohésion et la multiplication des ruptures provoquées en partie par la détente généralisée due au creusement des ravins et l'appel au vide laissé par les zones déprimées ;
- le temps de séjour de l'eau stagnant au niveau des sols saturés.
- le taux du matériel soumis à l'érosion et mobilisé vers l'aval, ainsi que ses caractéristiques physiques et mécaniques.

Après un court transport sur le versant, une partie s'accumule en bas de pente et donne des colluvions relativement épais et plus riches en argile grumeleuse très plastique sur la partie sud du versant.

6.3.3. Analyse déterministe du glissement Taria :

Dans le but de déterminer les principaux facteurs déclenchant d'un mouvement de terrain au niveau de la région, nous avons eu recourt aux données d'investigations géotechniques exécutées par le LPEE, dans le cadre du projet de l'étude géologique et géotechnique préliminaire pour le confortement et la stabilisation des glissements de terrain du secteur Souk El Quola de la province de Larache. La localisation spatiale des échantillons est représentée sur la carte morpho-dynamique (FigureIV.18), et les résultats d'essais d'identification et des essais physiques et mécaniques sont représentés sur le tableauIV.5.

6.3.3.1. Granularité et limites d'Atterberg :

Les coupes lithologiques des puits manuels qui ont été mises à notre disposition montrent l'existence des formations suivantes : L'argile bariolée ou marnes bariolées de 2m surmontée par des argiles bariolées riches en racines variant entre 2 et 3 m d'épaisseur, et des argiles limoneuses, graveleuses avec quelques galets hétérométriques. (P1, P2, P3, P4, P5) (FigureIV.18)

Les résultats de l'analyse des caractéristiques physiques et granulométriques effectuée pour certaines formations au niveau des puits (P1, P2, P3, P5) sont résumés dans le TableauIV.5.

Tableau IV. 5 : Caractéristiques physiques des formations au niveau du glissement "Taria". *W%, teneur en eau ;γ_d, densité séche;γ_h, densité humide; Sr, degrès de saturation; Wl, limite de liquidité ; Wp, limite de plasticité IP; indice de plasticité; Ic, indice de compressibilité; (analyses effectuées au laboratoire LPEE, Larache). (Abréviations "classe" voir Diagramme de plasticité de Casagrande, FigureIV.19).*

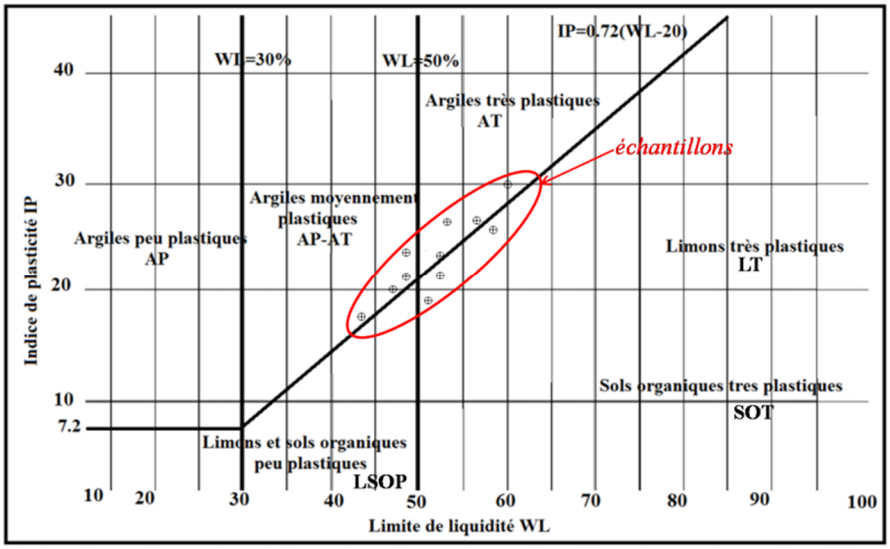
Puits	Profondeur	W%	γ_h (g/cm)	γ_d (g/cm)	Sr %	%>2mm	%<0.08 mm	Wl	Wp	Ip	Ic	Classe
P1	1.20-1.40	21.2	1.90	1.61	89	13	66	49	26	23	1.2	AP-AT
	2.20-2.40	21.7	1.99	1.64	90	19	58	54	28	26	1.2	AT
	3.80-4.00	23	1.97	1.60	90	9	48	56	30	26	1.3	AT
P2	0.80-1.00	23.8	1.99	1.61	95	6	69	47	27	20	1.2	AP
	2.50-2.70	22	2.00	1.64	92	9	69.5	49	28	21	1.3	AP
	3.40-3.60	14.5	2.07	1.81	80	12.5	64	44	27	17	1.7	AP-AT
P3	1.10-1.30	23.3	2.01	1.63	96	8	73	51	32	19	1.5	SOT
	2.10-2.30	20.6	2.08	1.67	95	12	64	52	30.5	21.5	1.4	AT
P5	1.00-1.20	21.8	2.03	1.67	95	12	64	52	30.5	21.5	1.4	LT
	2.20-2.40	24.9	1.93	1.55	80	92	71	58	32	26	1.3	LT
	3.00-3.20	21.7	1.89	1.55	79	12	73	60	30	30	1.3	AT

Ce tableau montre que les argiles représentent la fraction dominante dans les échantillons analysés. Elles varient entre 48 % pour les altérites issues des marnes de l'unité de Tanger et des grès de la nappe numidienne et 73 % pour les colluvions. L'abondance des argiles dans les matériaux du versant a des répercussions sur la stabilité en fonction de leurs caractéristiques géotechniques et minéralogiques. Plusieurs auteurs (Le Roux 1972, Costet & Sanglerat 1975, Mouroux et al. 1988) s'accordent sur le fait que dès que la teneur en eau des argiles dépasse la teneur de l'eau liée et que l'eau libre apparaît, la résistance des matériaux chute. Ils passent d'un état solide à un état plastique puis à un état liquide. Le tableau.IV.5, montre aussi les résultats des analyses géotechniques pour les formations du glissement Taria.

Le report des valeurs moyennes, des limites d'Atterberg (la limite de liquidité WL et de l'indice de plasticité, IP) pour les échantillons analysés, sur l'abaque de Casagrande (Figure IV.19) montre que lesaltérites issues des bancs de grès et de marnes et les colluvions se trouvent dans la zone des argiles moyennement plastiques à très plastiques alors que les marnes du Crétacé supérieur (de l'unité de Tanger) sont à la limite entre les argiles moyennement plastiques et les limons très plastiques.

L'indice de plasticité représente les teneurs limites entre lesquelles les matériaux sont aptes à se déformer sous l'action de facteurs externes comme la gravité ou la pression. Les résultats montrent que cet indice est élevé dans les formations analysées. Cependant, un sol dont l'indice IP est grand est jugée très sensible aux

conditions atmosphériques, car plus IP est grand, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants.



FigureIV.19 : Diagramme de plasticité de Casagrande des argileséchantillonnées à Taria.

Nous constatons aussi d'après les analyses que les sols au niveau de la région ont un degrè de saturation trop élevée, et une différence non négligeable entre la densité sèche et la densité humide. De ce fait, le pouvoir absorbant de l'eau et l'action de l'humification et le dessèchement des argiles, qui forment la fraction dominante des formations géologiques du versant, a accru la déformation mécanique, suite au gonflement et dégonflement des argiles, ce qui est probablement la cause principale de l'instabilité du versant.

6.3.3.2. Les caractéristiques mécaniques

La rupture de l'équilibre d'un versant sous-entend la modification d'un paramètre participant à la stabilité ou bien l'adjonction d'un paramètre déstabilisateur. De ce fait, le passage d'un versant de l'état stable à l'état instable résulte de l'action des facteurs de préparation. Par la suite, le mouvement s'amorce sous l'action de facteurs déclencheurs. Tout au long de l'étape de génération, les facteurs de prédisposition conditionnent le mouvement en contrôlant sa forme. Les paramètres identifiés dans l'étude de ce secteur sont souvent les mêmes paramètres précités dans les études antérieurs (Margaa, 1994 ; Azzouz et al., 2002 ; A.Labriki, 2016). A cet égard, les principaux facteurs d'instabilité pris en compte dans l'évaluation de l'aléa glissement de terrain au niveau du secteur de Taria, dans cette approche, sont relatifs aux caractéristiques physiques des formations géologiques la granulométrie (la fraction fine) et à l'indice de plasticité (IP=WL–WP) (*cf.* 6.3.3.1), et leurs caractéristiques mécaniques (cohésion et frottement) en relation avec la pente du talus naturel (β) :

- La cohésion caractérise les forces de liaison susceptibles de se développer entre les constituants solides et d'induire des variations dans la déformabilité du milieu (A.Labriki, 2016). L'intégration qualitative de la cohésion est basée sur la nature des matériaux (dur, ferme, tendre, lâche, etc.). Cet aspect reflète le degré d'association des éléments constitutifs en présence d'eau. En effet, lorsque la quantité d'eau est très importante, les particules du sol sont séparées les unes des autres et la cohésion du sol est alors nulle, par contre la présence d'eau à une faible quantité peut donner une certaine cohésion à des sols éparpillés qui ne montre aucune cohésion lorsqu'ils sont secs.
- L'angle de frottement interne est une approximation établie par Coulomb (1773) qui permet de représenter les états de contraintes correspondant à la limite entre les domaines stables et instables d'un matériau. Il dépend du type de sol, de la granulométrie et pluparticulièrement de l'émoussé de ses grains ; plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé.

- L'angle (ϕ) dépend de la forme des grains et de la granulométrie :
  - grains arrondis et uniformes : ϕ' ≤ 35° et le sol est résistant au cisaillement.
  - grains anguleux, granulométrie continue : 35°≤ ϕ' ≤ 45° et le sol est résistant au cisaillement

Ainsi existe-t-il une forte relation entre le frottement interne (ϕ') et la pente du talus naturel (β); cette dernière ne peut dépasser une valeur limite (ϕ') (FigureIV.20).

On peut obtenir un zonage significatif del'aléa lié aux instabilités de terrain en appliquant l'approche déterministe basée sur le calcul du coefficientde sécurité (Fs=tanϕ/tanβ). Cependant, le modèle de coefficient de sécurité ne peut être construit sans laconnaissance des paramètres mécaniques des formations géologiques; seulement il est très difficile de connaître en tout point lescaractéristiques mécaniques, d'où la possibilité d'extrapoler les données existes sur un secteur dont les formations lithologiques sont homogènes, le tableau IV.6 résume les classes de susceptibilité en fonction du coefficient de sécurité, (Margaa, 1994 ; Azzouz et al., 2002; A.Labriki, 2016).

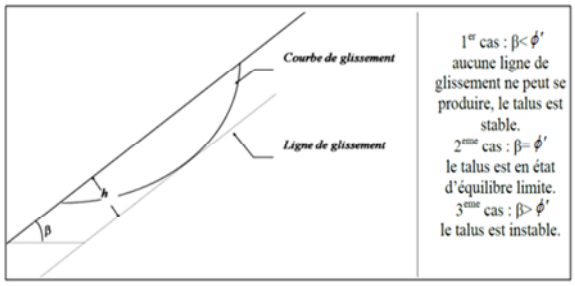


Figure IV.20 : Etats limites d'apparition d'une ligne de glissement *en fonction de la pente (β) et de l'angle de frottement interne (ϕ') (adapté par A.Labriki).*

Tableau IV. 6 : Classes de susceptibilités en fonction du coefficient de sécurité.

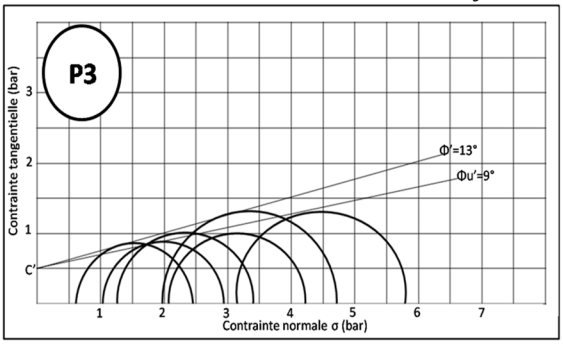
Coefficient de sécurité Fs	***Degrès de susceptibilité***
Fs inférieure à 1	Susceptibilité élevée
Fs compris entre 1 et 1.5	Susceptibilité moyenne
Fs compris entre 1.5 et 2	Susceptibilité faible
Fs supérieur à 2	Susceptibilité nulle

Trois échantillons ont subi des essais du comportement mécanique dits les caractéristiques intrinsèques, la cohésion et l'angle de frottement (C, ϕ), qui ont été mesurées par des essais de cisaillement direct de type non-consolidé non-drainé (UU) à l'aide de la boîte de Casagrande. Deux résultats sont retenus, ce qui est insuffisant pour élaborer une classification déterministe ; ces résultats sont présentés sur la FigureIV.21.

Dans le cas que nous étudions, la cohésion (C') est compris entre "0.3 bars <C' <0.6 bars", donc le sol est cohérent.

L'angle du frottement interne est compris entre "13°<ϕ' <23°" donc les grains sontarrondis et uniformes et le sol est résistant au cisaillement

L'analyse du résultat de l'évaluation déterministe montre que, d'une manière générale, l'aléa est bien prononcé au niveau de ce versant, il semble toujours être conditionné par le facteur pente (*Figure IV.20, 21*).



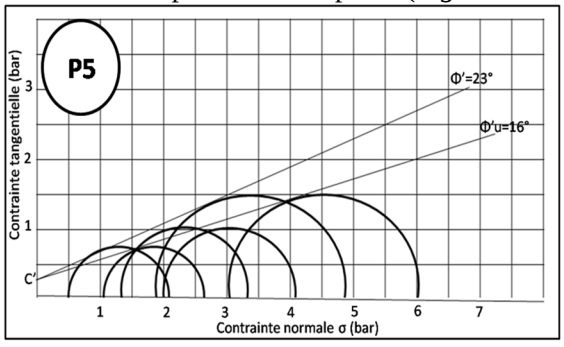
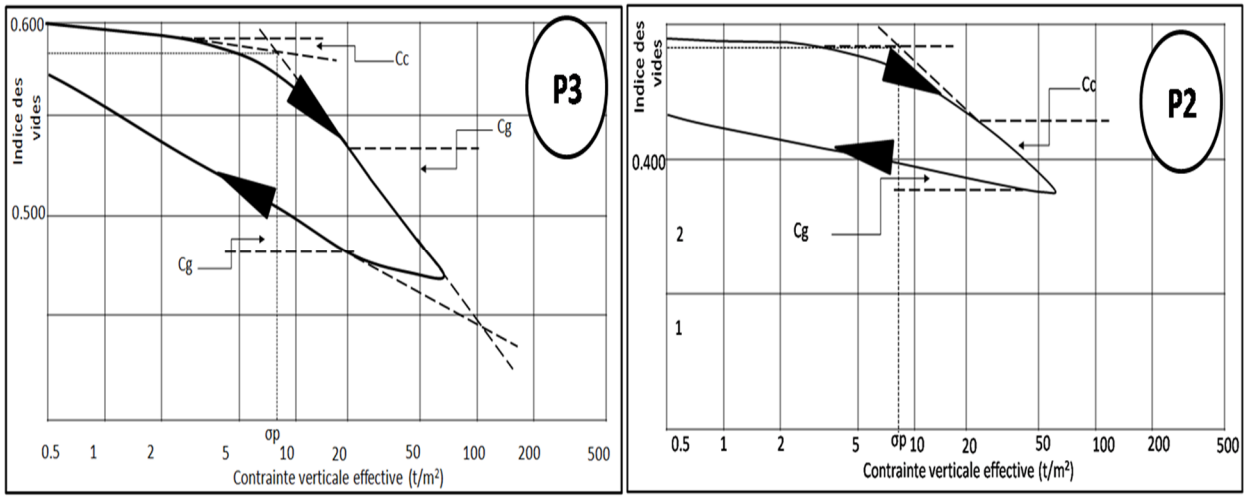


Figure IV.21 : Essais du comportement mécanique des échantillons *au niveau des puits P3 (profondeur : 2.10-2.30) et P5 (profondeur : 3.00-3.20) ; C', cohésion interne ; C'u, cohésion apparente ; Φ', angle de frottement interne ; Φ'u, angle de frottement apparent (analyses effectuées au laboratoire LPEE, Larache).*

6.3.3.3. Essais de compressibilité à l'oedomètre :

L'essai de compressibilité à l'oedomètre permet d'apprécier la déformation verticale des sols. La courbe de compressibilité indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée (FigureIV.22). Le principe de cet essai est d'appliquer sur l'échantillon une contrainte qu'on fait augmenter par paliers pendant 24 heures, avec un accroissement de 50% de la charge à chaque palier, tout en mesurant les variations de l'indice du vide, jusqu'à σv= 872,701kPa. De cet essai, on peut tirer les caractéristiques suivantes : i. l'indice de compression (σc) ; l'indice de recompression, ou de gonflement (σg).



FigureIV.22. Essais de compressibilité à l'oedomètre *pour deux échantillons (P2 et P3) ; Cc : coefficient de compressibilité, Cg : indice de gonflement, σp : contrainte de préconsolidation.*

Les résultats que nous avons obtenus de cet essai sont (FigureIV.22) :

- Une pression de consolidation qui varie entre σ_c=9.50T/m^2 et σ_c =10T/m^2 ;
- Un indice de compressibilité I_c qui varie respectivement entre I_c=0,116 pour σ_c=9.50T/m^2 I_c=0,059 pour σ_c=10T/m^2.
- Une pression de gonflement qui varie entre σ_g = 2.1T/m^2 et σ_g =2.50 T/m^2 Respectivement : σ_g=2.1T/m2 correspond à un indice de gonflement I_g=0.054 et σ_g =2.50T/m^2 Correspond à Ig=0.012.

Les essais oedométriques montrent que les sols au niveau de notre secteur ont une tendance au gonflement comme en témoignent les courbes oedométriques (FigureIV.30), ce qui renforce les conclusions déduites des caractéristiques physiques et mécaniques des sols au niveau du glissement de Taria.

6.3.3.4. Les essais triaxiaux consolidés isotropiquement non drainés (CIU) :

L'essai triaxial CIU permet de tirer les résultats suivants : **(i)** la relation entre la contrainte deviatorique (σ_1-σ_3) et la déformation axiale, **(ii)** la relation entre la pression interstitielleet la déformation axiale. Il faut une moyenne de cinq essais pour avoir une idée plus exacte sur le comportement mécanique de la formation. D'un essai à un autre, on fait varier la contrainte effective. Les échantillons sont préparés directement dans des cellules triaxiales standard grâce à une moule des échantillons, la saturation est réalisée par l'application d'une contre pression et d'une pression cellulaire déterminée selon la nature des échantillons et pour une durée de 48 heures. On note les variations de la déformation en mm. La FigureIV.23 et le tableauIV.7 présentent les résultats de l'essai triaxial CIU, qui ont été mise à notre disposition par le Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes.

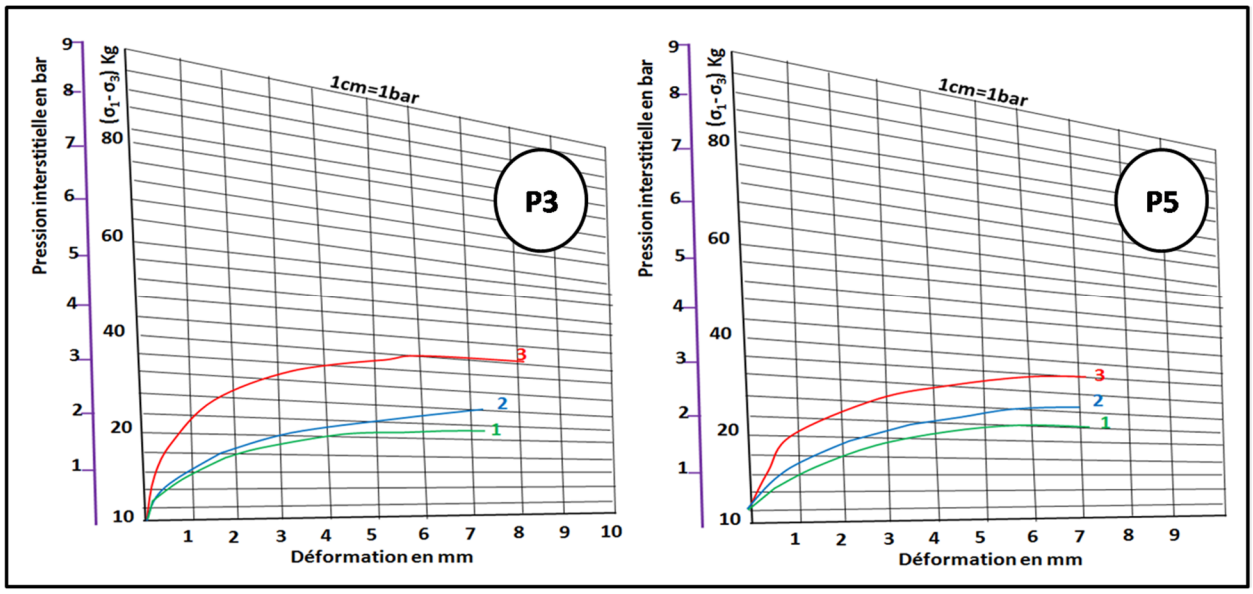


Figure IV.23 : Courbes pressions interstitielles-déformations axiales pour les essais non drainés *à différentes valeurs de σ_3, pour deux échantillons au niveau des puits P3 et P5,(analyses effectuées au laboratoire LPEE, Larache).*

Tableau IV.7 : Résultats des essais de compression triaxial pour deux échantillons *au niveau des puits P3 et P5, (glissement "Taria"). ɣd, densité séche ; Si, degrès de saturation ; Wl, limite de liquidité, Ϭ, contrainte latérale.*

	Etats	Etat initial			Etat final		
Puits 5	Eprouvettes	1	2	3	1	2	3
	latéral Ϭ	1	2	3	1	2	3
	Diamètre (mm)	38	38	38	-	-	-
	Hauteur (mm)	73	73	73	-	-	-
	Wl (%)	21.8	21.7	21.7	29.5	28.5	25.6
	γ_d	1.56	1.55	1.56	1.48	1.49	1.58
	S_i (%)	80	79	80	97	94	98
Puits 3	Eprouvettes	1	2	3	1	2	3
	Ϭ latéral (bar)	1	2	3	1	2	3
	Diamètre	38	38	38	-	-	-
	Hauteur (mm)	73	73	73	-	-	-
	Wl (%)	20.6	20.6	20.6	20.4	21	20
	γ_d (bar)	1.76	1.93	1.73	1.74	1.75	1.77
	S_i	100	98	98	100	100	100

Dans le plan [déformation axiale, déviateur de contraintes] (Figures IV.22, 23), on observe un comportement caractéristique des matériaux légèrement cimentés, assisté par une augmentation de la déformation axiale avec une légère augmentation du déviateur. Ensuite, l'essai se poursuit comme dans le cas d'un sol ordinaire. Ceci indique un comportement de sol gonflant légèrement cimenté. Ce comportement se retrouve dans le plan [déformation axiale, variation de pression interstitielle] qui se traduit par une variation des paramètres évoluant ensuite de la façon habituelle des sols déformables. Les échantillons ont un comportement contractant où ils présentent une augmentation de pression interstitielle. L'essai de compression triaxial confirme le comportement gonflant des sols au niveau du glissement Taria.

6.3.3.5. La dynamique fluviale:

Le sapement intense du pied de versant par un méandre del'Oued Loukkos a participé à la déstabilisation du versant et lamise en mouvement du glissement de Taria.L'activité hydrodynamique de ce méandre s'intensifiepar les apports importants d'eau, causés par les pluies exceptionnelles que connait la région lors des mois où les averses sont excessives et concentrèes sur des périodes courtes. Cetteactivité érosive a accentué la raideur de la pente au pied du versant. L'appel au vide créé par l'affouillement de la base duversant a accéléré l'effondrement.

6.3.4. La surface de rupture:

Trois sondages au pénétromètre dynamique ont été réalisés suivant un axe transversal coupant la route et le glissement (FigureIV.21) :

- SD1 : Implanté dans le côté amont de la route à une altitude Z=145m. Le pénétrogramme montre que la résistance de pointe (Rp) varie entre 50 et 100bars, ce qui indique la présence de zones de faiblesses entre 0 et 3m. Puis la résistance dynamique augmente pour atteindre le refus à 5.2m avec une valeur dépassant 1000bars. Cette surface de refus représente la surface principale de rupture de la masse glissante sur le substratum rocheux.
- SD2 : Implanté à l'aval de la route à une altitude Z=125m, il montre les résultats suivants :
  - ✓ de 0.00 à 1.20m ; Rp<5bars.
  - ✓ de 1.20 à 1.90m ; 5<Rp<50bars.
  - ✓ de 1.90 à 2.60 ; Rp<5bars.
  - ✓ Puis à partir de 3m la résistance dynamique prend une allure croissante, et atteint le refus à une profondeur de 7.9m, avec une valeur de 1164bars.

Ce sondage montre que les trois premiers mètres sont constitués de matériel remanié par le glissement ; ils représentent le remblai du glissement. Et la surface de rupture majeure sera donc à 7.9m (surface de refus).

- SD3 : Le sondage est situé à l'aval de la route à une altitude de Z=117m. Du pénétrogramme, on peut tirer les résultats suivants :
  - ✓ de 0 à lm : 15bars<Rp<50bars.
  - ✓ de lm à 2m : 45bars<Rp<100bars.
  - ✓ de 2m à 3m : 15bars<Rp<100bars.
  - ✓ Au-delà de 5m la résistance de pointe augmente pour atteindre le refus à1100bars.

Les trois premiers mètres représentent le matériel altéré, et la surface de rupture majeure sera donc celle du refus à 9.5m.

D'après ces résultats des sondages, nous constatons que la profondeur de la surface de rupture augmente de l'amont vers l'aval, ce qui confirme que le glissement Taria est de type rotationnel avec une surface de rupture semi-circulaire. En se basant sur la vérité du terrain, et les résultats des essais de pénétromètres, nous concluons que la ligne de rupture probable responsable du désordre au niveau de la route commence bien en amont de la route, au moins à une altitude de 160m. D'après les caractéristiques déjà décrites, on peut

conclure que la surface principale de rupture existe au moins au niveau de la formation la plus profonde au niveau de la couverture (celle des argilittes grimuleuses).
Ce type de glissement est commun dans la zone d'étude, en particulier le long de la route RR410, du fait des caractéristiques médiocres des sols et de l'inclinaison favorable aux mouvements des versants. Ceci est favorisé par les vibrations du sol pendant les travaux routiers, l'excavation des talus et l'action hydraulique, ce qui provoque une réduction de la valeur des paramètres géotechniques (résistance de la roche intacte, cohésion et frottement) du matériau de la pente et de la masse, réduisant ainsi le facteur de sécurité aux conditions instables et diminuant la stabilité de la pente.

6.4. Conclusion :

Cette partie de la thèse a permis de définir une typologie de base des mouvements de versant au niveau de la province de Larache.La disponibilité croissante des données satellitairessur internet a servi pour le zonage des mouvements de pente et pour l'évaluation des risques des instabilités de terrain, du fait que la rareté des données est l'une des principales limitations. Cependant, la plupart des données disponibles ne sont applicables qu'aux petites échelles, bien que des données plus détaillées avec une résolution plus élevée augmentent progressivement. L'évaluation des risques de glissement de terrain aux niveaux national ou provincial pourrait incorporer de nouveaux ensembles de données fournies par des organisations internationales, mais des recherches supplémentaires sont nécessaires sur la précision et la validation de ces ensembles de données.
L'analyse de phénomènes de référence à échelle locale renseigne principalement sur la variété des types de mouvements observables au niveau de la région. On distingue ainsi des phénomènes de déformation de versant stricto-sensu (solifluxion/reptation) et des phénomènes de glissement (profonds et superficiels ; rotationnels et translationnels). Cette typologie a ensuite servi de base à l'inventaire des mouvements de versant. Outre la contribution de ces inventaires à la connaissance générale régionale des phénomènes et de leur activité, ils constituent avant tout une donnée de base essentielle à la cartographie de la susceptibilité qui sera réalisée dans la troisième partie.
Les formes des instabilités de terrain étudiés sont diversifiées et dominées par : les glissements complexes, les glissements au sens strict, les éboulements et les écroulements. Ces divers mouvements sont largement contrôlés par la pente, quasi souvent supérieure à 25°, la fréquence des formations des pentes, les contacts majeurs entre des matériaux compétents en relief abrupt sur des matériaux de basse résistance. A ces facteurs, s'ajoute l'action climatique qui se manifeste dans le secteur d'étude principalement par : le régime l'intensité des pluies (moyenne annuelle>1000 mm) concentré dans le temps (décembre à février), l'infiltration de l'eau en profondeur en provoquant des pertes de cohésion des formations adjacentes, le ruissellement des eaux de pluie menaçant l'instabilité des talus de la route et les berges des cours d'eau et les températures élevées des mois de l'été et des débuts de l'automne favorisant la fracturation et la fissuration des sols et des roches.
L'analyse déterministe du glissement de "Taria" nous a permis de distinguer les facteurs passifs ou hérités (facteurs prédictifs) : ce sont les causes internes. Il s'agit des caractéristiques propres au versant. C'est la susceptibilité du versant à répondre aux actions des agents externes. Dans ce groupe, on peut mettre la lithologie, la disposition structurale et la valeur de la pente. Les facteurs actifs (facteurs déclencheurs) sont les agents externes. Par leurs actions, ils déstabilisent les structures internes des formations du versant et provoquent leur mouvement. Dans ce groupe il y a le climat, le sapement de berge, l'action anthropique…Sous l'action de l'eau, la déformation mécanique des argiles qui forment la fraction dominante des formations géologiques du versant est la cause principale. Les formations riches en argiles sont généralement imperméables à l'eau. Cependant, la disposition structurale et l'intervention humaine ont amplifié la densité des zones de faiblesse qui ont permis une imbibition en profondeur des marnes.

Dans le cadre de cette thèse portant sur la cartographie de la susceptibilité, notrepropos n'était pas d'engager une recherche approfondie sur les conditions dedéclenchement des glissements à l'échelle locale. Cependant, le modèle physique utilisé dans le cas du glissement Taria tient compte véritablement des processus géologiques et mécaniques des versants. Ce modèle apparaît alors plus pratique pour l'estimation de la stabilité réelle des versants et dégage l'influence des facteurs sur la localisation des "mouvements de versant" ainsi des tendances fortes se dégagent. Pour cet unique cas d'étude duglissement de la région Taria, nous avons donc pu vérifier la cohérence del'interprétation morphologique pour ce type de glissement, ce qui nousparaît, à ce stade, suffisant. Il s'agit ici d'une étude "préliminaire" ayant pour objectif principal de dégager les facteurs de prédisposition qui conditionne les mouvements de terrain.L'analyse paramétrique a permis de "caler" les caractéristiquesintrinsèques à des valeurs assez proches de celles obtenues lors des essais delaboratoire, et aussi elle servira lors de prise de décision dans la phase de pondération des facteurs prédictifs et de leurs classes. En outre, des précisions manquent sur **(i)** les différents types de phénomènes, **(ii)** leurs limites exactes, **(iii)** et les facteurs de prédisposition propres à chaque type de phénomène.

CHAPITRE. V: FACTEURS DE PREDISPOSITION POUR LA MODELISATION DE LA SUSCEPTIBILITE : ACQUISITION, DESCRIPTION ET IMPACT SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Introduction:

Il existe une variété de facteurs qui peuvent être introduits au niveau des modèles de prédiction de la susceptibilité des mouvements de terrain, ils sont subdivisés en deux catégories :(i) facteurs de prédisposition et (ii) facteurs déclenchants.

(i)Les facteurs prédictifs ou intrinsèques : Ce sont les facteurs dits aussi conditionnants, parce qu'ils conditionnent la stabilité ou l'instabilité permanente des versants. Ils rendent la pente vulnérable à la rupture sans l'initier réellement. Ils ont une incidence sur les processus d'instabilité des versants et sont liées auxcaractéristiques permanentes des versants ou d'une région..., ces facteurs peuvent être (Dai et al 2002a) :

- ***Géologiques*** : la lithologie (la nature de la roche, sa cohérence...), la stratigraphie de la roche (orientation et angle d'inclinaison), l'altération des roches (altération hydrothermale et/ou météorisation) et les discontinuités stratigraphiques et structurelles.
- ***Hydrologiques et hydrogéologiques*** : la densité du réseau hydrographique, les nappes phréatiques, l'écoulement superficiel et le débit d'écoulement.Ils conditionnent le changement dans les pressions de pores ou hydrostatiques et le comportement géo-mécanique (résistance à la déformabilité, compressibilité, cohésion, etc.).
- ***L'occupation du sol*** : La couverture terrestre est une indication indirecte de la stabilité de pentes de colline. Les zones dénudées et à végétation clairsemée montrent une érosion plus rapide et une plus grande instabilité par rapport aux zones à couverture végétale dense (forêts de réserve ou protégées), qui sont, généralement, moins sujettes à la fonte massive.
- ***Géomorphologiques ou topographiques*** : la géométrie des talus, le pendage des versants (la pente), leur exposition, l'irrégularité de la topographie, et l'hypsométrie.
- ***Climatiques*** : les conditions climatiques régionales, selon la position géographique.

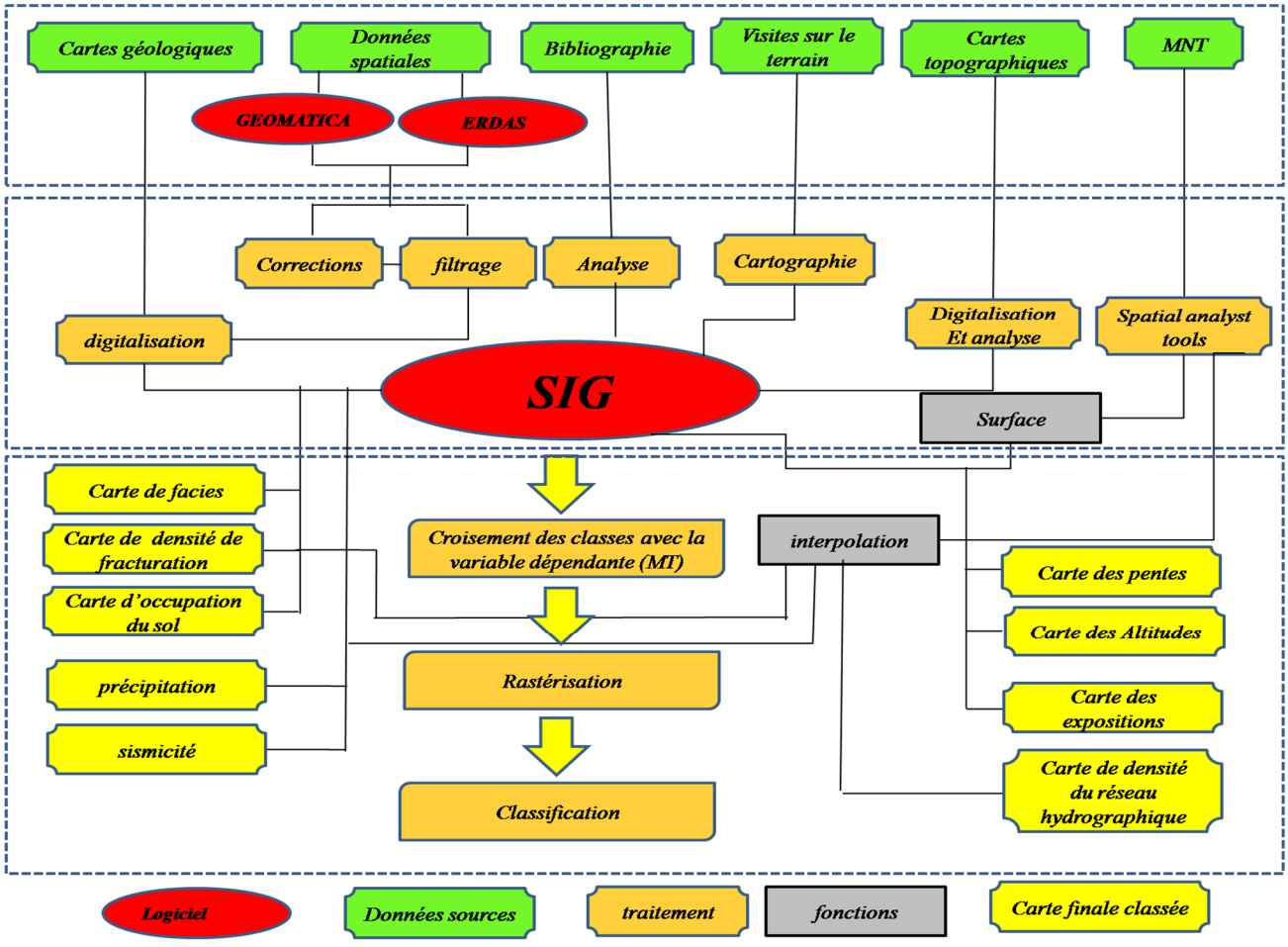
(ii)Les facteurs déclencheurs(externes) *:* Ce sont les conditions qui provoquent l'instabilité sur le versant. Une petite cause peut être suffisante pour provoquer un déséquilibre qui déclenchera l'instabilité du versant. Les facteurs déclencheurs font passer la pente d'un état marginalement stable à un état instable, ce qui entraîne une défaillance dans une zone de susceptibilité donnée, telle que les fortes précipitations et les tremblements de terre (Wu et Sidle, 1995). Les facteurs de déclenchement, tels que les précipitations, peuvent être pris en compte pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain. Ces facteurs sont classés en deux catégories :

- *Naturels* : les précipitations normales ou orages, les variations de température, l'infiltration des eaux naturels, sapement des berges, les séismes.
- *Anthropiques* : les coupures de talus pour construction de routes ou autre infrastructure, les bâtis sur les versants, la déforestation, les feux et incendies forestiers, l'activité minière, l'exploitation inadéquate du sol, et autres.

L’évaluation de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain nécessite donc une description détaillée de ces facteurs allant de la nature des formations géologiques à l’occupation du sol et la densité du réseau hydrographique au niveau du secteur d'étude. Ceci est lié à :

- La disponibilité des données spatialisées représentant ces facteurs ;
- L’accès aux couches d’information et/ou de la possibilité d’en générer de nouvelles ;
- L’identification et l'évaluation de la relation spatiale que les facteurs cartographiés entretiennent avec les mouvements de pente identifiés ;
- La pondération de la part respective de ces différents facteurs dans la genèse des instabilités de terrain. La majorité des méthodes de cartographie de la susceptibilité et de l’aléa se base sur le croisement et sur la pondération relative de ces données spatialisées pour la restitution cartographique finale.
- Le choix des facteurs et de l'échelle appropriés aumodèle de prédiction utilisé.
- La qualité de la représentation cartographique des facteurs introduits dans les modèles à une forte influence sur la précision et la fiabilité des cartes finales (Guzzetti, 2006 ; Fressard et al., 2013). la FigureV.1, présente les étapes de collection et d'évaluation des variables qui ont été prises en considération dans nos méthodes de cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires.

Afin d’avoir un aperçu sur l’influence des facteurs de prédisposition sur la présence des mouvements de terrain dans un secteur donné, on peut effectuer une intersection entre les catégories de chaque facteur prédictif et les instabilités en termes de centroïdes. Selon le pourcentage de points d'instabilité au niveau des catégories d'un facteur donné, un indice sera affecté pour chaque catégorie lors de la reclassification.



FigureV.1 : la procédure de collecte des données et la structuration d'une base de données opérationnelle.

1. Les facteurs prédictifs :

1.1 La lithologie :

1.1.1 Cartographie des faciès dominants :

Dans toute étude classique cherchant à prédire la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain, la lithologie est l'un des paramètres les plus souvent considérés. Elle conditionne à la fois la résistance des roches et leur perméabilité. Dans notre secteur d'étude, la lithologie est en effet l'un des principaux facteurs contrôlant le développement des glissements profonds et complexes (Carrara, 1983 ; Fernandez et al., 1999 ; Pike et al., 2003 ; O.Dewitte, 2006). Les unités lithologiques qui couvrent la majorité des terrains au niveau de la région sont constitués des marnes et des argiles très riche en Sméctite. Ces unités représentent la lithologie la plus susceptible aux mouvements de terrain.

Concernant la prédiction des réactivations des glissements de terrain, il est possible néanmoins que la lithologie soit un facteur moins prépondérant, en le comparant à un autre facteur qui soit le plus influençable.

La carte de la lithologie a été élaboré en se référant à des cartes géologiques existantes (la carte du Rif au 1/500000ème, la carte de Larache au 1/50000éme) et des cartes avoisinantes (celle de Chefchaouenet celle de Ouezzane) couplé à la télé-interprétation assistée par ordinateur à partir des données satellitaires optiques (Image Landsat_TM^{+}). Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été reconnues sur l'image satellitaire grâce à des traitements spectraux, réalisés sur ERDAS Imagine.11. Ces interprétations ont été complétées par des observations sur terrain.

Plusieurs techniques de rehaussement et de classification de l'image satellitaire ont étéappliquées sur une échelle régionale et sur une échelle de 1/50 000 éme, (FigureV.2). Nous avons retenu celles qui ont offert plus de données :Decorrelation Stretch ;Natural Color ;Analyse en Composantes Principales (ACP);Tasseled Cap;Classification Multispectrale Supervisée;

Les grès Numidien de Jb. Sougna, Jb.Smiâa et Jb. El Kobba ressortent essentiellement sur la composition colorée "Natural color"par des teintes verdâtres avec une texture grossière et un relief apparent, et apparaissent sur la composition colorée "Tasseled Cap" en couleur bleu.

Sur la composition colorée par "Analyse en Composantes Principales", nous reconnaissons le faciès marno-calcaire de l'unité de Tanger qui apparait au niveau des dépressions et les Oueds, avec une teinte rougeâtre à texture fine. Aussi reconnaissons-nous, sur la même ACP, les grèspélitiques des anticlinaux à l'Ouest de la région, notamment celui de Boujedianne, ils apparaissent en nuance marron.

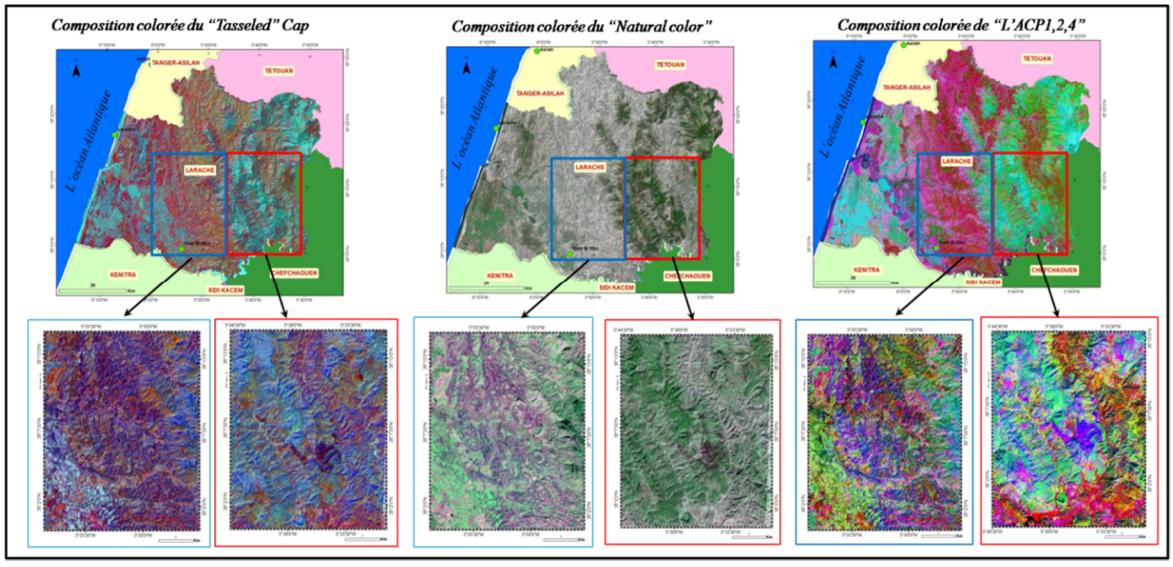


Figure V.2 : Quelques exemples de filtres appliqués lors de la réalisation des cartes de faciès à différentes échelles.

La carte du faciès lithologique de notre secteur d'étude est réalisée en deux étapes. Nous avons d'abord procédé à la détermination des unités géologiques caractérisées par des propriétés lithologiques les plus homogènes possible. Pour se faire, différents types et niveaux de découpage sont proposés dans la littérature (Lacroix, 1968 ; Varnes, 1984, Van Ouesten, 1993 ; Castellanos et Van Ouesten, 2008). Nous avons procédé ensuite à une requalification postérieure des formations géologiques selon leurs affinités lithologiques, mécaniques et leur comportement vis à vis de la stabilité des versants, à l'aide du module "reclassification" de l'outil"*Spatial Analyst*" de notre logiciel SIG. Nous avons pu distinguer quatre classes de faciès lithologiques qui sont : les marnes, les grès, les pélites, les alluvions.

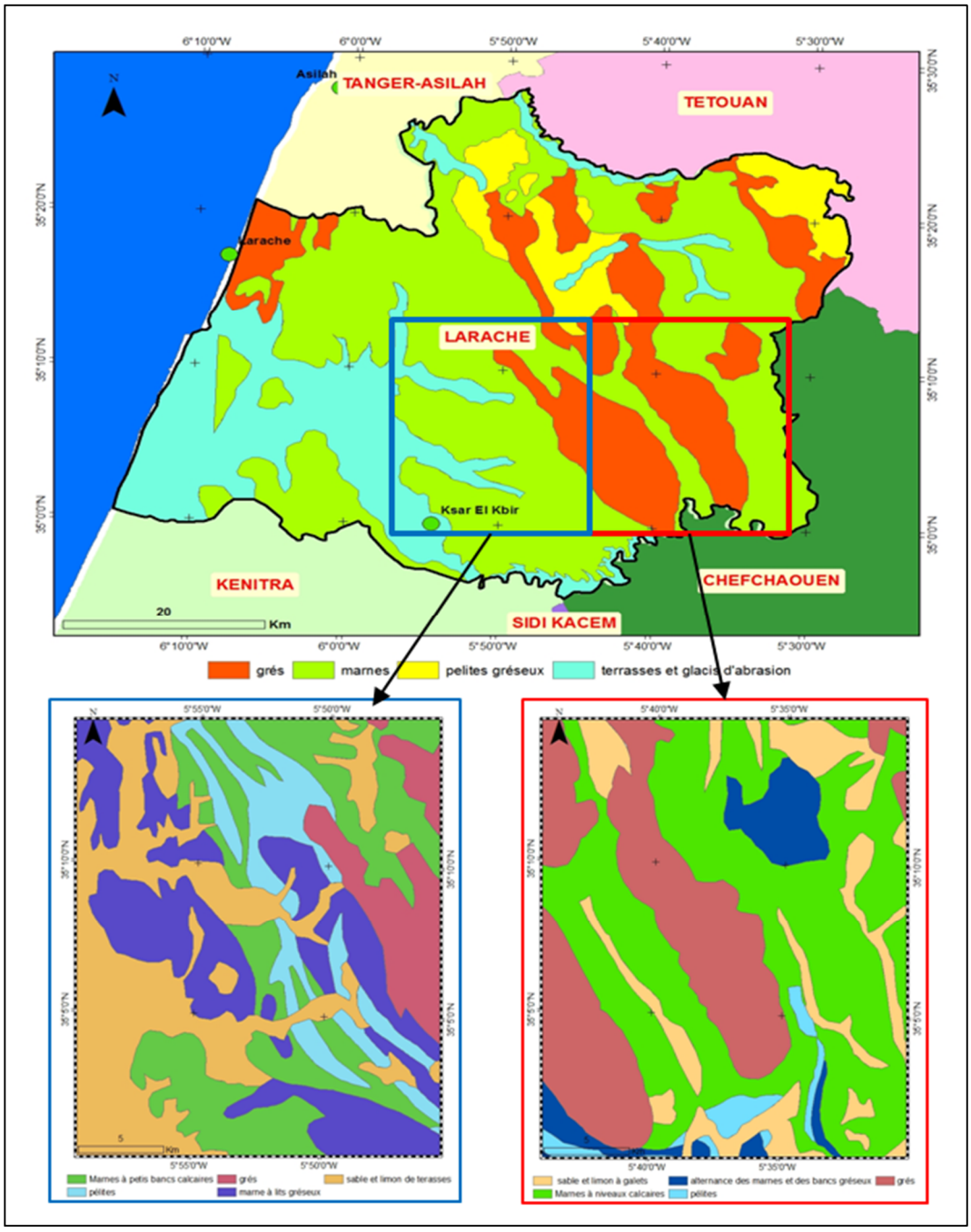


Figure V.3 : cartes de faciès à l'échelle régionale, 1 :200 000éme et à moyenne échelle *(Feuille de Ksar El Kebir et Feuille d'El Quola, 1/50 000éme).*

La lithologie est d'une importance capitale dans l'occurrence et ladistribution spatiale des mouvements de terrain, dans plus de 40% des cas cartographiés à savoir : des alluvions argileuses,les marnes, et les pélites, à caractéristiquesmécaniques médiocres et une structuration prédisposée aux instabilités de terrain. L'indice d'instabilité des différents ensembles lithologiques a été estimé en calculant l'interpolation des cas d'instabilités déjà cartographiés au niveau de chaque classe de faciès. (FigureV.3)
Le pendage des strates peut être considéré également comme un facteur catalysant le déclenchement des mouvements de terrain, dans le cas où les strates ont un pendage conforme à la pente générale du versant. Dans une telle disposition, les plans de stratification peuvent jouer le rôle de surfaces de rupture en permettant la formation de glissements banc sur banc ou de l'écroulement en masse d'une colonne rocheuse. Cela peut être accentué par la présence de la fracturation et de diaclases (Mastere, 2011).

1.1.2 Relation de la lithologie avec la variable à modélisé MT:

L'intégration d'une variable de prédisposition dans un modèle de calcul de la susceptibilité aux instabilités de terrain "quantitatif ou semi-quantitatif" nécessite l'affectation d'un indice pour chaque classe et ceci, selon la sensibilité de chaque entité aux mouvements gravitaires. Pour se faire, nous avons effectué une étude statistique, se basant sur la fréquence des glissements cartographiés au niveau de chaque classe. La figure V.4 illustre le pourcentage des mouvements de terrain par classe de faciès, en permettant d'identifier la fréquence d'occurrence de la variable à modéliser dans chacune des classes de la variable prédictive. Il en ressort que les marnes contiennent le plus grand nombre de glissements de terrain avec un pourcentage de 59,05%, puis viennent respectivement : les terrasses alluviales 19,05% ; les grès 13,57% ; et les pélites grèseux 8,33%.

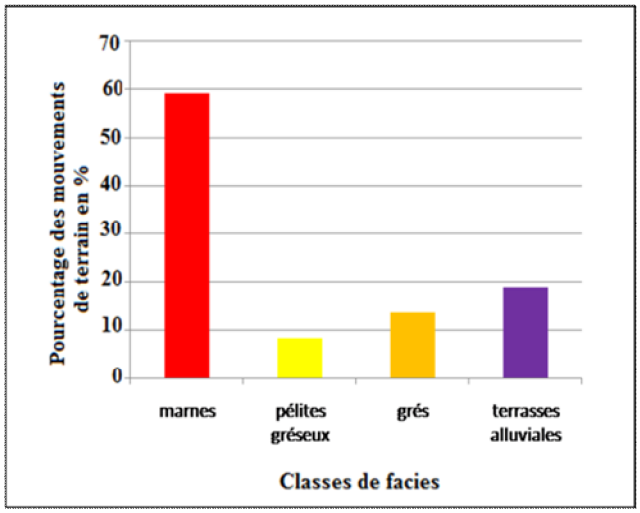


Figure V.4 : Fréquences des mouvements au niveau de chaque classe de lithologie sur toute la surface de la province de Larache.

Enfin, pour chaque classe retenue, nous avons interprété un indice qui correspond à un degrè d'affinité a l'instabilité de terrain, de sorte que l'indice le plus élevé est attribué à la classe qui contient le plus grand nombre de glissements de terrain (4,3,2,1). Le tableau.V.1, résume les indices attribués pour chaque classe de lithologie. Il faut noter que cet indice n'exprime en aucun cas le poids réel de la classe vis à vis de la variable modélisable, mais seulement une estimation préliminaire, avec une large part de subjectivité, de la relation variable prédictif-variable modélisable. Du fait que la genèse de mouvements des sols est liée à plusieurs variables, et que l'étendue de la surface de chaque classe peut faire la différence. Ceci était nécessaire pour l'élaboration d'une base de données la plus structurée et la plus homogène possible.

Tableau V. 1 : Les indices attribués pour chaque classe de lithologie.

Classe	*Surface (Km^2)*	*Pourcentage des MT*	*Indice*
Les marnes	1406,98	59,05%	5
Les terrasses alluviales	595,73	19,05%	4
Les grès	559,46	13,57%	3
Les pélites grèseux	203,03	8,33%	1

1.2. La variable occupation des sols:

1.2.1. L'impact de l'occupation du sol sur la stabilité des versants:

La couverture végétale exerce essentiellement une action phytostabilisante sur les versants à substrat argileux ou à substrat rocheux développant une couverture d'altération argileuse peu épaisse. Elle peut favoriser un ruissellement de subsurface (matte racinaire), etun encrage par enracinement profond, ce qui limite le développement des mouvements de terrain sur les versants à matériel dont les caractéristiques géotechniques sont médiocres (argileux, marneux…).

L'agriculture, en général, est pratiquée sur les pentes basses à très basses, bien que les pentes modérément raides ne soient pas épargnées par endroits. Cependant, les terres agricoles représentent des zones de charge d'eau répétée à des fins de culture, ce qui les rend susceptibles aux instabilités de terrain. Les zones dénudées et à végétation clairsemée montrent une érosion plus rapide et une plus grande instabilité. Par contre lesforêts de réserve ou protégées qui sont recouvertes d'une végétation épaisse sont généralement moins sujettes au processus de mouvements de terrain. La couverture forestière, en général, étouffe l'action des agents climatiques sur les pentes et les protège des effets des intempéries et de l'érosion. Lors de l'absence d'une couverture végétale, ou sa rareté sur les versants, l'effet érosif par ruissellement peut être accéléré, ce qui peut constituer un facteur catalysant.

Généralement, les racines permettent de stabiliser les sols par ancrage vertical, c'est ainsi qu'un système racinaire bien réparti augmente la résistance au cisaillement du matériau de talus.

Cependant, l'effet d'ancrage est limité par la profondeur des racines (F.Arnaud, 2012). Pour cette raison, Berger et al., 2000, dans leur Guide de gestion des forêts de protection contre les risques naturels dans les Alpes (Sud françaises), pensent que la forêt ne peut maîtriser que les glissements d'une profondeur inférieure à 2 mètres. Ils concluent également que sur un glissement déclaré, la forêt n'a que des effets négatifs en augmentant les capacités d'infiltration et l'écoulement hypodermique, et que dans tous les cas, l'action de la forêt reste limitée par la pente (40°).

D'autre part, le système racinaire est accusé de déstabiliser les sols car il crée des cheminements préférentiels pour l'eau d'infiltration. Et les effets de cette infiltration sont aggravés en fonction de la stratigraphie du milieu : si le pendage des couches est conforme à la pente, l'eau infiltrée circule dans le sens de la pente, ce qui favorise le glissement du terrain (Rice, 1977 ; F.Arnaud, 2012).

Selon Berger et al. (2001), la présence d'arbres favorise l'infiltration. Des mesures réalisées dans une forêt artificielle ont montré que les 30 cm de sol créés avaient une perméabilité 10 à 100 fois supérieure à celle des couches inférieures ; cela est un facteur défavorable pour la stabilité des versants. Jean Goguel de l'Académie des Sciences, 1943, accusait les forêts d'être responsables des glissements de terrain : "Ces résultats – la diminution de l'érosion par ruissellement grâce au reboisement – sont obtenus parce que l'eau de pluie, retenue par le tapis végétal, séjourne à la surface du sol un temps suffisant pour s'infiltrer en grande partie, et parce que les racines retiennent les particules qui pourraient être entraînées par les eaux pluviales qui ruissellent. Mais les mêmes facteurs facilitent les glissements de terrain, c'est-à-dire le déplacement lent et progressif d'une tranche épaisse de terrain argileux imbibée d'eau et ramollie". La question de savoir si la lutte contre le ravinement superficiel est compatible avec la stabilisation à long terme des versants fait encore débat à l'heure actuelle (Mériaux, 1984 ; F.Arnaud, 2012).

La forêt, quand elle vieillit, est davantage sensible au vent qui peut déraciner les arbres et perturber le sol (fissures=chablis). Ces chablis créent des zones d'infiltration privilégiées. L'action amplifiée du vent suite au déboisement de parcelles peut expliquer ledéclenchementdes glissements en bordure de coupes forestières. (F.Arnaud, 2012). En effet, le risque de surcharge des terrains par la forêt doit être évoqué en tant que facteur négatif. Pourtant, ce risque est très rare et quasi inexistant (F.Arnaud, 2012).

Les interactions entre la végétation arborée et les instabilités de terrain fait toujours débat et sujet de plusieurs recherches.

1.2.2. La cartographie de l'occupation du sol :

La variable "*occupation du sol*" constitue un paramètre essentiel à la cartographie de la susceptibilité. Les interactions existant entre la végétation (sa nature et sa densité)et les instabilités de terrain peuvent se résumer en deux aspects (Montgomery, 2000 ; Guthrie, 2002 ; Dhakal et Sidle, 2003 ; Glade, 2003 ; F.Arnaud, 2012): les effets sur le cycle de l'eau et les effets mécaniques sur les sols. La forêt est également étudiée comme indicateur, pour reconnaître les sols instables, encore elle peut être utile pour dater les processus géomorphologiques.

La réalisation de la carte d'occupation des sols s'est appuyée sur plusieurs sources. Ainsi différents types de données, en termes de qualité/précision, et type d'occupation du sol et de son évolution sont-ils consultés. De ce fait, nous nous somme référés à :

- L'information concernant les essences forestières mises à notre disposition par le Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification (HCEFLCD). Cette couche, a subi une actualisation par interprétation visuelle des données satellitaire très haute résolution.
- Les traitements des données satellitales ont été réalisés sur le logiciel "*ERDAS Imagin.11*" en utilisant pour l'analyse des données de Landsat.ETM^{+}.
- L'intégration des résultats dans un SIG, ainsi que la construction et le croisement des données spatiales ont été possibles grâce aux potentialités de traitement qu'offre le logiciel Arc/Info 10.3.
- La mise en forme et la création d'informations spatiales à partir de données satellitaires passe par plusieurs étapes successives à savoir :
  - ✓ Procéder à des corrections géométriques par une géo-référenciation en degrès décimaux des données ;
  - ✓ Effectuer une projection cartographique dans le but de rendre compatibles les données de la carte topographique avec celles de la classification des données Landsat ;
  - ✓ Cartographier les données d'occupation des sols à partir de la carte topographique ;
  - ✓ Ce travail a été complété par des données collectées sur le terrain lors de plusieurs visites.

la carte d'occupation des sols, que nous avons réalisé, se compose essentiellement de trois couches, à savoir :

- une couche qui contient les essences forestières et les terrains agricoles. Cette couche a fait l'objet de plusieurs fusionnements et ajustements dans un souci de simplification de la lecture.
- une deuxième couche qui contient les zones urbaines, les terrains nus et les surfaces d'eau. Celles ci, ont été reconnues par la classification multi-spectrale supervisée des données satellitaires Landsat 7 ETM^{+}.
- la troisième couche présente le réseau routier qui a été extrait directement à partir de la couverture topographique, puis actualisé en se référant aux images satellitaires récentes. (FigureV.5)

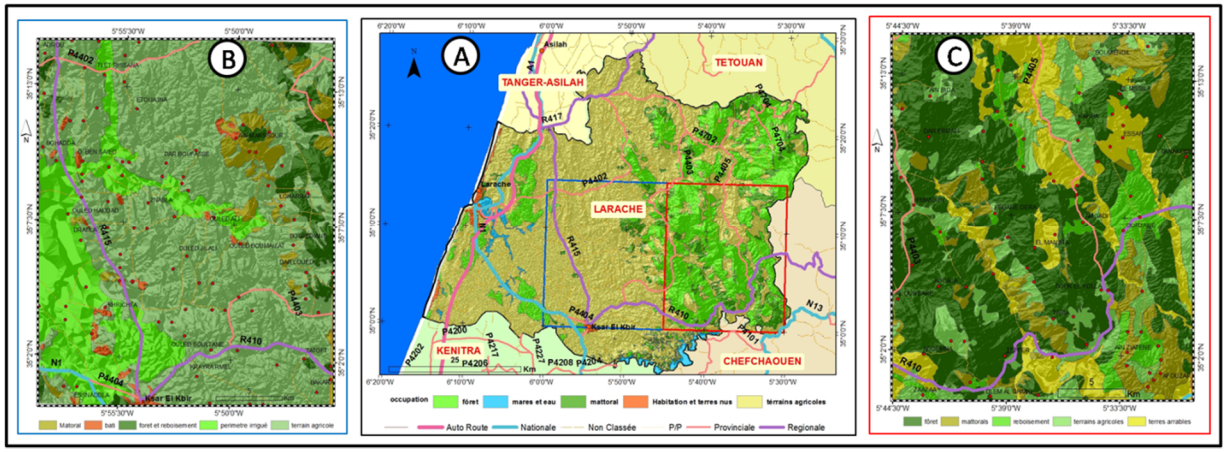


Figure V.5: Cartes d'occupation des sols *; A, échelle provinciale (province de Larache) ; B, Carte de Ksar El Kebir ; C, Carte d'El Quola.*

Les terrains adjacents à la section du cours moyen de l'Oued Loukkos sont, quant à eux, soumis à une activité agricole d'irrigation intense et productive, de sorte que leurs valeurs naturelles se retrouvent réduites à une frange étroite (de 0 à 10 mètres) proche du lit mineur, coïncidant pratiquement avec les berges. La partie Ouest de la région constitue une importante plaine alluviale dont l'origine remonte au Pléistocène supérieur, et dont les sols se composent de sables limoneux ou argileux, de limons et de sols hydromorphes, le tout couronnant les formations du Pliocène. Dans la zone d'estuaire, les sols sont halomorphes ou salins, mais de composition plus variée dans les terrains légèrement surélevés.

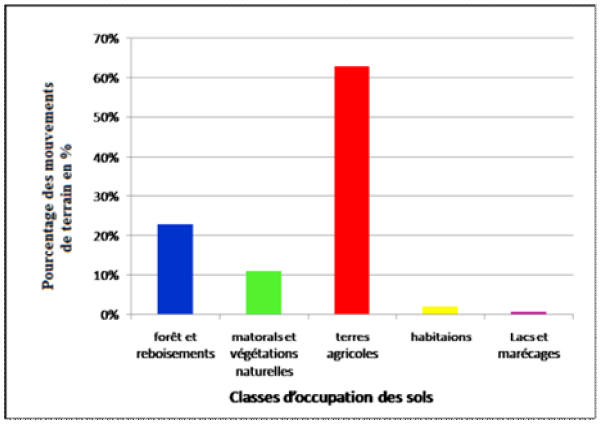
La relation entre la distribution spatiale des différents mouvements de terrain, au niveau de la province de Larache, et les principales classes d'occupation des sols est supposée liée surtout à l'activité humaine qui se manifeste par des actions destructives qui se résument dans la dégradation de la couverture végétale et les effets de l'érosion hydrique, la charge en tête des versants par les travaux de construction et les remblais, le débutement des pieds des versants par les déblais et l'exploitation des carrières, les travaux de terrassement, l'infiltration localisée par la mise en place des fosses septiques, et les fuites des canalisations, la modification du ruissellement de surface par les travaux de construction et l'installation du tracé routier…etc ; ceci bien que l'action de reboisement mené par la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification qui restent encore modestes.

En globalité, le bassin versant du Loukkos subit une importante érosion des sols, d'une part à cause de paramètres naturels défavorables comme le relief, le climat, la géomorphologie ou la faible couverture végétale, entre autres, et d'autre part sous l'effet de la forte pression anthropique sur les sols et la végétation, caractérisée par la déforestation, le surpâturage et des pratiques agricoles inadéquates. Les mesures effectuées pour évaluer le colmatage des réservoirs et celles réalisées dans des stations hydrologiques pour quantifier les sédiments en suspension transportés indiquent une perte de sols estimée entre 1150 et 3900t/km2/an dans le bassin versant (*Rapport de l'Action 2 du projet IDAR*[1]*, relative au "développement durable transfrontalier des bassins versants"*).

Cependant l'intégration de l'activité humaine dans cette modélisation est difficile; de ce fait, on s'est contenté d'intégrer la dépendance de la stabilité des versants au type d'occupation du sol. Par conséquent, nous évaluerons dans cette section le rôle de la végétation dans la stabilité des versants à travers une cartographie de l'occupation des sols de la province de Larache.

1.2.3 Relation de l'occupation du sol avec la variable à modélisé MT:

L'étude statistique se basant sur la fréquence des instabilités de terrains cartographiés au niveau de chaque classe d'occupation du sol est illustrée sur la FigureV.6 par le pourcentage des mouvements de terrain recensés au niveau de chaque classe de la variable prédictive en question. Il en ressort que les terres agricoles sont les plus touchées parles instabilités de terrain avec un pourcentage de 63%, puis viennent respectivement : la forêt et le reboisement 23% ; les matorrals et les végétations naturelles 11% ; les habitations 2% et les lacs et marécages 1%.



*FigureV.**6** : Fréquences des mouvements de terrain par classe d'occupation du sol.*

Sur la base de l'étude statistique, nous avons attribué, pour chaque classe d'occupation des sols, un indice correspondant à un degrè d'occurrence probable vis à vis de l'aléa rupture de pente, de sorte que l'indice le plus élevé est attribué à la classe qui contient le plus grand nombre de glissements de terrain (5,4,3,2,1). Le

[1]*Plan transfrontalier d'actions pour la gestion du changement et transformation sociale Málaga-Maroc, mis en œuvre par le Conseil provincial de Málaga et financé par l'Union européenne – fonds FEDER – dans le cadre du Programme de coopération transfrontalière Espagne-Frontières extérieures (POCTEFEX).*

tableau.V.3, résume les indices attribués pour chaque classe d'occupation du sol. Tout de même, cet indice ne traduit pas le poids réel de la classe en question.

Tableau V. 2 : Les indices attribués pour chaque classe d'occupation du sol

Classes	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km^2)***	***Indice***
Terrains agricoles	63%	1783,089	5
Forêt et reboisements	23%	778,52	4
Matorrals et végétations naturelles	11%	133,68	3
Habitations	2%	46,57	2
Lacs et marécages	1%	18,69	1

L'occupation des sols au niveau de la province de Larache est caractérisée par une forte empreinte de l'activité humaine qui se manifeste principalement par une dégradation du couvert végétal et par le déboisement par brûlis, ce qui explique l'expansion des terrains agricoles au dépriment de la forêt et de végétation spontanée. Jusqu'à une date relativement récente (les années 60 et 70), des difficultés de pénétration étaient renforcées par la densité de la végétation spontanée : la forêt primaire est formée d'arbres puissants dominant une strate arbustive très dense. De cette végétation climacique, il ne reste plus aujourd'hui que des vestiges (Fay Gérard, 1979), suite aux incendies estivaux qui ravagent les bois de la région chaque année, malgré la vigilance des autorités locales : la coupe sauvage de la forêt pour le bois de chauffage ou le charbon, le surpaturage....

L'impact des incendies naturels et du défrichement d'ordre anthropique a de graves conséquences sur la stabilité des versants du fait qu'ils rendent les effets de l'érosion hydrique, le ravinement, le sapement de berges et le développement de badlands beaucoup plus exagérés. De plus, la déstabilisation mécanique des pieds de versant est accentuée par l'occupation des têtes de versant par les constructions et l'aménagement routier, ainsi que l'exploitation des granulats de grès en carrière (cas de Sab El Ma).

Depuis 1994, le Plan Directeur de Reboisement (PDR) lancé par la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification préconise des plantations selon les courbes de niveau, comme l'ont préconisé plusieurs agronomes (Krlnard et Kennedy, 1987). Cette pratique s'avère efficace dans les secteurs relativement limités où elle est pratiquée. Cependant cette pratique reste trop limitée à des surfaces restreins.

1.3. La variable hydrogéologie:

Les eauxsuperficielles constituentl'essentiel du potentiel de la zone d'étude (plus de 90%), suite à la dominance des faciès imperméables qui affleurent en surface sur une grande partie de la région. Tandis que les potentialités des ressources en eau souterraines sont limitées aussi à cause de la dominance des faciès imperméables ou peu perméables (marnes, argiles, schistes ou flysch), une exception est à noter au niveau des plaines et des vallées alluviales et quelques rares petits bassins isolés vers l'Ouest de la région. Ces caractéristiques hydrogéologiques font de la région l'une des zones les plus susceptibles aux instabilités de terrains.

La forte intensité des précipitations, la prédominance des sols imperméables à faciès argileux et schisteux–argileux, et le relief accidenté favorisent le ruissellement et limitent l'importance des nappes souterraines. Le régime des cours d'eaux étant irrégulier présente généralement un caractère torrentiel (Chaouni, 1999 ; Sossey Alaoui, 2005) ; c'est ainsi que les écoulements des Oueds se caractérisent par des débits journaliers spécifiquement importants, engendrant des crues en hiver, et par des débits d'étiages faibles ou nuls.

Ces caractéristiques hydrogéologiques et climatologiques font de la région l'une des zones les plus susceptibles aux instabilités de terrains.

La variable hydrologie/hydrogéologie est un agent capital dans le déclenchement des processus gravitationnels. Le régime de l'écoulement en surface ou sub-surface est une fonction de la nature des terrains et de la pente. Elle est souvent responsable d'actions érosives (ravinement, sapement de berges, érosion régressive, etc.…) engendrant la déstabilisation des versants. Le phénomène d'érosion par sapement de berges est considéré aussi comme un facteur déclenchant des glissements de terrain dont les dépôts alimentent les cours d'eau et par conséquent les retenues des barrages (Ait Brahim et al., 2002, Sossi Alaoui, 2005).

1.3.1 La cartographie du réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de cette partie de la chaîne rifaine a fait l'objet de plusieurs travaux (Mansour.M, et al., 2005 ;F.Sossy Aloui, 2005; Emran et Abrat, 2009, M.Tahiri et al 2014). Dans cette étude, nous avons digitalisé le réseau hydrographique à partir des cartes topographiques de 1/100.000 (Larache, Ksar El Kebir, Chaouen, Ouezzane et Souk Larbaa) (FigureV.8). Les principaux cours d'eau traversant la zone du Lokkous sont :

- Oued Loukkous qui prend sa source à proximité de Jbel El Khizana (province de Chefchaouen), s'écoule vers l'Ouest en direction de l'océan Atlantique, avec un apport moyen de 1270 hm^3/an. Lors de son parcours, l'Oued draine un grand nombre d'affluents, entre lesquels figurent sur la rive droite de son secteur amont les Oueds Tazarine, Mensoûra, Marhrîz, Azla, Sab El Mâ, Mgaz El Tirane et Sidi'mar. En aval du barrage "Oued Al Makhazine", qui correspond aux secteurs moyens et bas du Loukkos, les principaux cours d'eau se jetant dans le fleuve sont les Oueds Tahrawte, Ouarour, Makhazine, Boufekrane-Al Tala, BouSafi, Tcharib, Al Hamman, et finalement l'Oued Messous qui le rejoint à peine 3 kilomètres avant l'embouchure du Loukkos.
- Oued Dradère-Souiere avec un apport moyen de 200 hm^3/an.

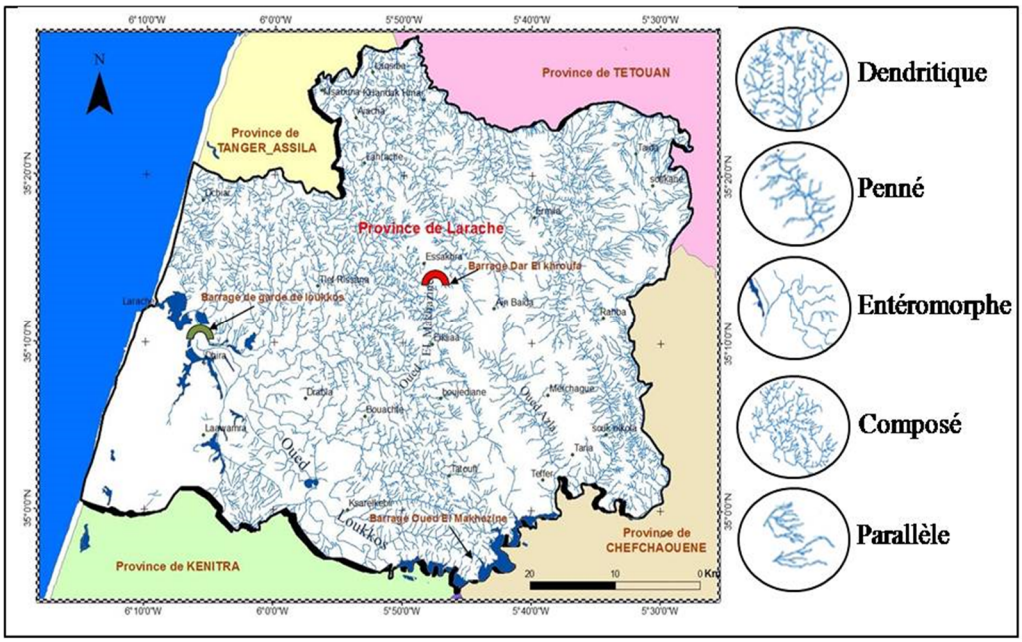
Le régime de leurs apports est caractérisé par une forte irrégularité interannuelle. Les débits d'étiage sont généralement nuls, à l'exception des cours d'eau qui drainent la nappe de Rmel (Sakh-Sokh, Smid El Ma et El Kihel) avec un débit moyen d'environ 500 l/s et ceux drainant la nappe de Dradère- Souière. (D'après une étude faite par l'Agence Hydraulique du Bassin Loukkos).

Sur la partie haute de la zone, règnent des faciès imperméables ou peu perméables qui ne permettent pas l'infiltration des eaux et la constitution de formations aquifères importantes ; c'est pour cela qu'on voit une densité élevée du réseau hydrographique dans cette partie Est (FigureV.8). Cependant, dans le bas Loukkos vers l'Ouest et la bande côtière, on trouve des aquifères importants ; les eaux s'infiltrent dans les terrains sableux trop perméables formant des eaux souterraines qui y sont contenues dans un ensemble d'aquifères à nappes libres.

Certains auteurs (tel que Thauvin, 1971) ont décrit trois sections au niveau du bassin versant Loukkos en fonction de la pente et des caractéristiques du chenal :

- Cours supérieur (amont) : d'une longueur d'environ 40 km, il se caractérise par un régime ou aspect torrentiel ; sa pente moyenne est supérieure à 2 %.
- Cours moyen (intermédiaire) : le chenal s'y écoule sur 90 km et se caractérise par une morphologie ondulée et une pente comprise entre 1 % et 2 %.
- Cours inférieur (aval) : situé entre le réservoir Oued Al Makhazine et l'estuaire, il atteint une longueur de 50 km. Cette section se localise dans une plaine où la pente est quasi-nulle, par conséquent l'influence marine se fait sentir dans le lit mineur jusqu'à plusieurs dizaines de kilomètres en amont de l'embouchure.

L'analyse des critères spatiaux, morpho-métriques et topologiques a permis d'isoler des sous-réseaux aux caractéristiques homogènes (B. Deffontain, 1990) et de les associer à différents types (FigureV.7): dendritique, rectangulaire, parallèle, penné, entéromorphe, composé...



FigureV.7: Cartes du réseau hydrographique au niveau de la province de Larache.

1.3.2. Extraction à partir du MNT et classement du réseau hydrographique sur ArcGIS :

La modélisation du réseau hydrographique fait sur ArcGis consiste simplement à reconstituer de façon numérique et détaillée le flux de l'eau à la surface. La méthodologie générale de modélisation des bassins hydrographiques utilisée dans ce cadre est basée sur les travaux de Jenson Domingue, 1988. Trois étapes préliminaires de traitement qui ont été réalisés de façon séquentielle sont :

- Correction du MNT en remplissant les fosses qui sont communément causées par des imperfections dans le modèle ;
- Création d'une carte de direction de l'écoulement : cette étape consiste à définir la direction de l'écoulement en chaque cellule du MNT. La direction de l'écoulement est codée selon un système numérique simple.
- Création d'une carte de l'accumulation de l'écoulement : cette étape consiste à calculer, à partir de la carte de direction du drainage, le nombre de cellules du MNA qui se draine vers une cellule donnée.

Par la suite, nous avons pu modéliser le réseau hydrographique, en fixant un seuil minimum (value>500) sur la carte d'accumulation du drainage. La valeur du seuil a été déterminée en comparant la carte d'accumulation du drainage avec le réseau hydrographique extrait des cartes topographiques. Le réseau hydrographique ainsi modélisé est représenté par une carte matricielle, que nous avons transformé en carte de polylignes (vectorielle), et sur laquelle nous avons hiérarchisé les différents cours d'eau selon l'importance de leur accumulation. Quatre ordres ont été définis dans l'ensemble de la région. Ainsi la classe "1" regroupe-t-elle les cours d'eau principaux qui sont en principe permanents : les Oueds Loukkos, Oued El Makhazin, Oued Ouarour, Oued Dradère-Souiere et Oued Azla ; la classe "2" regroupe les 1ers affluents permanents à temporaires des cours d'eau de la classe1 ; et les deux classes "3" et "4" regroupent tous les affluents qui sont temporaires (FigureV.8)

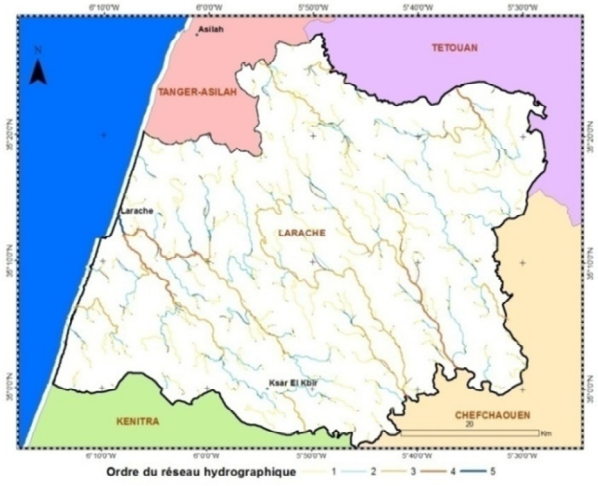


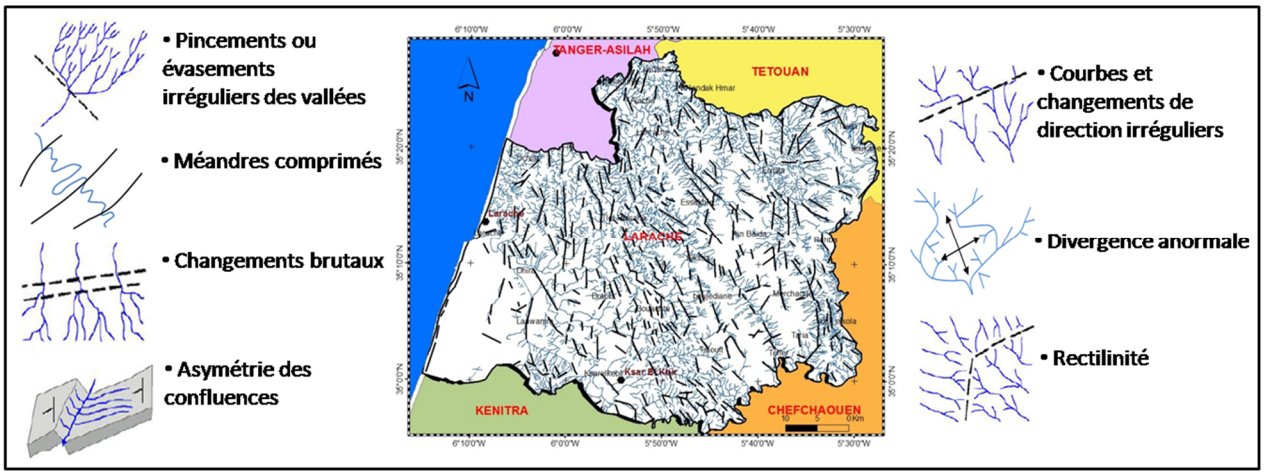
Figure V.8: Classification du réseau hydrographique extrait du MNT sous ArcHydro

Les cours d'eau de la classe 2 ont souvent une direction oblique, ils prennent la direction des cours d'eau de la classe1 associé ; Il s'agit des directions SE-NW à NNW-SSE. Les cours d'eau de la classe 3 et 4 ont des directions extrêmement variées : N-S, NW-SE, NNW-SSE, NNE-SSW, E-W, ENE-WSW, WNW-ESE.

1.3.3. Les anomalies du drainage:

Les anomalies de drainage traduisent la différence entre l'écoulement théorique (du point le plus haut vers le point le plus bas, suivant la direction de plus grande pente) et l'écoulement réel observé. En effet, des réseaux hydrographiques montrent souvent des écoulements obliques et/ou opposées à l'écoulement théorique. (FigureV.9)

L'analyse des paramètres morphométriques est susceptible d'apporter un éclairage plus précis sur la morphodynamique d'un terrain étudié. L'analyse des anomalies de drainage est l'un des paramètres clefs de l'analyse morphostructurale. Les anomalies de drainage sont définies comme une déviation locale du drainage régional et/ou du style ou modèle de ruissellement et cela en accord avec la structure régionale et/ou topographique (Howard, 1967). Sur le terrain, ces formes peuvent se manifester sous plusieurs aspects et sous différentes formes : asymétrie des confluences, changements de direction, rectilinéarité, divergence anormale, changements typologiques, etc. (Deffontaines et Chorowicz, 1991 ; Ollier et Pain, 2000). Ces anomalies de drainage peuvent avoir des origines structurales ou lithologiques (alternance roches dures et tendres) et peuvent être aussi induites par des phénomènes d'érosion (Deffontaines et Chorowicz, 1991 ; Ben Hassen, 2014).



FigureV.9 : Anomalies du réseau hydrographique.

Les directions des anomalies cartographiées au niveau de la zone d'étude sont variées (E-W; WNW-ESE, NW-SE, NE-SW, E-W, ENE-WSW, NNW-SSE, N-S). La rosace des fréquences des directions montre la prédominance des directions WNW-ESE ou E-W (FigureV.10). Ils traduisent les différentes formes suscitées, et ils ont des origines à la fois structurales au niveau des limites de chevauchement entre les unités structurales, et lithologiques suite à une alternance entre les grès numidiennes avec les terrains à faciès marneux de l'unité de Tanger. L'érosion a aussi un grand effet puisque la région connait une grande activité érosive.

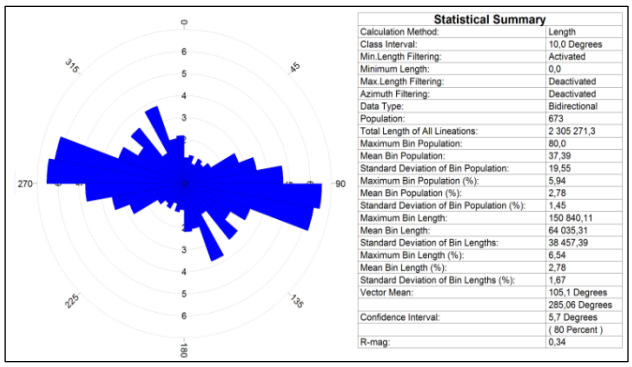
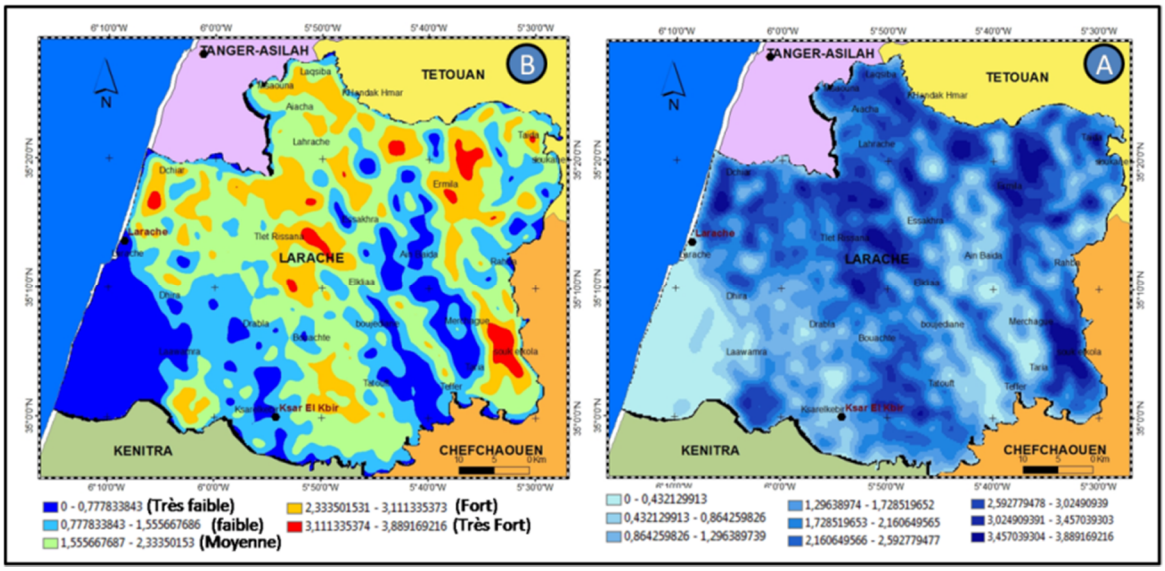


Figure V.10 : Rosaces directionnelles des Anomalies du réseau hydrographique.

1.3.4. Intégration de la variable réseau hydrographique dans le modèle:

1.3.4.1. Carte de densité du réseau hydrographique :

L'intégration de cette variable dans la modélisation de l'aléa mouvement de terrain a été largement discuté par plusieurs auteurs (Pavel et al., 2011 ; Liu et al., 2011 ; Atkinson et Massari, 2011 ; Van Den Eeckhaut et al., 2011 ; Lara et Sepùlveda, 2010 ; Das et al., 2010). Pour notre cas, le réseau hydrographique sera incorporé dans notre étude via sa densité telle que définie parHorton, 1945. Pour tout élément linéaire,la densité correspond au kilométrage linéaire cumulé des cours d'eau reconnus par unité de surface (km²). Elle sert à matérialiser le degré de développement d'un réseau hydrographique, par le calcul de longueur totale (Km) et par unité de surface (Km²). Elle permet d'exprimer les différents phénomènes physiques du réseau hydrographique correspondant aussi bien à la part relative de l'écoulement superficiel et souterrain, qu'à la vigueur du relief. Elle est calculée à l'aide du module "*Spatial Analyst Tools*" d'ArcGis 10.1, via la fonction "*Line Density*". La carte de densité réalisée tient compte aussi bien de la longueur cumulée du réseau de drainage, que de la présence des nœuds hydrographiques (affluents et confluents); Mastere, 2011. Cette carte a été élaborée en 5 classes de densité par rééchantillonnage et simplification de la première carte obtenue automatiquement (FigureV.11). Cette dernière est rendue plus lisible par reclassification des 9 classes en 5 classes de densité à savoir : très faible ; faible ; moyenne ; élevée ; et très élevée.



FigureV.11 : Cartes de densité du réseau hydrographique *au niveau de la province de Larache.A: carte non classifiée (Natural Break); B: carte classifiée (Equal Interval).*

1.3.4.2Relation de l'hydrogéologieavec la variable à modélisé MT :

Afin de comprendre l'implication des phénomènes hydrologiques dans le conditionnement desmouvements de pentes, nous avons procédé à l'intersection et la superposition des phénomènes inventoriés VM avec la carte de densité du réseau hydrographique DRH. Ainsi la figureV.12 illustre-t-elle la fréquence des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité du réseau hydrographique de la province de Larache. Elle montre que des mouvements de terrain sont abondants au niveau des classes trop élevé, élevé et moyenne, avec 83,85% de la totalité des instabilitésrecensées,il en reste 16,15% au niveau desclassesà densité faible et très faible.

Le réseau hydrographique, par sa densité, exprime plusieurs processus physiques, parmi lesquels la part relative de l'écoulement superficiel, l'écoulement souterrainet traduit la vigueur des reliefs (Mastere, 2011).

Cela parait normal et logique du fait que les classes à DRH trop élevée, élevée et moyenne occupent une grande superficie. Aussi la plupart des mouvements gravitaires sont-ils liés aux phénomènes hydrographiques : écoulements, ruissellements, ravinement, sapements de berges..., ce qui laisse croire que le réseau hydrographique de la région contrôle l'occurrence des mouvements de terrain par l'écoulement de surface, de même queles processus d'infiltration et de circulation souterraine lors des périodes notablement pluvieuses.

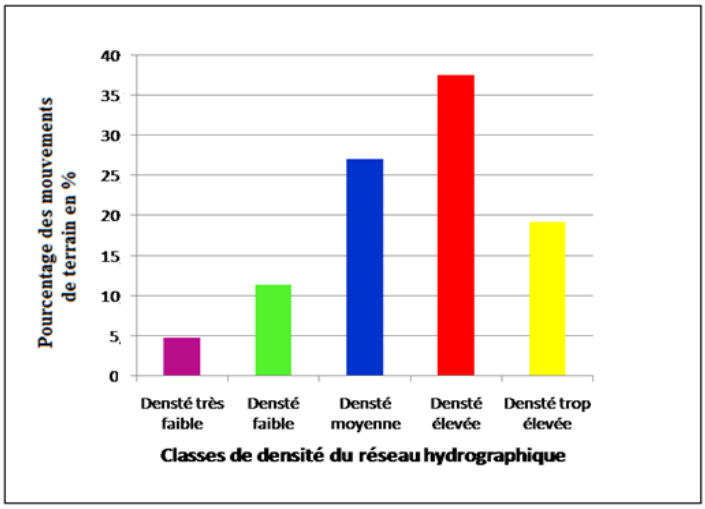


Figure V.12: Fréquences des mouvements de terrain par classe de densité du réseau hydrographique.

Selon l'abondance des mouvements, nous avons attribué pour chaque classe de densité du réseau hydrographique un facteur exprimant l'occurrence possible de chaque classe DRH envers l'instabilité du terrain, de sorte que l'indice le plus élevé est attribué à la classe DRH qui contient le plus grand nombre de glissements de terrain (5,4,3,2,1). Le tableau.V.4, résume les indices attribués pour chaque classe de densité du réseau hydrographique.

Tableau V. 3 : Les indices attribués pour chaque classe du réseau hydrographique

Classes	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km^2)***	***Indice***
Densité très élevée	19,24%	364,02	3
Densité élevée	37,53%	722,29	5
Densité moyenne	27,08%	721,08	4
Densité faible	11,40%	574,67	2
Densité très faible	4,75%	386,78	1

1.4. La fracturation :

L'activité tectonique héritée et récente peut intervenir sur un mouvement de terrain dans des zones déjà fragilisés, soit en pré-conditionnant le matériel soit en tant que déclencheur lors d'une crise sismique (Compina, 2005). L'occurrence des mouvements gravitaires se trouve généralement accentuée à proximité des résurgences. En effet, l'eau s'infiltre à travers les diverses failles entraînant l'accroissement de pressions interstitielles, ce qui réduit la résistance au cisaillement des sols (Mansour & Ait Brahim, 2005). Une fois arrivé à saturation, le mouvement en masse est déclenché avec formation d'un plan de cisaillement profond.

1.4.1. Le cadre tectonique régional :

Le Nord du Rif est marqué par un soulèvement côtier de quelques ~0.1-0.2 mm/an sur l'ensemble de la côte Méditerranéenne (Cadet et al., 1977 ; Meghraoui et al., 1996 ; Morel and Meghraoui, 1996 ; El Kadiri et al., 2010, A.Poujol, 2014). Associées à ces soulèvements, une série de failles normales, à composante parfois transtensives, N-S à NNE-SSW déforment la partie supérieure de la croûte, sous la forme de horsts et grabens à remplissage quaternaire, jusqu'à un (ou plusieurs) niveau de détachement en profondeur hérité de la phase de mise en place des nappes de chevauchement. De plus, les auteurs expliquent le soulèvement régional par la présence de larges plis dans la partie supérieure de la croûte. Quelques failles normales alignées avec le trait de côte et à fort pendage vers le bassin d'Alboran ont été décrites le long de la marge maghrébine en terre et en mer (Ait Brahim, 1991 ; D'Acremont et al., 2014 ; Mustapha Meghraoui et al., 1996 ; Romagny et al., 2014). Les deux failles majeures de Nékor et Jebha de direction ~NE-SW, à priori

responsables de la mise en place des nappes de charriage vers le SW au Miocène (Chalouan et al., 2006), recoupent de façon oblique la chaîne du Rif. L'activité sismique associée à ces failles est quasiment inexistante et leur activité au Quaternaire reste encore débattue (Morel, 1987 ; Aıt Brahim et al., 1990 ; Tejera De Leon, 1997 ; Galindo-Zaldivar et al., 2009; A.Poujol, 2014). Grâce à la reconstitution des topographies anciennes plio-quaternaires et des décalages observés sur les terrasses villafranchiennes, Meghraoui et al., 1996, déduisent tout de même des vitesses de raccourcissement de l'ordre de 2 mm/an sur la faille de Nekor et de Jebha depuis le Pliocène.

La faille de Jebha semble se prolonger en mer Méditerranée sur le pli-faille de la ride d'Alboran avec une géométrie en faille inverse, et sur le littoral Atlantique, au Sud de Larache, où elle semble se comporter comme une faille sénestre s'amortissant sur des plis orientés N140 (Meghraoui et al., 1996 ; J.T De Leon, 1997).

Le Sud du Rif est caractérisé par une compression associée à un décrochement sénestre le long des plis et chevauchements orientés ~E-W. Ce front de chevauchement actif au Pliocène marque la limite entre la chaîne rifaine et le Moyen-Atlas/Meseta. Il affecte les dépôts Plio-Quaternaires et semble se propager actuellement vers le Sud par-dessus les bassins d'avant-pays (Saiss, Rharb,...) eux-mêmes en extension (Chalouan et al., 2006). Les études de néotectonique de Morel,1992, 1987, indiquent la présence d'une faille normale ~E-W à pendage Nord dans la région de Tétouan et une succession de plis parallèles orientés NNW-SSE jouant comme des plis de propagation de rampes (Zakir et al., 2004). Leroux-Mallouf, 2013 suggère une activité tectonique récente dans la région de Larache se traduisant par des plis associés à des failles aveugles de direction N-S/NNW-SSE hérités de déformations plus anciennes (A.Poujol, 2014). La déformation Quaternaire dans le Rif semble donc gouvernée globalement par des directions de raccourcissement NNE-SSW, N-S et NNW-SSE (Aït Brahim and Chotin, 1984 ; De Lamotte et al., 1991 ; Morel, 1987), traduisant soit la poursuite des mouvements de nappes vers le Sud-Sud-Ouest (de Lamotte et al., 1991 ; Morley, 1992), soit la convergence des plaques lithosphériques africaine et eurasienne, soit la concomitance des deux. En résumé, les études de tectonique active présentées ici suggèrent que l'activité tectonique actuelle dans la région Rif-Bétique-Alboran résulte d'une combinaison de:

(i) Failles décrochantes dextres ESE, failles sénestres NE à N et failles inverses ENE permettant le transfert des déformations depuis la zone de faille de Gloria jusqu'à la marge Nord-Algérienne.

(ii) Failles transtensives dextres ~E-W localement dans les Bétiques associées à du soulèvement.

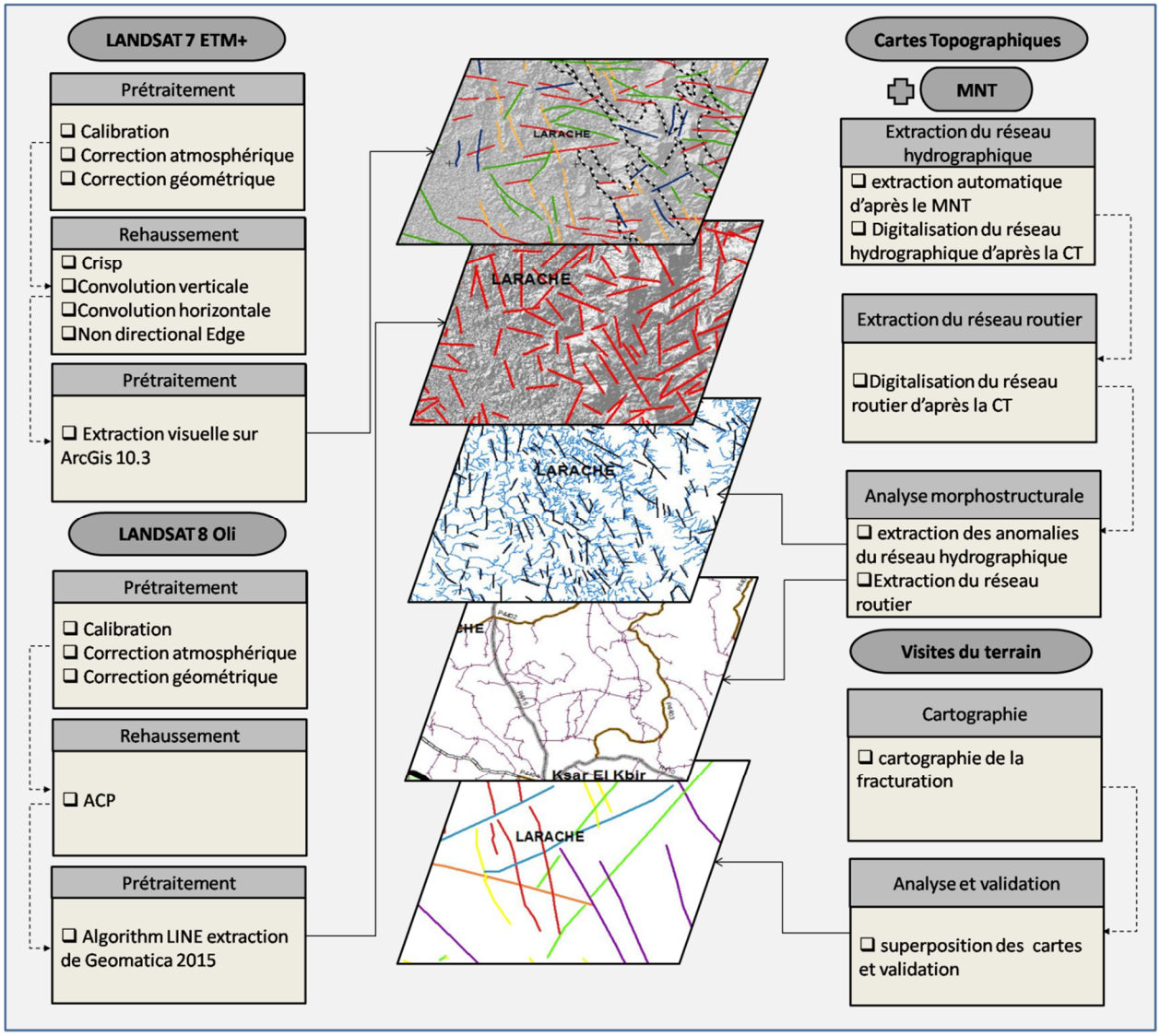
(iii) Failles transtensives sénestres ~NE-SW localement dans le Rif associées à du soulèvement. La déformation dans la région Alboran semble donc se distribuer le long de nombreuses failles lentes qui se distribuent spatialement sans organisation apparente ni relation évidente avec la dynamique interne de la région.

1.4.2. La cartographie de la fracturation au niveau de la région de Larache :

Pour établir la carte d'indice liée à la fracturation, nous avons eu recours à une cartographie multisources et qui se résume en trois grandes étapes :

- Dans une première étape, nous procéderons à la localisation et l'extraction des linéaments à partir de techniques de traitements d'image (rehaussement d'image à l'aide de composé coloré et d'analyse en composantes principales, filtrage d'image création d'images binaires). L'extraction des linéaments dans notre travail a été réalisée en utilisant deux méthodes : (**i**) par la digitalisation des linéaments en analysant l'imagerie satellitaire Landsat7 ETM+ (et en associant les techniques des filtres directionnels) sur "Erdas" (FigureV14). (**ii**) l'extraction automatique des linéaments grâce à l'algorithme du logiciel "Géomatica" (FigureV.17).
- L'extraction de la fracturation récente qui a affecté la région basée sur l'analyse morphostructurale de la carte hypsométrique couplée à celles des anomalies du réseau hydrographique (cf. paragraphe1.3.3).

- L'analyse statistique des linéaments à l'aide de rosaces directionnelles et l'analyse spatiale. Ceci permettra de déterminer les orientations structurales, et les variations spatiales des linéaments par cellules (variations du nombre de linéaments et du nombre d'entrecroisements par cellules).
- La numérisation de toutes les failles bibliographiques, notamment celles en provenance de la carte géologique de la chaîne rifaine 1/500000 (Suter, 1980) et des travaux d'Ait Brahim, 1991, Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003 et de Chalouan et al, 2008…etc.
- La confrontation des résultats aux données géoscientifiques existantes (structurales, lithostratigraphiques, géochimiques, et gîtes minéraux) dans un SIG. Ce qui permettra d'une part, l'identification des linéaments déjà connus et, d'autre part, l'interprétation des linéaments nouveaux et la réalisationd'un lien géologique avec les données structurales de terrain.
- La correction de la carte des linéaments, et l'interprétation des résultats à partir de l'analyse morphostructural ; travaux antérieurs ; et la vérité de terrain. La figureV.13 résume la démarche de la réalisation d'une carte de fracturation.
- La réalisation de la carte d'indice de fracturation (carte de densité). Pour se faire, nous avons eu recours au module Spatial Analyst Tools d'ArcGis 10.1, par l'utilisation de la fonction "Line Density". Elle permet de calculer la densité linéaire (longueur cumulée) de tout élément linéaire (en occurrence les failles) par unité de surface (Km^2).



FigureV.13:la démarche adoptée pour la réalisation de la carte de fracturation *au niveau de la province de Larache.*

1.4.2.1. Extraction semi-automatique des linéaments à partir de l'analyse visuelle de l'image Landsat7 ETM+:

L'objectif de ce paragraphe est de donner une signification structurale par interprétation d'une carte de linéaments au niveau de la province de Larache extraite par les méthodes de traitement d'image Landsat ETM^{+}.

a) Notion de linéaments:

Un linéament décrit toute structure ayant un tracé rectiligne ou curviligne de dimension variée et dont l'interprétation a une signification géologique. Il correspond à un alignement structural (accident géologique) au niveau de la croûte terrestre (généralement une faille) dont l'influence peut se faire sentir pendant une longue période de temps (O'Leary, 1976 ; Richards, 2000). Il peut être tracé à partir de l'information topographique, hydrographique ou géophysique, ou par photo-interprétation des images aériennes ou satellites.

L'interprétation de linéaments topographiques remonte au début du siècle avec les travaux de Hobbs, (1904 et 1912); Marshall, 1978; O'Driscoll, 1990; Richards, 2000; Stéphane Faure, 2001).

Deux facteurs sont déterminants pour identifier un linéament :

- *L'observateur* : le jugement pausé par l'observateur (interprétatif et qualitatif). Il dépend de la limite de détection de l'œil (± 0,1 mm), de ses connaissances, du sens de l'observation (qui doit être objectif);
- *La qualité de l'information* : les critères propres à l'information utilisée sont notamment la résolution (nombre de pixels par unité de surface (m^2 ou km^2)), l'échelle du levé ou de la photo, et la qualité du traitement sur l'image ou aussi les données géophysiques. L'information de la base de données et les discontinuités dans les images, peuvent être quantifiées si des conditions et des paramètres très précis sont présents.

La signification des linéaments géophysiques nécessite une démarche d'étude qui se résume généralement en trois étapes successives ; Stéphane Faure, 2001 :

- Le traçage et la caractérisation du linéament en termes géométriques (coordonnées, longueur, largeur, direction, courbure, intensité) ;
- La signification du linéament en termes géologiques (faille, contact lithologique, zone d'altération);
- L'interprétation de l'ensemble ou d'une famille de linéaments dans un contexte tectonique ou gîtologique, ou dans une région donnée.

b) Rehaussement de l'image satellitaire et digitalisation des linéaments :

L'utilisationdes images satellitaires constitue un moyen indispensable par son aspect synoptique à l'identification et la cartographie des différentes structures géologiques et morpho-structurales au niveau de la province de Larache dont plusieurs régions sont d'accès difficile.

Cependant, la détection des linéaments sur des images satellitaires peut être influencée par certains facteurs d'ordre climatique, phénologique, hydrique ainsi que par la source d'éclairement au moment de l'acquisition des données. Il faut également noter que la qualité visuelle d'une image dépend des bandes spectrales utilisées, de la date de prise de vues et de l'échelle (Tanguay et Seuthé, 1983). À cela, s'ajoutent l'étalonnage du capteur, les effets atmosphériques et la géométrie de visée qu'il faut prendre en considération.

Les données utilisées proviennent du satellite Landsat-7 ETM+ dont la diversité des canaux fournit à l'interprète une multitude d'informations à manipuler (8 bandes spectrales). Quatre images ont été utilisées, prises le 20 Juin 2006 à 10 heures, l'éclairement solaire provenait de l'est. Le mois de juin correspond à la période où l'activité végétale est développée, et où la structure du socle influence beaucoup la végétation ; de ce fait, le rehaussement des linéaments est donc plus aisé. De plus, les données Landsat présentent l'avantage de bien faire ressortir les linéaments à cause de la basse valeur de l'angle solaire, de la suppression des détails spatiaux gênants et de la couverture régionale (Sabins, 1986).

Le rehaussement des discontinuités "images" assimilé à des linéaments géologiques a été assuré par une interprétation visuelle des images brutes et traitéesà l'aide de filtrages (spatiaux et directionnels) facilite l'accentuation des discontinuités lithologiques et structurales assimilables aux linéaments. Parmi les filtres utilisés, nous nous sommes basés globalement sur des filtres spatiaux (FigureV.14) : Non directional Edge (A); Crisp (B); Convolution horizontale (C); Convolution verticale (D), sous Erdas Imagine.11, qui nous ont permisd'extraire l'essentiel des linéaments de notre secteur à l'aide de l'imagerie satellitaire.

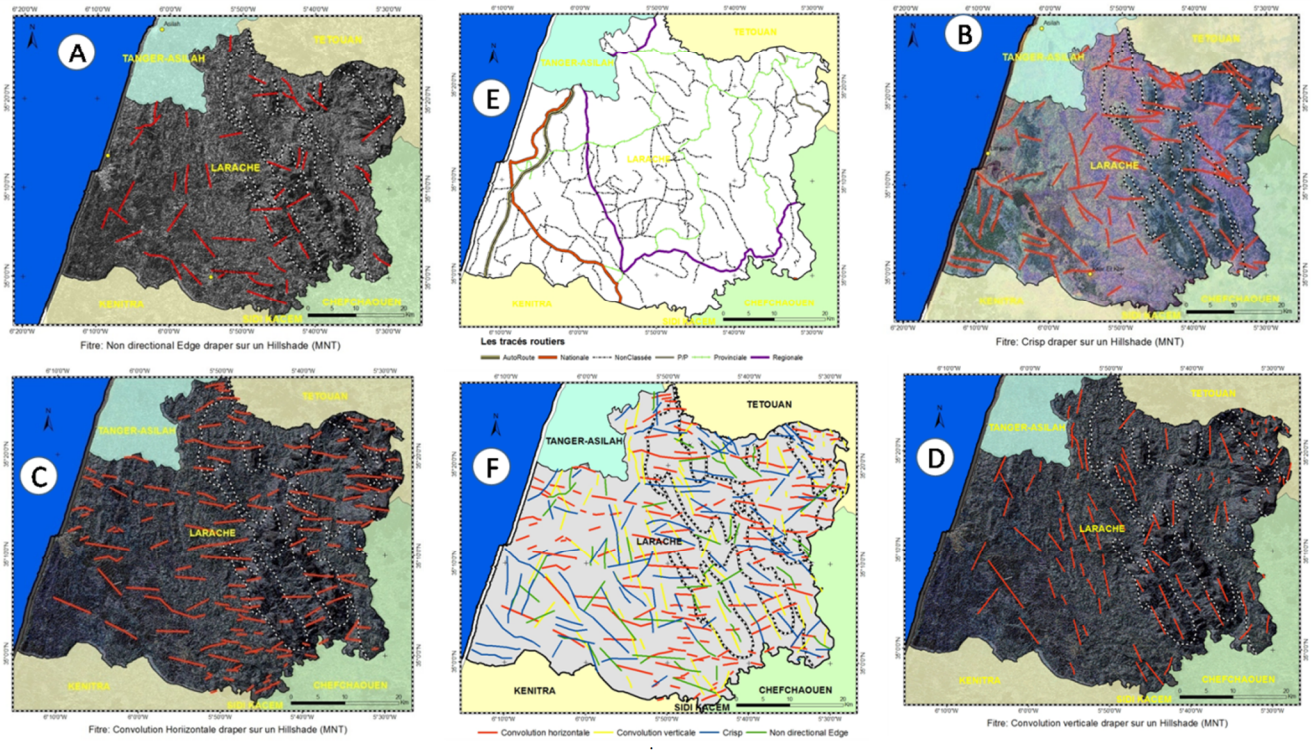


Figure V.14: Extraction visuelle des linéaments en utilisant les filtres spatiaux sur Erdas Imagine.11

Les traitements et les filtrages que nous avons effectués, ont eu pour effet d'accentuer et de faciliter la détection des discontinuités-images, permettant ainsi leur levé par simple observation visuelle. Aussi par synthèse d'informations à travers un SIG, les linéaments d'origine anthropique préalablement vectorisés (routes, pistes, ligne de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées…) ont été identifiés dans l'ensemble des linéaments et éliminés, en se référant aux cartes topographiques et aux données de terrain. Seuls les linéaments d'origine structurale ont été pris en considération. Or la topographie et le réseau de drainage sont souvent contrôlés par les structures géologiques.

L'orientation des linéaments (azimut) est considérée comme l'une des caractéristiques les plus importantes pour différentes finalités, telles que l'analyse des tendances des linéaments dominants. Les orientations des linéaments ont été analysées par des rosaces qui affichent la longueur des linéaments à l'aide du logiciel (*Rockwork.16*). La rosace indique les directions WNW-ESE, E-W et NW-SE. Ces orientations rappellent celles des anomalies du réseau hydrographique ; aussi coïncident-elles parfaitment avec l'orientation des grandes structures et unités géologiques. (FigureV.15)

Alors la fracturation s'exprime sur les images Landsat7 ETM^{+} par des linéaments plus ou moins rectilignes qui délimitent ou décalent des zones à lithologies différentes ou à

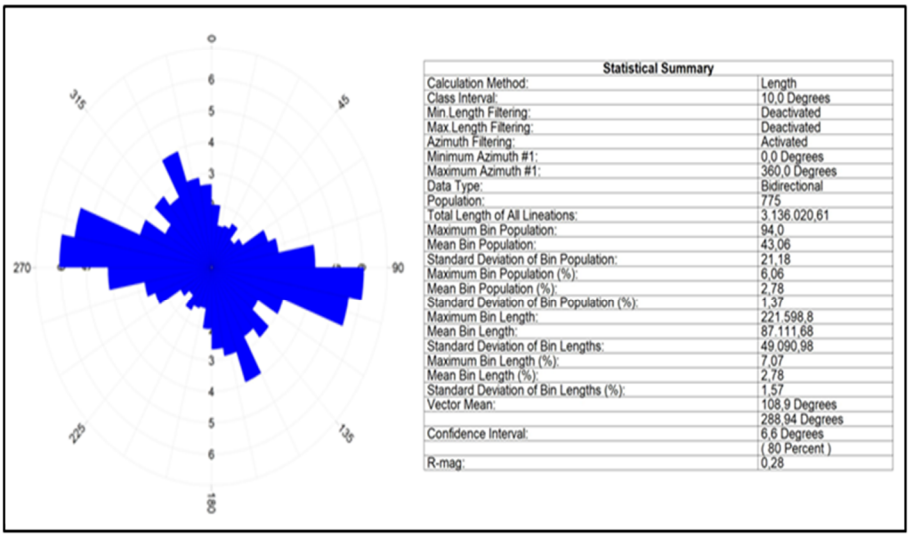


Figure V.15:Diagramme en rose présentant les orientations des linéaments manuels.

l'intérieur d'une même zone lithologique et/ou des structures morpho-tectoniques ; ainsi que des failles synsédimentaires d'avant fosse. La plupart des linéaments ont un caractère régional affectant toute cette partie de la chaîne (Chaouni, 1999; L.Ait Brahim et F.Sossey Alaoui, 2002).

1.4.2.2. Extraction automatique des linéaments à partir de l'image Landsat 8 Oli:

Cette étude présente une nouvelle approche d'extraction automatique des linéaments au niveau de la région de Larache dont le résultat sera comparé au relevé manuel des linéaments qui reste trop subjectif.

Il existe plusieurs méthodes pour détecter les entités linéaires et caractéristiques géomorphologiques du terrain. Ici, on tente une délimitation automatique du linéament, basée sur l'amélioration des contours suivie d'une technique de netteté des contours, ce qui donne le meilleur résultat des linéaments. Ce travail propose une technique d'extraction automatique des linéaments afin de minimiser le temps mis pour l'élaboration de la carte de fracturation et de réduire la subjectivité du relevé manuel. Pour se faire, plusieurs techniques ont été appliquées sur les images Landsat 8 Oli acquises le 04 juillet 2016, cette période est caractérisée par l'absence des nuages. Les images ont été téléchargées à partir de la page du site web USGS, le tableau.V.5 présente leurs caractéristiques. Les images ont été redimensionnées aux coordonnées exactes de la zone d'étude par un sous-ensemble des scènes originales. Quatre scènesont été utilisées pour couvrir la région (FigureV.16).

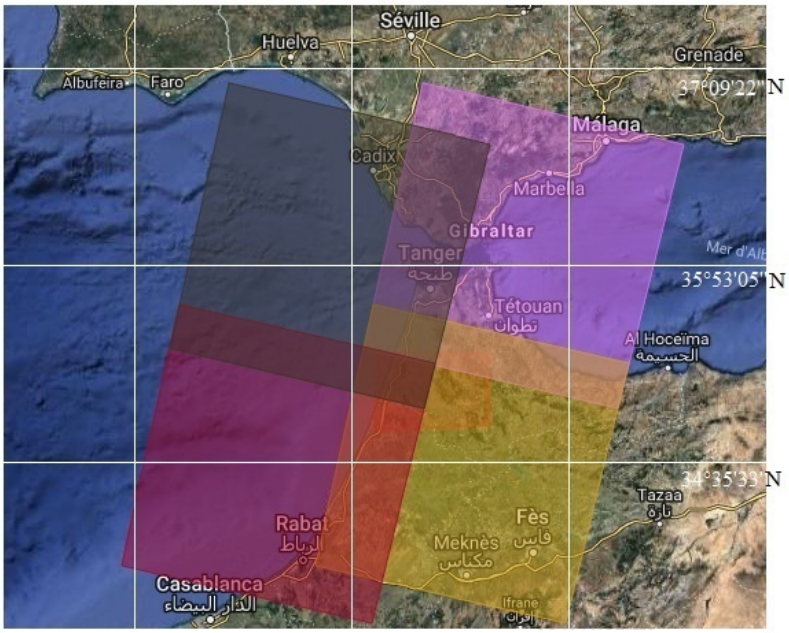


*Figure V.**16** Mosaïque des images téléchargées du site https://earthexplorer.usgs.gov/*

Tableau V. 4 : caractéristiques de l'image Landsat 8

Bands	Wavelength (micrometers)	Resolution (meters)	Common Name
Band 1	0.43 -0.45	30	Coastal aerosol
Band 2	0.45-0.51	30	Blue
Band 3	0.53-0.59	30	Green
Band 4	0.64 -0.85	30	Red
Band 5	0.85-0.88	30	Near Infrared (NIR)
Band 6	1.57-1.65	30	SWIR 1
Band 7	2.11-2.29	30	SWIR 2
Band 8	0.50-0.68	15	Panchromatic
Band 9	1.36-1.38	30	Cirrus
Band 10	10.60-11.19	100* (30)	Thermal Infrared (TIRS) 1
Band 11	11.50-12.51	100* (30)	Thermal Infrared (TIRS) 2

Ces techniques ont été nécessaires pour améliorer la visibilité des linéaments ; elles incluent la correction radiométrique et atmosphérique, les compositions colorées et l'analyse en composante principale (ACP).

L'Analyse de la Composante Principale (ACP) a été choisie dans l'objectif de combiner les différentes sources d'informations de manière à rehausser certaines caractéristiques ou certaines propriétés des données qui sont moins évidentes dans l'image originale, ou au niveau de bandes individuelles. Nous avons eu le

choix de combiner les trois premières bandes dans lesquelles le maximum d'information est concentrès (Tableau.V.6). Aussi avons-nous utilisé la bande 4 pour son contraste élevé qui permet de discerner les discontinuités.

Tableau V. 5 : Le pourcentage de l'information au niveau de sept bandes de l'image Landsat 8 Oli

PC Layer	Eigen Value	Percent of Eigen Values
1	24102,859844	90,25 %
2	1687,8678583	6,32 %
3	610,51676014	2,286 %
4	210,18227919	0,787 %
5	45,935644245	0,172 %
6	38,190680971	0,143 %
7	11,216843362	0,042 %

L'extraction automatique des linéaments est basée sur le module "*Line Extraction*" du logiciel *Geomatica 2015,* qui a été appliquésur l'ACP et sur la bande 4. La démarche du fonctionnement de cette application est basée sur trois étapes : la détection des extrémités, le seuillage, et le diagramme des fréquences. Les longueurs et la densité des linéaments extraits par ce module dépendent des valeurs des paramètres d'entrée qui sont optionnels et qui peuvent être personnalisés (H.Si Mhamdi, 2016). La combinaison des deux cartes de linéaments issues de la bande 4 et l'ACP permet d'établir une carte synthétique des linéaments de la zone d'étude. La correction de cette carte consiste à éliminer les structures linéaires (Route, Rivier, Ligne de crête…), à corriger la géométrie et à éliminer les redondancesde linéament. La validation du résultat est faite, dans un premier temps, par les images de Google Earth, et dans un deuxième temps par les cartes topographique, les données préexistant et les missions du terrain. (FigureV.17)

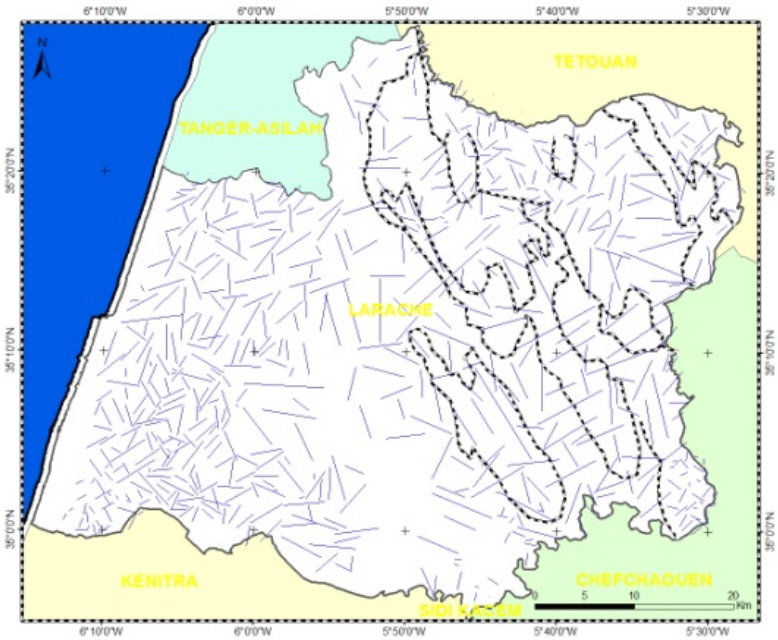
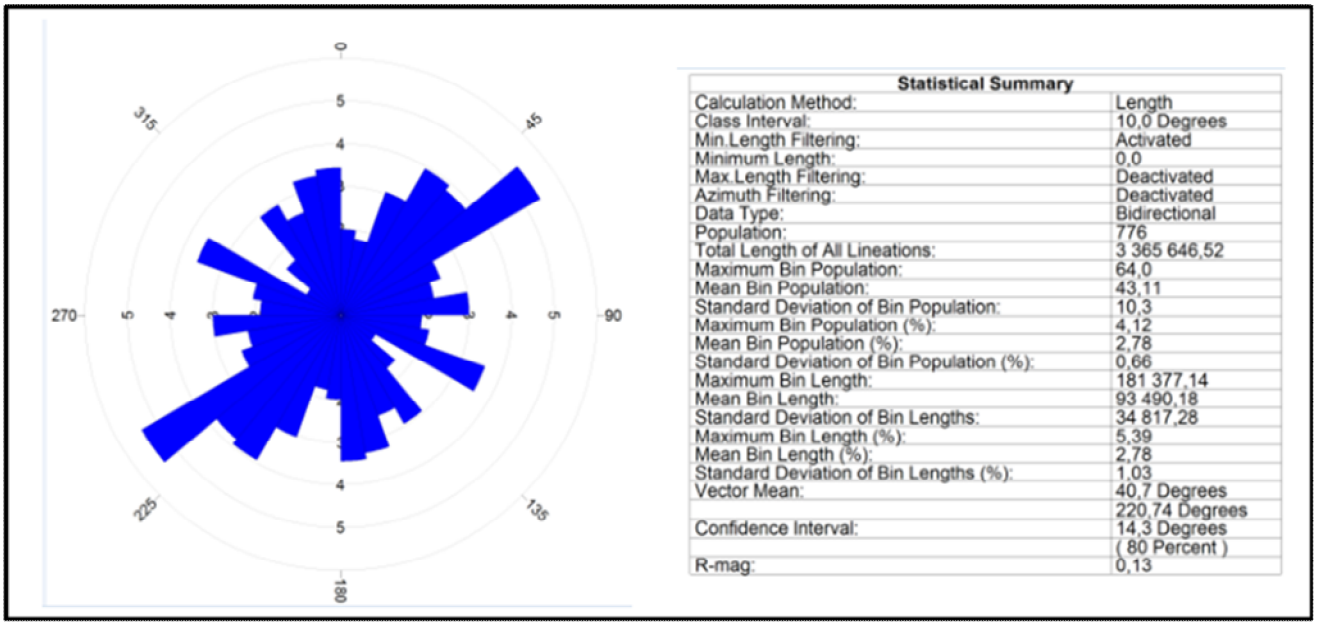


*Figure V.**17**: Extraction automatique des linéaments*

Après correction des résultats obtenues par extraction automatique, la carte synthétique présente 776 linéaments avec une densité remarquable dans la partie Est de la région. Afin de tester la distribution des linéaments par direction, nous avons réalisé une rosace, à l'aide du logiciel "*RockWorks16*". La rose diagramme obtenue montre une certaine homogénéité de distribution des directions avec des piques du coté NE-SW, NW-SE et E-W.

La rosace indique en particulier les directions NE-SW pour les linéaments automatiques (FigureV.18), tandis que E-W et NW-SE, pour les linéaments manuels (FigureV.15). Ceci est justifié par le fait que nous avons pu

distinguer des linéaments sur l'image rehaussée par le filtre "convolution horizontal", beaucoup plus que d'autres filtres.



Statistical Summary	
Calculation Method:	Length
Class Interval:	10,0 Degrees
Min.Length Filtering:	Activated
Minimum Length:	0,0
Max.Length Filtering:	Deactivated
Azimuth Filtering:	Deactivated
Data Type:	Bidirectional
Population:	776
Total Length of All Lineations:	3 365 646,52
Maximum Bin Population:	64,0
Mean Bin Population:	43,11
Standard Deviation of Bin Population:	10,3
Maximum Bin Population (%):	4,12
Mean Bin Population (%):	2,78
Standard Deviation of Bin Population (%):	0,66
Maximum Bin Length:	181 377,14
Mean Bin Length:	93 490,18
Standard Deviation of Bin Lengths:	34 817,28
Maximum Bin Length (%):	5,39
Mean Bin Length (%):	2,78
Standard Deviation of Bin Lengths (%):	1,03
Vector Mean:	40,7 Degrees
	220,74 Degrees
Confidence Interval:	14,3 Degrees
	(80 Percent)
R-mag:	0,13

*Figure V.**18:** Diagramme en rose présentant les orientations des linéaments automatique.*

Ainsi l'analyse combinée de deux approches pour la réalisation de la carte des linéaments de la région d'étude : **(i)** extraction par l'utilisation des filtres ; **(ii)** extraction automatique par algorithme s'est-elle avérée plus performante pour la réalisation de la carte de la fracturation de la province de Larache. Cette carte servira de base pour la compréhension du contexte structural des zones externes du rif septentrional et la prise en compte du paramètre fracturation dans l'impact des risques géologiques (séismes, instabilités de terrains etc.) et en génie civil (infiltration des eaux etc.)

1.4.2.3. Validation de la carte de fracturation : bibliographie, et visites de terrain:

a) L'analyse microtectonique :

L'analyse microtectonique que nous avons effectuée au niveau des terrains marno-calcaires de l'unité de Tanger, montre plusieurs systèmes de failles décrochantes auxquelles sont associées des failles inverses.

- Les failles décrochantes : Elles s'organisent en :
  - ✓ Un premier réseau conjugué de failles décrochantes dextres N045-087 et sénestres de direction N110-140. Les pendages varient de 45° à 90°. Le pitch est de 00° à 35°.
  - ✓ Un deuxième réseau conjugué est caractérisé par le jeu de micro-décrochements sénestres de direction N00°-35° et dextres de direction N050-90. Le pendage est de 50° à 90°, le pitch est compris entre 00° et 35°. Les mesures ont été levées dans les séries marno-calcaires de l'unité de Tanger.
  - ✓ Un troisième réseau conjugué de micro-décrochements sénestres de direction N020-040 et de micro-décrochements dextres de direction N150-170. Le pendage de 60° à 90° indifféremment orientées vers l'Est ou vers l'Ouest. Le pitch est compris entre 00° et 38°.
- Les failles inverses : L'unité de Tanger entre Mezine et Arhbaollou est affectée par des failles inverses de direction N-S (azimut 170°-030°). Leur pendage est compris entre 10° et 45°, le pitch est de 90°. Ces failles sont à vergence vers l'Est ou vers l'Ouest. (FigureV.19,a)

b) l'analyse de la chronologie relative :

Les recoupements des failles et des stries nous ont permis d'établir une chronologie relative des principaux événements tectoniques ayant structurés cette région. Trois paléo-contraintes différentes ont été ainsi caractérisées. Elles sont présentées dans leur ordre chronologique :

- Un premier état de contrainte correspond à un régime en compression caractérisée par σ_1 orientée (E-W) N80-110, σ_3 horizontale est d'azimut N175-009 (FigureV.19,b,1). Elle s'exprime par des failles décrochantes dextre de direction N55-75 associées à des micro-décrochements senestre de direction N120-13 et par des failles inverses N-S. Par comparaison aux travaux de Nold et al., 1981 ; Benmakhlouf,1990 ; Chaouni,1996, nous attribuons un âge Serravalien à cette phase qui est responsable de plis d'axe sub-meridien et de chevauchement à double vergences qui affectent les marno-calcaires de l'unité de Tanger. (FigureV.19,c,2)
- Une deuxième compression dont la direction de la contrainte principale horizontale σ_1 est NE-SW (azimut 40°) (σ_3 est horizontale d'azimut 135°) (FigureV.19,c,2). Elle est responsable du jeu en décrochement dextre des failles de direction N10-35 et sénestre des failles de direction N50-80 (FigureV.19,3,4). Cette phase peut être comparée à celles décrites par Morel, 1988 ; Benmakhlouf,1990 ; Ait Brahim,1991; Chaouni,1996, d'âge Miocène supérieur.
- Une troisième compression dont la direction de la contrainte principale horizontale σ_1 est NS (azimut 173°-010°) (σ_3 est horizontale et d'azimut 84°-115°). Elle est responsable du jeu en décrochement dextre des failles de direction N150-170 et sénestre des failles de direction N10-40 (FigureV.20,5,6). Par comparaison aux travaux deMorel (1988), Benmakhlouf,1990; Ait Brahim,1991 ; Chaouni,199; El Fahssi,1999; nous attribuons un âge plio-quaternaire à cette phase.

La représentation des données structurales collectées sur le terrain est faite à partir d'une technique de projection sphérique, en utilisant le logiciel " *Stereonet*". (FigureIV.19 (1,2,3,4,5,6))

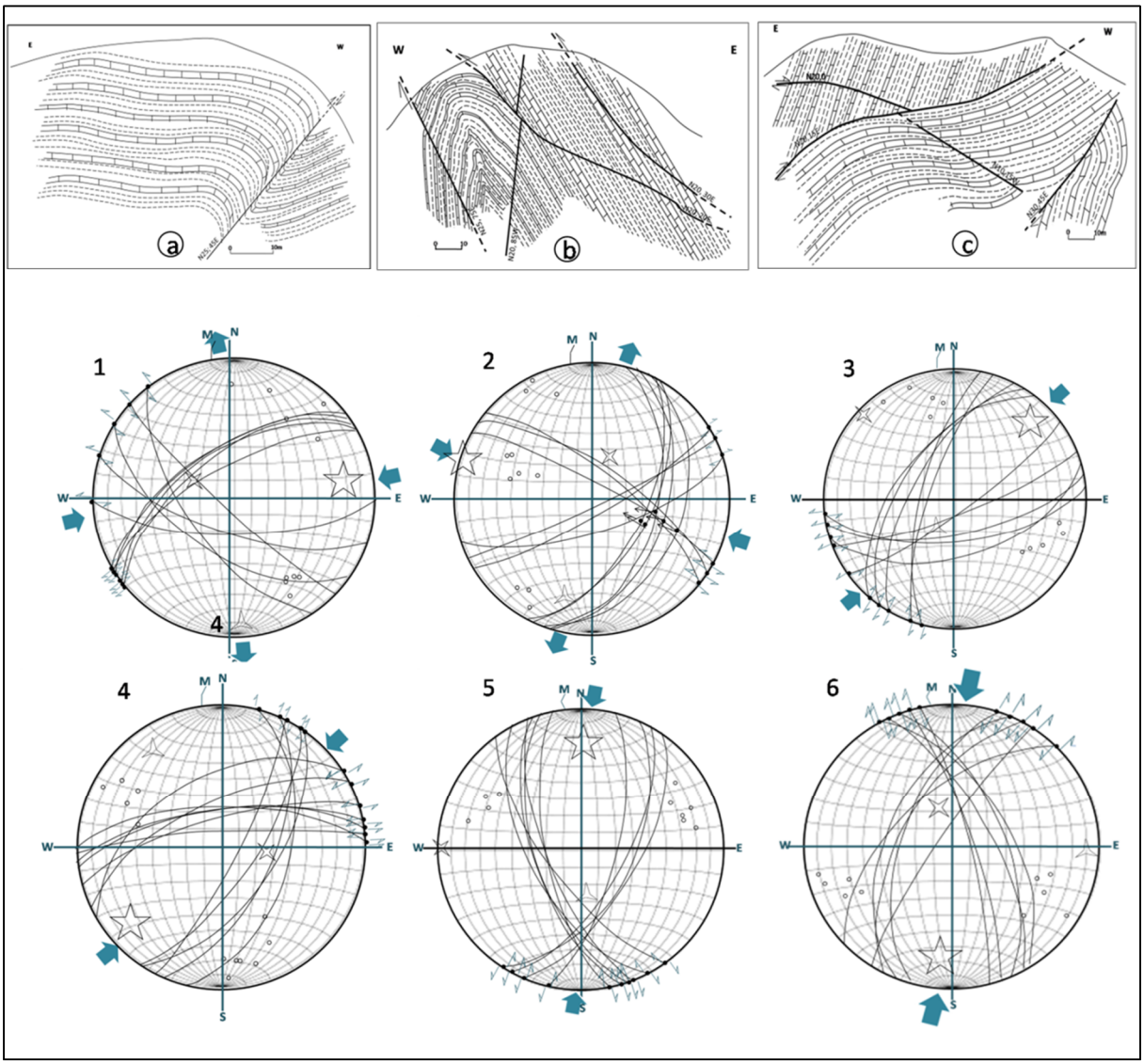
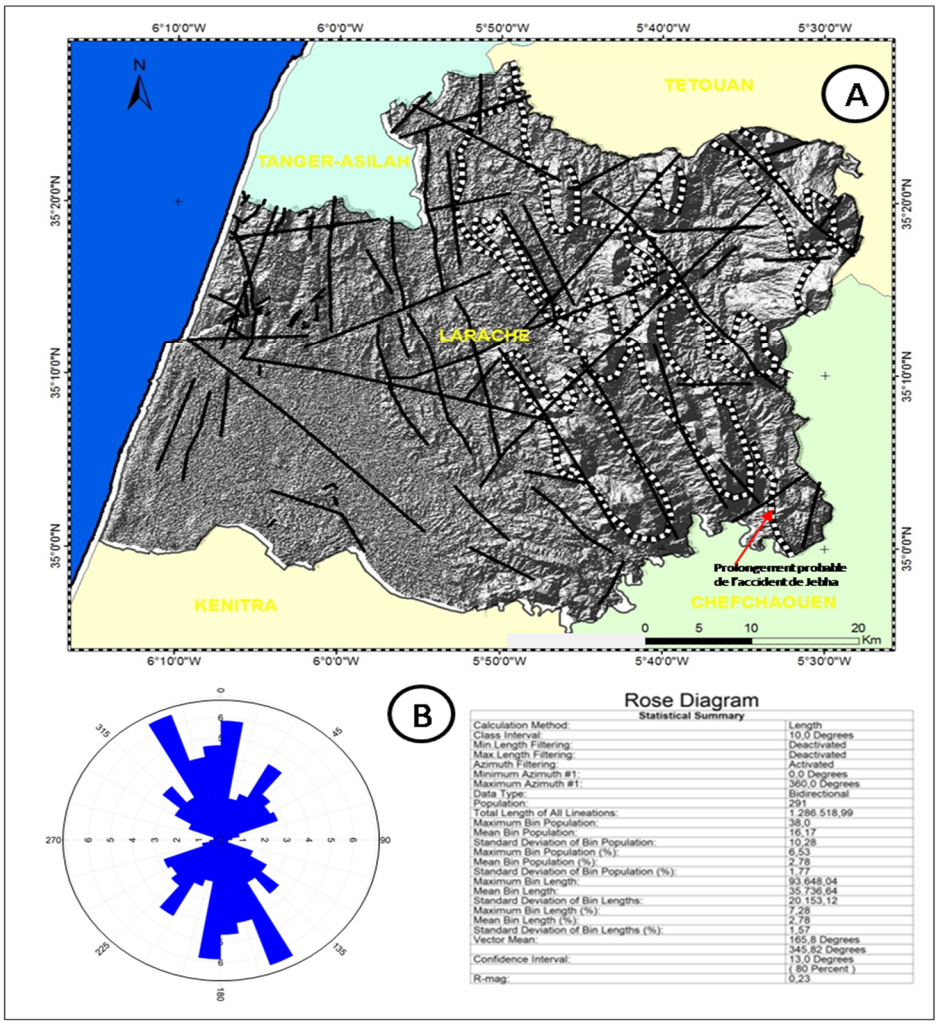


Figure V.19: Représentation des données structurales collectées sur le terrain*: (a)failles inverses N25, et plis de la phase E-W d'âge Serravalien au niveau des marno-calcaires de l'unité de Tanger(Arhbalou); (b)failles inverses et plis de la phase E-W d'âge Serravalien au niveau des marnocalcaires de l'unité de Tanger(Béni Kemmou); (c) failles inverses et plis de la phase E-W d'âge Serravalien au niveau des marno-calcaires de l'unité de Tanger(Mezine); (1) et (2)Etat de contrainte de la phase E-W d'âge Sérravalien au niveau des marno-calcaires de l'unité Tanger externe; (3) et (4)Etat de contrainte de la phase NE-SW d'âge Miocène supérieur au niveau des marno-calcaires de l'unité Tanger externe; (5) et (6)Etat de contrainte de la phase N-S d'âge plio-quaternaire au niveau des marno-calcaires de l'unité Tanger externe.*

La compilation des résultats, obtenues par l'analyse des données satellitales HRV,avec les données géologiques préexistantes et les missions de terrain ont permis de faciliter leurs interprétations et de faire un lien géologique entre les linéaments ainsi qu'avec la virgation de l'orientation des limites des grandes structures géologiques au niveau régional. Cette structure est liée à la déformation syn-tectonique lors de la surrection de la chaîne rifaine (phase majeure de l'orogenèse alpine), et aussi à la déformation syn-sédimentaire au niveau des bassins d'avant fosse.

Ces travaux montrent que la région d'étude est affectée essentiellement par un réseau de failles conjuguées de direction NW-SE, NE-SW et E-W, auxquelles sont associées des failles subméridiennes inverses, des

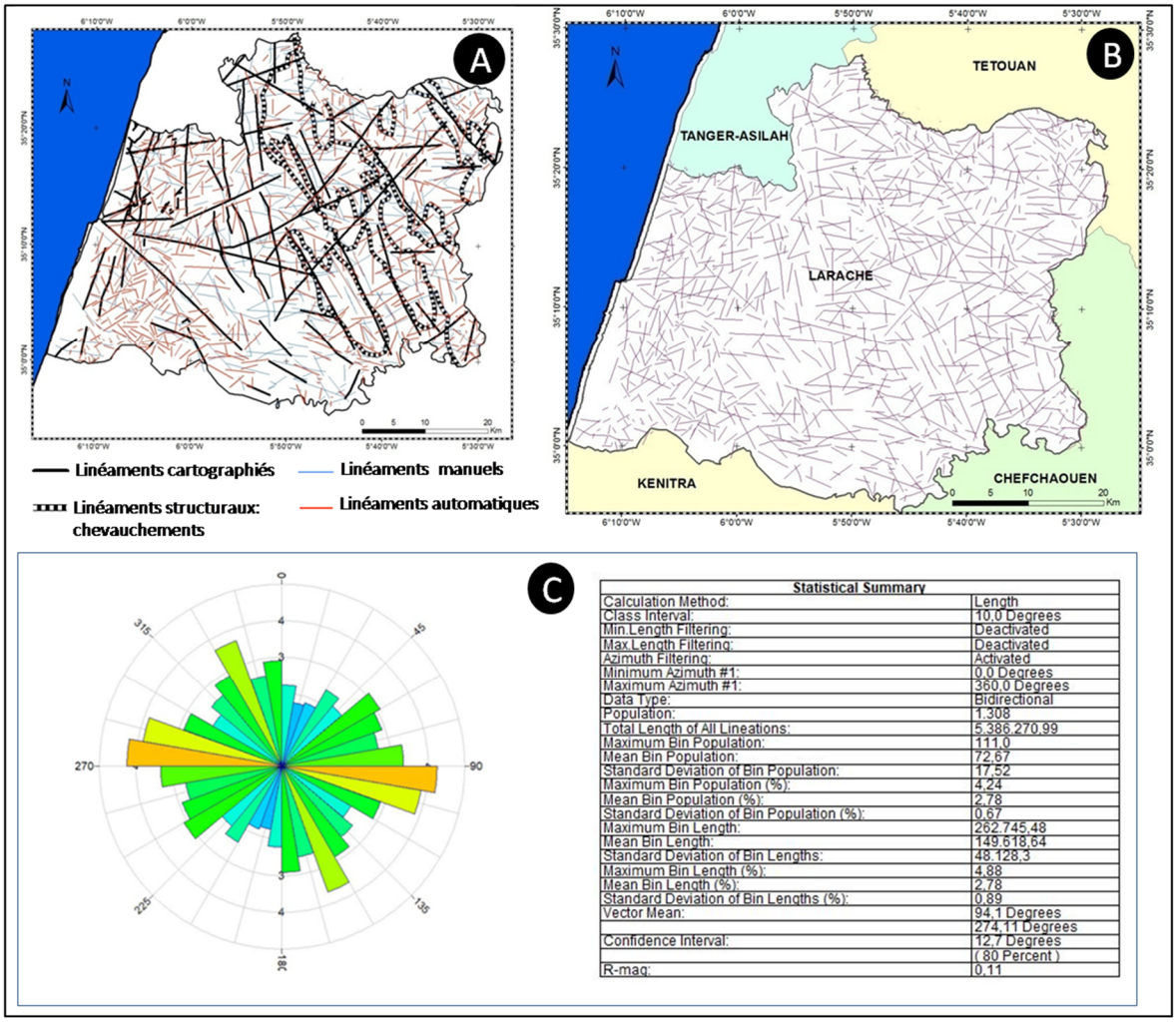
chevauchements à double vergence Ouest et Est. Cette fracturation guide en surface les principaux cours d'eau : Oued Loukkos (NW-SE) Oued Ouarour (NE-SW), Oued El Makhazin (E-W).
Sur la carte, les directions de failles relevées sont : des chevauchements N150 ; des failles décrochantes sénestres de direction subméridienne N10 à N20 ; failles décrochantes sénestres de direction N60 à N80 ; failles décrochantes dextre N130 ; des décrochements sénestres à direction N150 à N155 et des failles inverses listriques de direction N60 et N85. Ces directions concordent avec les directions tectoniques, caractéristiques de la région. La carte de fracturation et le diagramme en rose (FigureV.20) représentent les principaux accidents tectoniques qui ont été validés et retenus.



FigureV.20: Données de fracturation récoltées sur le terrain et sur la bibliographie. *A : carte des failles cartographiés au niveau de la province de Larache, présentée sur unMNT, Hillshade (d'après l'étude morpho-structurale et la bibliographie Benmakhlouf,1990; Ait Brahim,1991; Chaouni,1996; El Fahssi,1999, Sossi Alaoui, 2005, Chelouan, 2008); B: Diagramme en rose présentant les orientations des principaux fracturations.*

La direction dominante du système de failles dans la zone d'étude ne correspond pas à la direction principale indiquée par les linéaments qui ont été extraites par la méthode automatique. La raison en est qu'un défaut peut être représenté par un certain nombre de linéaments ayant la même direction (sorte de redondance de l'information). Cependant, le test de la distribution des directions de linéaments dans une sous-zone de la carte de linéaments révèle que le diagramme en rose des failles et des linéaments est similaire.
Après avoir éliminé les linéaments qui ne correspondent pas aux alignements tectoniques et ceux qui se dupliquent, nous avons créé une carte synthétique (FigureV.20.A), rassemblant les résultats obtenus par

différentes méthodes ; elle contient 711 alignements. Après la dernière étape de vérification 134 alignements ont été éliminés (alignements redondants ou de nature anthropique), et 577 ont été retenus. L'analyse azimutale de ces alignements permet de déceler trois grandes familles qui selon leur ordre d'importance sont de directions (FigureV.20.B) : NW-SE à ENE - WSW, NE-SW, N-S. Ces alignements représentent en majorité des failles à occurrence régionale, ainsi que des alignements à expression locale; les deux groupes affectent tous les terrains du secteur d'étude.
La figureV.21 représente un assemblage des différents résultats obtenus:



FigureV.21:Assemblage des données sur la fracturation. *A: Assemblage des cartes de linéaments issus de différentes méthodes au niveau de la province de Larache ; B: carte synthétique de fracturation ; Rose diagramme de la carte synthétique de fracturation.*

1.4.3. Intégration de la variable fracturation dans le modèle :

La fracturation est l'un des facteurs primordiaux à prendre en considération pour toute étude de l'aléa mouvement de pente. C'est une façon indirecte d'inclure l'effet de la sismicité d'une région donnée dans l'analyse de l'aléa mouvement de terrain. Ce paramètre est intégré la plupart du temps dans les études tenant compte de la distance par rapport aux failles (Mastere, 2011 ; Regmi et al., 2010 ; Pradhan, 2010 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Yilmaz, 2009a ; Yilmaz, 2009b Chang et al., 2007 ; Greco et al., 2007 ; Van Den Eeckhaut et al., 2006 ; Yesilnacar et al., 2005 ; …etc). Dans notre travail, la variable fracturation sera incorporée en se basant sur la densité de la fracturation. Cela se fait par l'établissement des zones tampons (buffering areas) de part et d'autre des failles du secteur. L'intégration de cette variable autant que zones tampon, revient à la création de

surfaces à égal comportement sismique sans réellement intégrer le paramètre sismicité (Mastere, 2011). D'autre part, la densité des failles est généralement proportionnelle au degré d'infiltration et de la circulation des eaux. Celle ci contribue directement a la genèse des ruptures de pentes.

1.4.3.1. Carte de densité de failles:

La réalisation de la carte de densité des failles a été effectuée à partir de la carte synthétique de fracturation. De ce fait, nous avons eu recours à la fonction "*Line Density*", du module *Spatial Analyst Tools* sur ArcGis 10.3. Dans notre cas, la carte de densité des failles tient compte de la longueur cumulée des failles, ainsi que la présence des nœuds tectoniques (croisement des failles). Cette carte a été reclassée par rééchantillonnage selon 5 classes de densité (FigureV.22B) à partir d'une première carte obtenue automatiquement contenant 9 classes (FigureV.22A). Ceci, afin de la rendre plus lisible et uniformément classée telle que les autres paramètres, à savoirde très faibleà très élevée. Les deux classes à densité élevée et très élevée couvrent plus de la moitié de la superficie totale du secteur d'étude. Elles couvrent les unités structurales imbriquées les unes sur les autres et la partie Sud-Est qui représente le prolongement de l'accident majeur de Jebha et tout son couloir faillé.

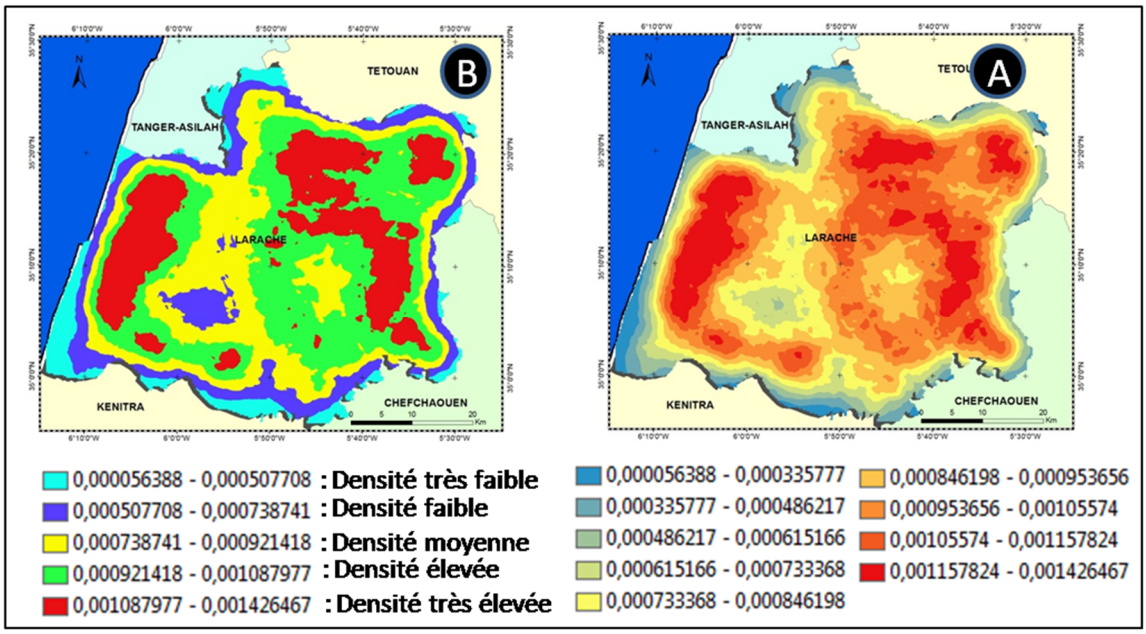


Figure V.22:Carte de densité de fracturation. *A: carte de densité" brute" de fracturation au niveau de la province de Larache ; B carte de densité" reclassée" de fracturation au niveau de la province de Larache.*

1.4.3.2 Relation fracturation-mouvements de terrain:

La relation entre la fracturation (en termes de densité) et les mouvements de terrain est illustrée par la FigureV.23, où il est très clair que les instabilités de terrain, quel que soit leur type, sont très fréquentes au niveau des deux classes à densité élevées et très élevées. La fréquence des mouvements augmente progressivement avec l'augmentation de la densité de la fracturation jusqu'à la classe à densité élevée. Nous constatons aussi que la fréquence diminue relativement au niveau de la classe à densité très élevée de la fracturation, ceci peut être expliqué par superficie de cette classe qui est assez réduite, en comparaison avec

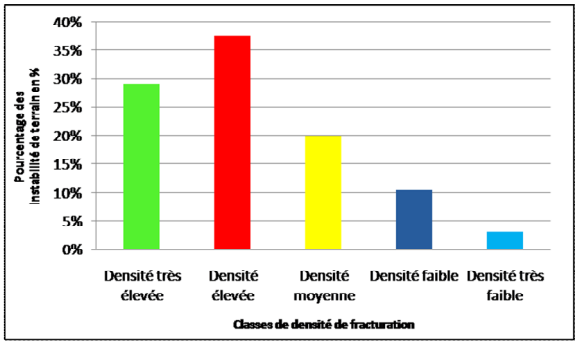


Figure V.23 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité de fracturation, *sur toute la surface de la province de Larache.*

les autres classes.Cette analyse statistique montrequ'environ 86,57% de la totalité des phénomènes (tous types confondus) se localisent au niveau des trois dernières classes de la fracturation, moyenne, élevée et très élevée.
Selon l'abondance des mouvements, nous avons attribué pour chaque classe de densité de fracturation un indice, de sorte que la valeur la plus élevée est attribué à la classe "densité élevée" qui contient le plus grand nombre de glissements de terrain (5,4,3,2,1). Le tableauV.7, résume les indices attribués pour chaque classe de densité fracturation.

Tableau V. 6 : Les indices attribués pour chaque classe de densité de fracturation

Classes de fracturation	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km^2)***	***Indice***
Densité très élevée	29,06%	642,46	4
Densité élevée	37,53%	603,10	5
Densité moyenne	19,94%	599,31	3
Densité faible	10,46%	567,45	2
Densité très faible	2,97%	345,59	1

1.5. Les variables topographiques:

Les variables topographiques (issus d'un MNT) constituent une information d'entrée indispensable pour toute évaluation de l'aléa "mouvements de terrain" et pour la cartographie de la susceptibilité sur un environnement SIG. Pour cette étude, seuls les MNTs dits à *"très haute résolution"* ont été utilisés (résolution de 30 mètres, de taille de pixel, pour l'échelle régionale et de 5m pour les échelles moyennes et locales). L'MNT de résolution 30m a été automatiquement calculé à partir des données ASTER[2], accessible gratuitement depuis 2009 avec une couverture mondiale de résolution de 30 mètres de taille de pixel. La précision verticale est très variable selon les secteurs et la morphologie du relief, oscillant entre 3 et 45 mètres en moyenne (Abrams et al., 2010 ; Hengl & Reuter, 2011 ; Fressad, 2013). Celui de 5m de résolution a été interpolé à partir des courbes de niveau. Des cartes topographiques de certains secteurs à l'échelle de 1/25000éme (format numérique) ont été fournies par L'Agence Nationale de la Conservation Foncière du Cadastre et de la Cartographie.
De nombreuses techniques permettent de construire des MNTs à partir de données XYZ (Carrara et al., 1997 ; Dewait, 2006). Dans cette étude, la méthode d'interpolation choisie nous a permis de construire un MNT sous la forme raster ou grid (format grille maillé), permettant d'extraire facilement l'information nécessaire au calcul des variables indispensables à la prédiction de l'aléa "instabilitéde terrain" (Dewait, 2006). Ces variables dérivées des MNT sont utilisées pour (Thiery, 2007):

1. Suivre l'activité des "mouvements de versant" (Iwahashi et al., 2001 ; Corsini et al., 2006 ; Schulz, 2007);
2. Reconstituer une vue du terrain en images de synthèse, déterminer des trajectoires, effectuer automatiquement des coupes topographiques de terrain (Longley et al., 2005) ;
3. Extraire des formes du terrain (pente, exposition, formes des versants, Fleming et Hoffer, 1979 ; Evans, 1981 ; Horn, 1981 ; Wood, 1996 ; Schmidt et Dikau, 1999) ;
4. La modélisation déterministe et le calcul de flux de surface (Beven et Kirkby, 1979 ; Montgomery et Dietrich, 1994 ; Soeters et van Ouesten, 1996 ; Carrara et al., 1997 ; Claessens et al., 2005) ou encore le calcul de l'énergie reçue au sol (Dubayah et Rich, 1995 ; Fu et Rich, 2000).

[2] ***ASTER***: *Réalisé par la collaboration entre la NASA et le Ministère de l'Économie, du Commerce et de l'Industrie du Japon. Ce MNT est issu de l'analyse stéréoscopique de 1,3 million d'images multispectrales acquises par le satellite ASTER ("Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer")*

1.5.1 Les gradients de pente :

1.5.1.1 La carte des pentes:

La pente est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de l'aléa glissements de terrain. Pour qu'une rupture survienne sur un versant, il faut nécessairement qu'il y ait un appel au vide quelque part, d'où l'importance de prendre en considération l'angle de la pente topographique des terrains. Toutefois, comme le soulignait déjà Millies-Lacroix en 1968, il demeure indispensable de l'associer à d'autres facteurs environnementaux, afin de limiter au mieux les incertitudes sur les évaluations de la stabilité, (Mastere, 2013).

Afin de réaliser la carte des pentes, nous avons eu recours au module Spatial Analyst Tools d'ArcGis 10.3, par l'utilisation de la fonction "slope" ce qui a permis de générer un fichier contenant plusieurs classes de gradients de pentes que nous avons reclassifiées en cinq grandes classes (FigureV.24).

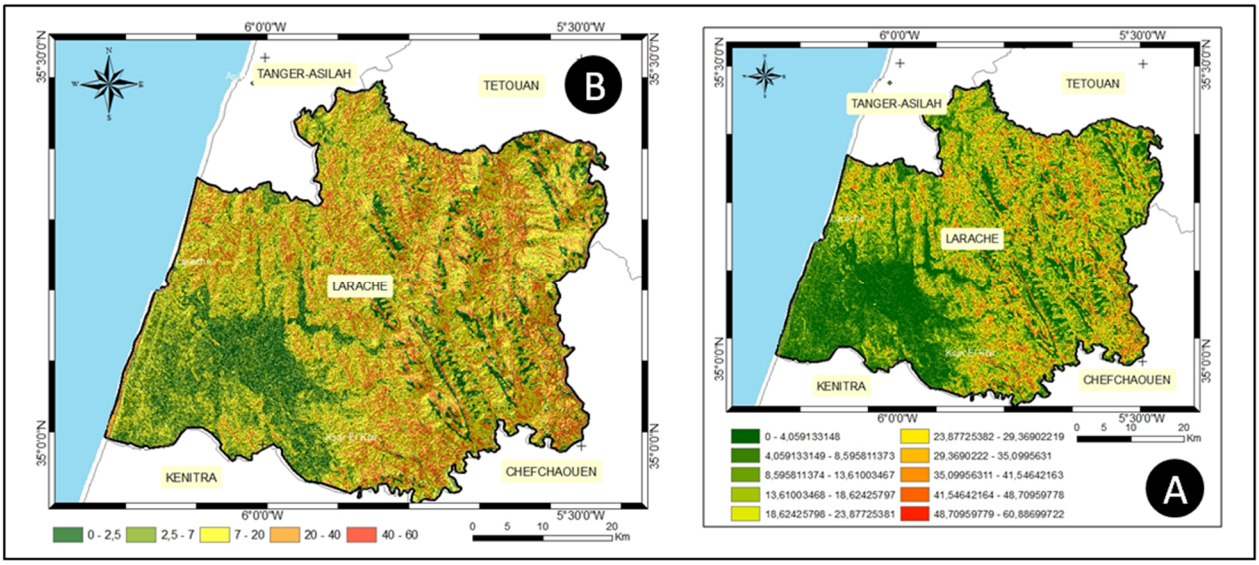


Figure V.24 : carte des gradients de pente au niveau de la province de Larache ; A: carte brute; B: carte après reclassification.

1.5.1.2 Relation gradient de pente-mouvements de terrain :

D'après la Figure V.28 qui résume l'évolution de la fréquence des mouvements de terrain (tout type compris), on note que ces derniers sont présents au niveau de toutes les pentes même les plus douces, avec des pourcentages variés. Cependant les versants les plus propices à l'instabilité sont ceux dont l'inclinaison dépasse 2,5°, avec un maximum de susceptibilité entre 2,5° et 20°. Par typologie de mouvement de terrain, les versants montrent la même tendance de comportement vis-à-vis de l'instabilité surtout pour les glissements complexes et les coulées boueuses, mais avec des valeurs différentes.

L'inclinaison des versants est à l'origine d'une force hydraulique des eaux que ce soit de surface ou souterraine. Alors la vitesse du ruissellement, qui augmente de plus en plus que le gradient de pente est élevé, crée une énergie cinétique capable de creuser les formations superficielles, surtout celles à caractéristiques géotechniques médiocres, en donnant naissance à des phénomènes de ravinement intense.

Logiquement le taux de rupture par glissement s'accroît avec l'inclinaison des versants. C'est ainsi que les pentes très fortes doivent être les plus sensibles aux instabilités de terrain. Cependant, dans notre cas, nous remarquons que la majeure partie des phénomènes (plus de 53%) se concentre au niveau des deux classes dont les gradients de pente faible à moyen (2ème [2,5°-7°] et la 3ème [7°-20°]), avec un maximum (31,87%) au niveau de la deuxième classe (Figure V.25). Les pentes à inclinaison inférieur à 20% sont définies comme

étant les plus favorables pour le déclenchement des différents types de mouvements de terrain dans la région du Rif central (Sossey Alaoui, 2005 ; Mastere, 2008 ; Mastere et al., 2009, 2011).

Ces résultats pourraient paraitre anormaux car les mouvements ne sont pas concentrès dans les secteurs où la pente est forte. Cela peut être justifié par le fait que la classe à gradient de pente fort couvre une superficie restreinte en comparaison avec les autres classes. D'autre part, les zones qui ont une pente forte à très forte sont généralement les secteurs à faciès dure (barresgrèseuses numidiennes), c'est la raison pour laquelle, nous y trouvons les mouvements de type "écroulements". Or les secteurs à pente moyenne ou faible sont couverts par des matériaux tendres (les marnes et les pélites de l'Unité de Tanger et l'Unité de Loukkos). Pour la classe à très faible gradient de pente [0-2,5°], il est clair qu'elle contient un pourcentage élevé des mouvements de terrain, ce qui est explicable par le fait qu'elle est formée par des matériaux peu consolidé (terrasses alluviales), souvent longeant les rives des Oueds, qui sont fort probable à l'origine de plusieurs instabilités, et aussi cette classe couvre la plus grande surface (1009,39 Km^2).

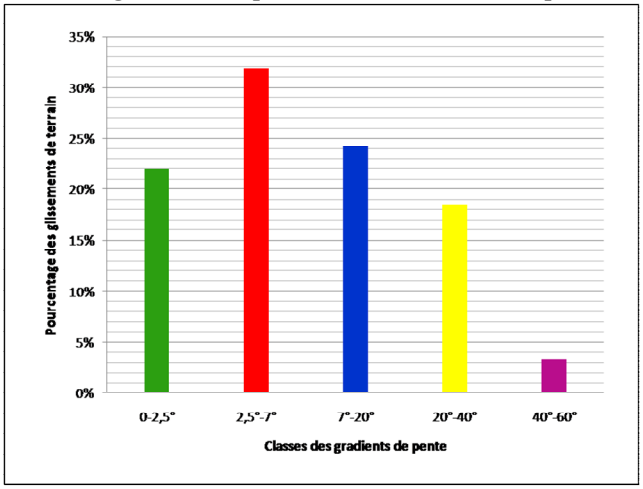


Figure V.25 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de gradients de pente, *sur toute la surface de la province de Larache.*

Sur la base des pourcentages des mouvements de pente, nous avons attribué pour chaque classe de gradient de pente un indice exprimant l'occurrence d'instabilité de terrain au niveau de chaque classe de gradient de pente GP (Tableau V.7). De même, l'indice le plus élevé est attribué à la classe du GP où les mouvements de terrains sont les plus abondants (5,4,3,2,1).

Tableau V. 7 : Les indices attribués pour chaque classe de pente

Classes	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km^2)***	***Indice***
0°-2,5°	22,03%	1009,36	3
2,5°-7°	31,87%	748,02	5
7°-20°	24,2%	516,65	4
20°-40°	18,57%	319,88	2
40°-60°	5,66%	170,64	1

1.5.2. La variable exposition des versants:

1.5.2.1 La carte des expositions des versants:

L'exposition des pentes mesure la direction de chaque cellule de la grille (image) dans un espace tridimensionnel. Elle est exprimée en degrès azimut par rapport au Nord géographique. Elle traduit les orientations des versants, qui sont liées à la tendance géo-climatique générale de la région (durée d'ensoleillement des versants, pluies, vents, température…), et en particulier à la direction principale des précipitations. De ce fait, l'exposition des versants peut être considérée comme l'une des paramètres de prédisposition qui conditionnent les mouvements de pente. Cependant, la relation entre l'apparition des glissements de terrain et l'exposition est toujours un sujet de discussion, certains chercheurs (Carrara et al.,

1991 ; Gokceoglu et Aksoy, 1996) l'introduisent dans leurs calculs, tandis que d'autres ne le font pas (Uromeihy et Mahdafivar, 2000).

Grâceaux modules spéciaux qu'offre ArcMap, nous avons élaboré des cartes des orientations des pentes à partir des MNTs. Ainsi, la carte d'expositions de la province de Larache a été générée automatiquement, en utilisant l'outil "*Aspect*" du module "*Spatial Analyst*" qui est implémenté dans ArcGis 10.3. Nous avons obtenu une carte qui contient dix classes (FigureV.26.A). Afin d'optimiser le nombre des classes, nous avons choisi cinq classes d'orientation des versants dans le sens des aiguilles d'une montre : Nord-Nord Est ; Est ; Sud ; Sud – Ouest ; Nord – Ouest. Les terrains plats sont négligeables. Du coup, nous ne les avons pas pris en considération. (FigureV.26.B).

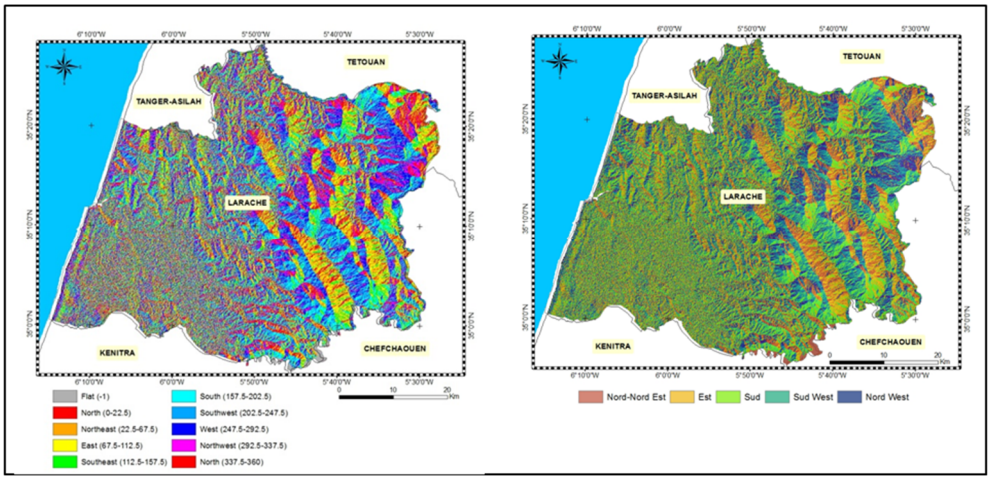


Figure. V.26: Carte des expositions des pentes *au niveau de la province de Larache ; A: carte brute; B: carte après reclassification.*

1.5.2.2 Relation exposition-mouvements de terrain:

Afin d'évaluer l'influence de l'orientation des versants sur leur susceptibilité aux instabilités de terrain, nous avons essayé d'attribuer une valeur estimative de cette influence par classe d'exposition ; ceci en se basant sur la fréquence des instabilités au niveau de chaque classe. La figureV.27, montre les résultats statistiques issus de l'intersection de la couche mouvements gravitaires et celle de l'exposition.

Comme l'indique le diagramme de fréquence, figureV.27 pour l'aspect de la pente, les pourcentages de glissements de terrain ne sont pas trop différents, tandis que l'appartenance maximale du phénomène étudié était affectée aux directions d'aspect Nord-Ouest et Nord à Nord Est et l'appartenance minimale a été affecté à la direction d'aspect Sud-Ouest. Sur cette base, l'indice le plus élevé a été affecté à la classe d'exposition dont la fréquence des mouvements de pente est la plus grande, tableauV.8.

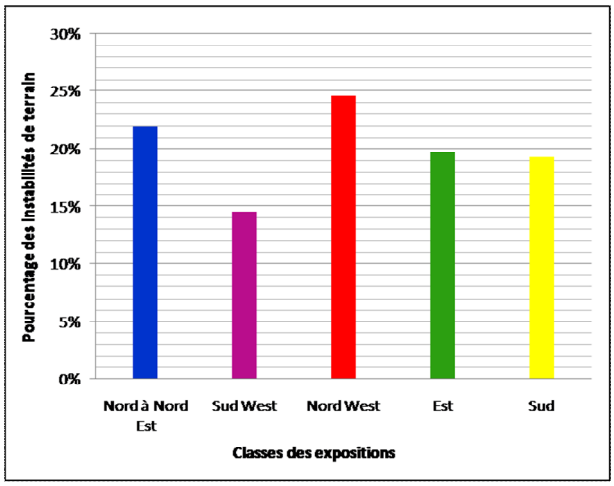


Figure V.27 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'exposition, *sur toute la surface de la province de Larache.*

Tableau V. 8 : Les indices attribués pour chaque classe de l'exposition.

Classes	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km^2)***	***Indice***
Nord-Nord Est	21,96%	680,53	4
Sud Ouest	14,56%	560,61	1
NordOuest	24,58%	459,73	5
Est	19,75%	673,38	3
Sud	19,33%	386,87	2

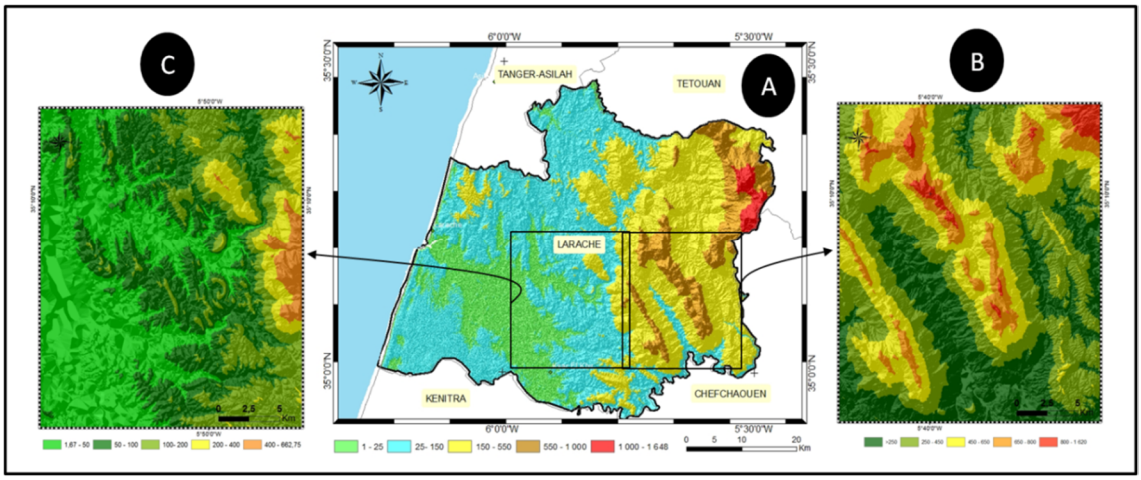
1.5.3. L'hypsométrie :

1.5.3.1 La carte des altitudes:

L'hypsométrie est également un facteur important de conditionnement des glissements de terrain car elle est contrôlée par plusieurs processus géologiques et géomorphologiques (Gritzner et al. 2001 ; Dai et Lee 2002 ; Ayalew et al. 2005). Selon Irimuş, 1997 "la nature quantitative des cartes hypsométriques est étroitement liée à la nature qualitative du phénomène étudié, assurant ainsi les liens de correspondances qui devraient exister avec d'autres cartes géomorphologiques ; aussi permet-elle des interprétations théoriques et fondamentales, parfaitment cohérentes avec la réalité du terrain".

Pour évaluer l'altitude en tant que paramètre prédictif dans le calcul de la susceptibilité aux glissements de terrain, une carte d'altitude a été préparée à partir du modèle d'élévation numérique. Nous avons utilisé un MNT à une résolution de 30 x 30 m pour l'étude à échelle régionale et un MNT à résolution 5m x 5m pour l'évaluation de la susceptibilité au glissement de terrain à échelle moyenne et locale (FigureV.28).

L'MNT (30x30) a été reclassé en cinq classes d'altitude : 1m-25m ; 25m-50m; 50m-150m; 150m-550m; 550m-1000m; 1000m-1650m.



FigureV.28:A: carte hypsométrique *au niveau de la province de Larache (résolution 30mx30m); B:carte hypsométrique de la région d'El Quola; c: carte hypsométrique de la région d'El Ksar El Kebir.*

1.5.3.2 Relation hypsométrie-mouvements de terrain :

L'impact de la variable altitude sur l'occurrence des glissements de terrain au niveau de la région a été évalué en calculant le pourcentage des instabilités de terrain (tous types confondus), au niveau de chaque classe d'hypsométrie (FigureV.29).

Cette analyse statistique montre qu'environ 72,07% de la totalité des phénomènes (tous types confondus) se localisent au niveau des deux classes d'altitude, 25m-150m et 150m-550m. Ceci peut être expliqué par le fait que la classe 150m-550m correspond à des pentes supérieures à 15° et elle est occupée par des faciès tendres tels que les marnes, ou les argiles. Cependant, la classe 25m-150m contient un nombre assez élevé de glissements de terrain car elle occupe la superficie la plus large, cela d'une part. D'autre part elle est couverte par des terrains à lithologie très sensible au mouvement de terrain (marnes). Pour la classe >25m, elle contient un pourcentage moyen, quoique le gradient de pente dépasse rarement les 5°, ceci est dû à la nature des terrains qui correspondent aux terrasses alluviales très souvent meubles, et aussi à l'action des eaux superficielles. Par contre, les classes à grande altitude sont les moins touchées, du fait qu'elles sont formées par des roches rigides (les grès).

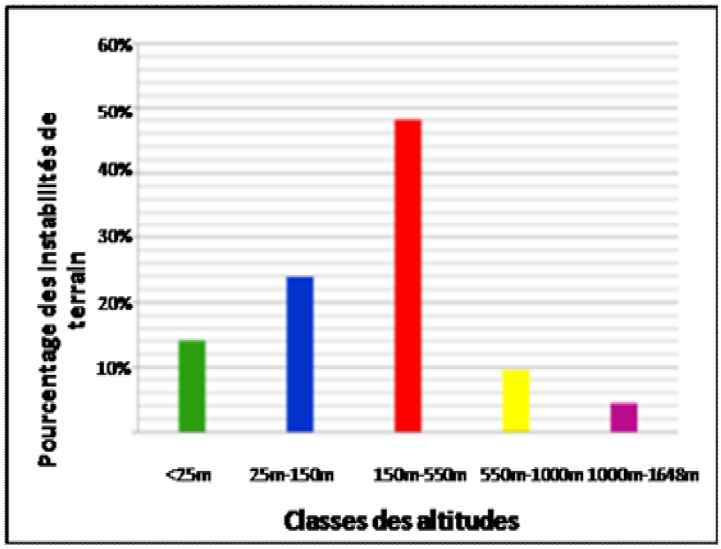


Figure V.29 : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'altitude, *sur toute la surface de la province de Larache.*

A la base de cette étude nous avons attribué à chaque classe un indice qui traduit le comportement de cette classe vis à vis du phénomène étudié. (tableau.V.9)

Tableau V. 9 : Les indices attribués pour chaque classe d'altitude.

Classes d'altitude	***Pourcentage des MT***	***Surface (Km²)***	***Indice***
>25m	13,96%	449	3
25m-150m	23,94%	1158,61	4
150m-550m	48,13%	850,69	5
550m-1000m	9,48%	249,10	2
1000m-1648m	4,49%	37,54	1

2. Les facteurs déclencheurs:

Les glissements de terrain sont des phénomènes qui sont provoqués par diverses causes telles que les fortes précipitations, les fortes tempêtes, l'activité sismique naturelle, les changements de charge artificielle ou même les explosions. À l'échelle mondiale, le rôle de l'eau, des activités sismiques et volcaniques semble avoir les effets les plus pertinents (USGS, 2004). En fonction de la taille d'un événement, les conséquences peuvent être mineures, voire désastreuses, entraînant des pertes de vies humaines et des dommages considérables aux infrastructures, aux biens et à l'environnement (Bird& Bommer, 2004).

Les facteurs déclencheurs combinés ne sont pas rares, ils interfèrent souvent les uns avec les autres ce qui entraine un déséquilibre du régime de contrainte-déformation, aboutissant ainsi à un déclenchement des mouvements de pentes qui influence leur évolution.

Une augmentation de la contrainte de cisaillement (à cause des charges externes, de la pression latérale ou des forces transitoires) ainsi qu'une diminution de la résistance au cisaillement (due aux intempéries, coupures de pied de pente ou aux variations de la pression interstitielle) pourraient déséquilibrer le régime de contrainte-déformation et induire une perte de stabilité d'une pente. Par exemple, après une forte pluie, la pression interstitielle sur une surface glissante augmente, réduisant ainsi les contraintes et les frottements normaux. D'autre part, le poids de la masse glissante augmente en raison de la saturation en eau. Les deux

conditions favorisent alors le déclenchement d'un glissement de terrain. Afin de préciser l'implication des facteurs déclencheurs, dans la genèse et l'évolution des instabilités de terrain, il est donc essentiel de les identifier et les quantifier, ceci malgré les difficultés qu'on peut rencontrer à cause de la rareté des données et la complexité des calculs de quantification. Dans ce paragraphe, nous parlerons du climat, en particulier la pluviométrie et l'activité sismique.

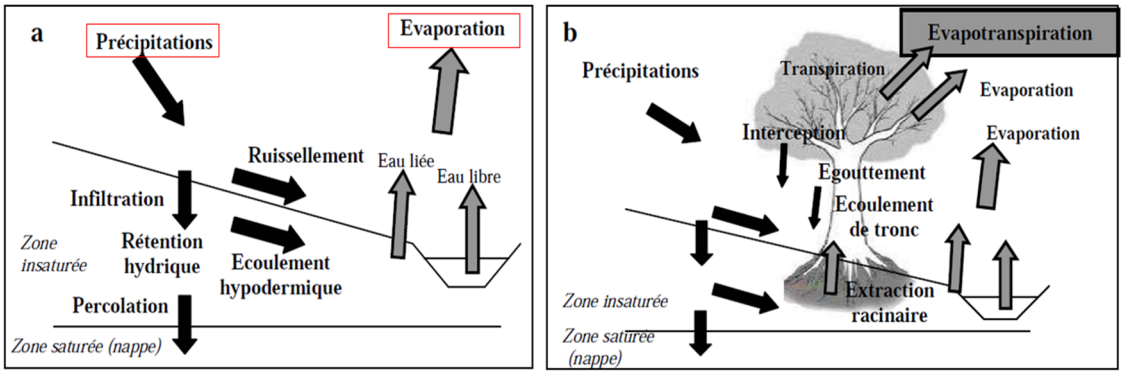
2.1 La variable précipitation:

L'évolution générale du climat lors de la dernière décennie montre un changement avec des tendances au réchauffement. Le prolongement des épisodes secs dans le pourtour méditerranéen est devenu une réalité climatique. Le Maroc n'a pas échappé à ces conditions difficiles causées par la persistance et la sévérité de la sécheresse depuis les années 1970. Ces conditions ont pesé lourdement sur le couvert végétatif et sur les activités agricoles.

Le Maroc est caractérisé par une variabilité spatiale et temporelle des précipitations très marquante. Le Nord-Ouest est, en moyenne, plus arrosé que le reste du Royaume. Et même sur cette région, le cumul moyen annuel de précipitations varie considérablement. Par exemple, il peut atteindre plus de 800 mm sur les reliefs, alors qu'il ne dépasse pas les 300 mm sur les plaines avoisinantes.

La région d'étude est caractérisée par une opposition climatique fondamentale entre les deux versants méditerranéen et atlantique. Cette position géographique se traduit par la succession des périodes très humides avec des précipitations très brutales parfois torrentielles et des périodes très sèches avec un taux d'évaporation assez important.

L'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des instabilités. La figureV.30 présente les différents processus intervenant dans le bilan hydrique d'un versant non boisé et boisé. Seuls les principaux processus sont considérés. (f.Arnaud, 2007; Ambroise, 1999)



FigureV.30 : Le cycle de l'eau sur un versant non boisé (a) et boisé (b) *(d'après Ambroise, 1999)*.

Les précipitations sont le principal apport d'eau dans le système (FigureV.30, a). A la surface, l'eau tend à pénétrer dans le sol par infiltration sous l'effet de la gravité. Elle est soit stockée, soit elle percole en profondeur et recharge les nappes. Cette percolation peut être bloquée par un niveau moins perméable, qui favorise alors l'existence d'un écoulement hypodermique latéral. En surface, dès que l'intensité des pluies dépasse l'infiltrabilité du sol, il y a déclenchement d'un "ruissellement par dépassement de l'infiltrabilité", (F.Arnaud, 2007). Enfin, l'évaporation est un retour différé de l'eau à l'atmosphère, qui constitue la principale sortie d'eau du système et qui a un rôle majeur dans le cycle de l'eau.

En présence de végétation, le cycle est profondément modifié (FigureV.30, b), ce qui a des conséquences positives et négatives sur la stabilité des versants. Une partie des précipitations est interceptée par le couvert végétal, le reste atteignant le sol par égouttement des feuilles et écoulement sur le tronc. La conséquence est une protection directe du sol contre les effets des gouttes (Berger et al., 2006b ; F.Arnaud, 2007).

De plus, la présence d'arbres participe à la réduction de l'énergie du ruissellement superficiel. Après captage par la végétation, une partie des eaux de pluie séjourne dans le sol et ensuite est diffusée progressivement

jusqu'à l'exutoire (Mériaux, 1984 ; F.Arnaud, 2007). C'est tout l'intérêt de la lutte contre les crues et l'érosion par le reboisement. En effet, en ralentissant l'érosion, la forêt favorise l'accumulation de matériaux détritiques due à l'altération des roches, particulièrement dans le cas des marnes. Les produits de l'altération constituent un sol qui a des caractéristiques mécaniques médiocres et qui est susceptible d'être entrainé par glissement (Garczynski, 1984).

2.1.1 L'interaction des facteurs géologiques et géographiques avec la variable pluviométrie :

En termes de **propriétés géologiques et géotechniques**, il semble que la perméabilité et l'épaisseur des sols soient les paramètres qui influencent le plus les valeurs pluviométriques responsables du déclenchement des glissements de terrain. D'abord, un sol très perméable et bien drainé requiert généralement des pluies intenses, sur des périodes très courtes, pour se saturer ou initier le ruissellement. En contrepartie, un sol peu perméable nécessite soit des précipitations très intenses et courtes pour favoriser le ruissellement et le déclenchement de coulées de débris, soit des précipitations faibles à modérées sur une longue période afin de permettre l'infiltration graduelle de l'eau dans le sol et mener à des ruptures superficielles ou profondes (F.Arnaud, 2007). Les sols àforte perméabilité qui requièrent des valeurs pluviométriques très élevées sur une courte période peuvent subir des coulées boueuses, du fait que la perméabilité facilite l'infiltration de l'eau en profondeur et diminue la probabilité de ruissellement. Seules des précipitations très intenses semblent pouvoir surpasser les taux d'infiltration de ces sols et générer un écoulement de surface qui incorporera des sédiments ce qui provoque des coulées. Ensuite, l'épaisseur des sols peut également affecter les valeurs pluviométriques responsables des mouvements de sols. En effet, le décrochement d'un sol profond est lié à une percolation lente de l'eau de pluie et/ou une augmentation constante de la nappe phréatique résultant des précipitations antécédentes et actuelles sur une longue durée, en dépit d'une faible intensité (Guzzetti et al., 2007 ; Marques et al., 2008). À l'inverse, la rupture d'un sol superficiel (<2 m) est facilitée par des évènements pluviométriques exceptionnels d'une courte durée et d'une forte intensité (Campbell, 1975 ; Wieczorek, 1987 ; Martelloni et al., 2012) et n'est généralement pas affectée par les précipitations antécédentes (Cannon et Ellen, 1985 ; Crosta et Frattini, 2001).

L'angle de pente, semble être l'un des paramètres topographiques qui influence le plus les valeurs pluviométriques seuils associées au déclenchement des glissements de terrain. Selon Akcali et al., 2010, des précipitations plus intenses sont nécessaires pour initier des ruptures sur des pentes très abruptes (>60°) ou très douces (<30°) par comparaison à des sols dont les angles se situent entre 30 et 60 degrès. Cette tendance serait intimement liée à l'épaisseur des sols ainsi qu'aux différents mécanismes d'infiltration affectant les pentes en fonction de leur inclinaison. À cet égard, une faible inclinaison de pente (<30°) tend à réduire la contrainte de cisaillement et favorise le développement des sols, faisant ainsi augmenter le volume d'eau nécessaire à leur saturation et décrochement subséquent. De manière similaire, les sols fortement inclinés (>60°) nécessitent aussi de très fortes intensités pluviométriques pour déclencher des glissements de terrain même si la forte inclinaison augmente la contrainte exercée par la gravité. En effet, une pente fortement inclinée tend à augmenter le ruissellement de surface, diminuant ainsi la quantité d'eau qui s'infiltre dans le sol et la probabilité de saturation de celui-ci, même si l'épaisseur à saturer est généralement minime (sols superficiels).

L'orientation des pentes représente un autre paramètre topographique qui influence la quantité de pluie enregistrée localement et, par conséquent, les valeurs seuils associées. En milieu montagneux par exemple, les pentes qui font face aux vents dominants sont reconnues pour recevoir davantage de pluie en raison du soulèvement orographique des masses d'air humides qui provoque des précipitations plus importantes sur ces versants (Wilson, 2000). Souvent les zones à forte pluviosité requièrent davantage de pluie pour déclencher des glissements de terrain comparativement aux zones à faible pluviosité, ainsi que les versants faisant face aux vents dominants, dont la pluviosité annuelle est plus élevée, devraient donc nécessiter davantage de pluie pour générer des glissements de terrain par comparaison aux versants situés sous le vent, où la pluviosité est généralement plus faible.

Enfin, **l'urbanisation et les activités anthropiques** associées représentent aussi des paramètres non négligeables dans le déclenchement des glissements de terrain par les précipitations. En effet, l'anthropisation des milieux naturels tend à augmenter la fréquence des ruptures de pente (Montgomery et al., 2000) tout en réduisant de manière significative la quantité de pluie requise pour ces ruptures (Akcali et al., 2010). Pour Montgomery et al., 2000, la déforestation des versants augmente la fréquence des glissements de terrain de trois à neuf fois pour des précipitations d'une durée et d'une intensité élevée.

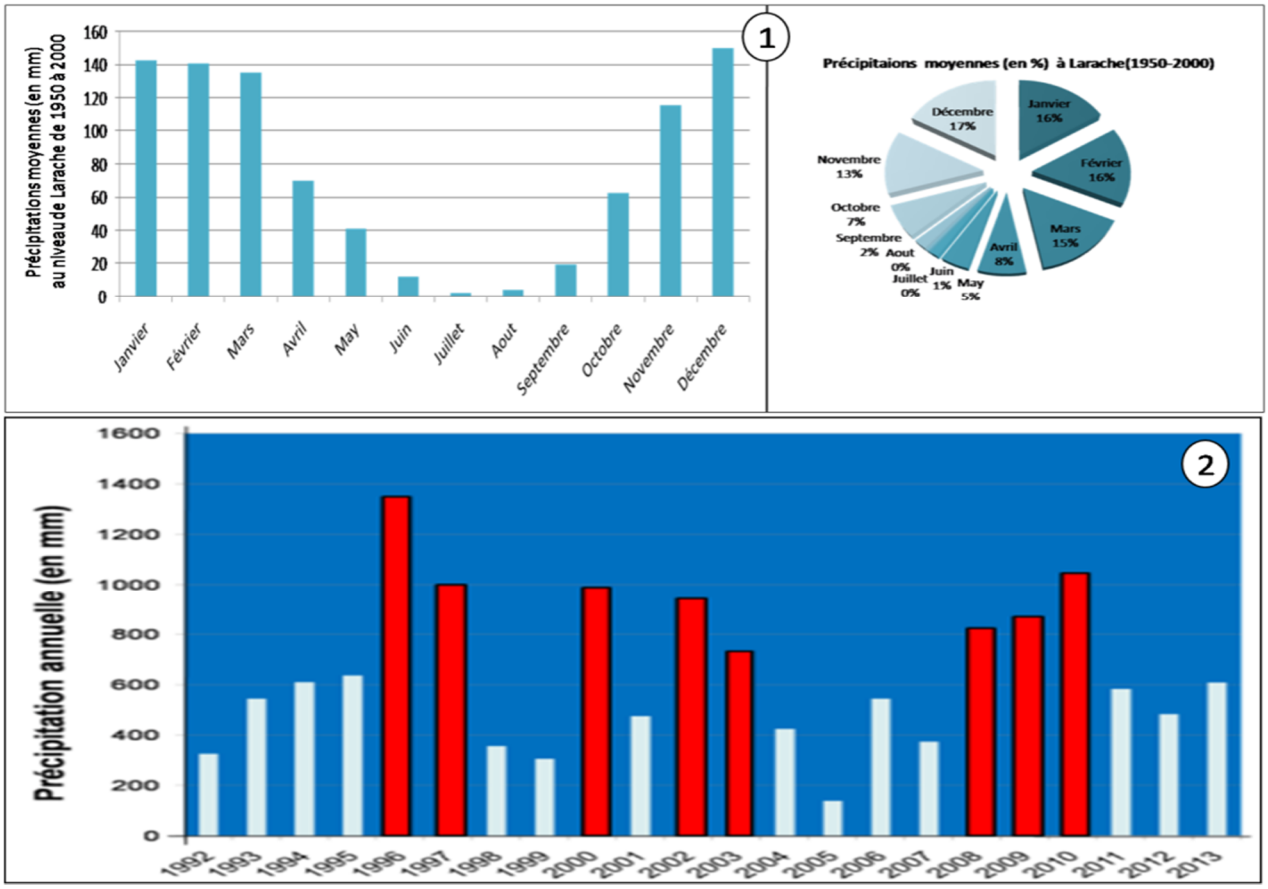
2.1.2 Approches sur l'influence des précipitations sur l'occurrence des glissements de terrain:

L'occurrence de tempêtes comme facteur de déstabilisation des pentes a amené plusieurs scientifiques, dès les années 1970, à analyser la relation entre les caractéristiques pluviométriques et le déclenchement des glissements de terrain (Talebi et al., 2010).

Plusieurs études antérieures, dont le but de montrer l'influence des précipitations sur l'instabilité des versants, se sont focalisées sur le calcul des seuils pluviométriques pour le déclenchement des glissements de terrain. Cependant, leur influence (possible) dans le déclenchement de glissements de terrain demeure complexe à déterminer. Du fait que leur influence peut varier considérablement sur un même territoire en fonction de variations locales ou régionales des conditions climatiques, géologiques, géomorphologiques et anthropiques (Kim et al., 1991 ; Roy.S, 2015). Ensuite, il n'y a toujours pas de consensus scientifique par rapport au nombre de jours devant être considéré pour que le seuil représente adéquatement le rôle des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain (Rahardjo et al., 2001 ; Frattini et al., 2009; Roy.S, 2015). Au sein de la littérature, des corrélations ont été établies pour des périodes antécédentes très variées, allant de 1 à 120 jours (Govi et Sorzana, 1980 ; Kim et al., 1991 ; Glade et al., 2000 ; Chleborad, 2003 ; Heyerdahl et al., 2003 ; Aleotti, 2004 ; Cardinali et al., 2006). Enfin, même si plusieurs chercheurs ont démontré l'importance des précipitations antécédentes dans le déclenchement des glissements de terrain, d'autres ont tout de même remis en question le rôle de ces précipitations. C'est le cas de Brand et al. ; 1984 qui stipulent qu'elles sont négligeables dans les régions tropicales en raison des fortes intensités pluviométriques qui suffisent, à elles seules, pour initier des mouvements de terrain. Pour Corominas et Moya, 1999 et Aleotti, 2004, les précipitations antécédentes apparaissent marginales dans les sols bien drainés, soit les sols grossiers et fortement perméables.

2.1.3 Les données climatiques au niveau de la région de Larache :

Afin de caractériser et de quantifier l'impact de la variable climatique sur l'instabilité des versants, nous avons étudié la fiabilité et détecté les éventuelles tendances internes. De ce fait, nous avons analysé les données climatologiques disponibles : la pluviométrie annuelle des années entre 1992-2013 et la moyenne mensuelle des précipitations au cours des années entre 1950 à 2000. Cela a permis de corréler entre la quantité des précipitations et les périodes d'activation des mouvements de pente. Les données locales des précipitations ont été obtenues à partir de la base de données worldClim (worldClim.org) au niveau de la station météorologique de Larache. (Figure V. 31).



FigureV.31 : 1: les moyennes des précipitations mensuelles entre 1950 et 2000; 2: les précipitations annuelles entre 1992 et 2013.

D'après les données climatologiques, il paraît que la région reçoit des averses plus ou moins fortes lors des mois les plus froids entre décembre et mars avec un pourcentage de 54% (Figure V.31;1). Au cours de cette période, la région connait la réactivation de plusieurs glissements de terrain. Sauf que les précipitations annuelles (FigureV.31;2), varient au cours des années, et le déclenchement des instabilités se produit même au cours des années peu pluvieuses. De ce fait, l'intégration de ce paramètre dans un modèle de calcul de la susceptibilité aux glissements de terrain reste discutable (Sébastien Roy, 2015).

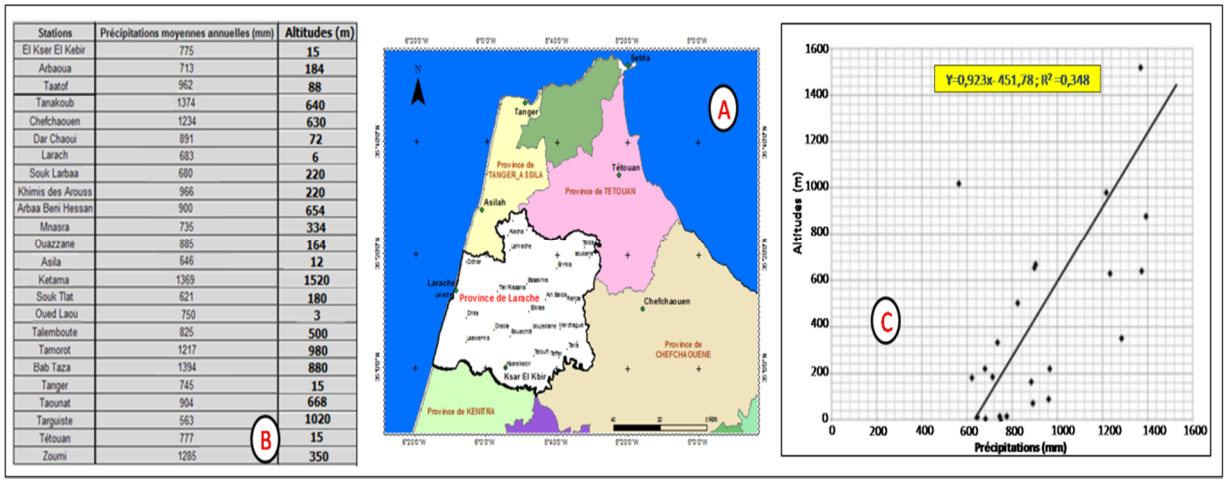
La cause la plus importante dans la genèse des mouvements n'est pas la quantité de pluies annuelles en elle-même, mais plutôt la conjonction, sur une même "année pluvieuse", de plusieurs phénomènes, dont l'intensité, le rythme des précipitations et l'alternance des périodes pluvieuses et des périodes séches (Mastere, 2011). L'effet cumulatif des précipitations était la cause du déclenchement de plusieurs glissements de terrain au niveau de la région. La concentration des précipitations dépassant la moyenne, sur une période courte (décembre, janvier et février) a un effet morphogénétique certain comparé à une même pluviosité répartie sur toute l'année. De telles concentrations se sont produites pendant les années 1996, 1997, 2000, 2009, 2010, 2016 et 2018. Les pluies qui tombent sur un terrain saturé en profondeur et sec en surface trouveront une infiltration facilitéeen surface (retrait) et déclencheront des mouvements (Mastere, 2011). C'est le cas de plusieurs glissements de terrain au niveau de la route RR410 qui relie la ville de Ksar EL Kebir à la ville de chefchaouen, et particulièrement le glissement de Taria (5°37'0"W; 35°2'30"N) qui a rejoué dès les premières précipitations de la période pluvieuse entre 2016-2018, et ceux desrégions avoisinantes où la chaussée de la route RR410 a été carrément détériorée voire coupée pendant plusieurs périodes.

De point de vue lithologique, la région est couverte par des unités marno-calcaires et marno-grèseuses voir argileuses, très peu perméables surmontées par des barres grèseuses très fracturées à forte perméabilité ; de plus, la partie Est de la région caractérisée par des variations rapides de pente, et qui connait le plus grand

nombre d'instabilités, est couverte par des sols peu développés (<2m). Aussi les versants les plus touchés par le phénomène de mouvements gravitaire, sont-ils ceux exposés WNW; W; WSW et SW, et reçoivent des averses intenses parfois torrentielles sur des périodes très courtes. Ces conditions toutes réunies font de la région un lieu favorable pour le déclenchement des glissements de terrain.
De part la qualité des sols peu perméables et superficiels, les précipitations intenses concentrées sur une courte période de l'année accroissent également la capacité érosive des Oueds et rivières, en donnant naissance à des phénomènes des badlands sur les formations tendres (unité de Tanger, unité de Loukkos, El Habt...), sapements de berge (charge hydrostatique). Elles entrainent aussi des écroulements et des chutes de blocs, au niveau des massifs grèseux de la nappe nummidienne, par détente des escarpements des falaises. Ces averses peuvent aussi saturer les terrains sur une forte épaisseur, au niveau des versants à pentes faibles (<30°) ce qui augmente la charge hydraulique des versants, diminue leur résistance au cisaillement et génère des instabilités donnant naissance à des coulées boueuses ou à des glissements planes.

2.1.4 Carte de la variable pluviométrie:

La carte des précipitations a été réalisée par interpolation des moyennes annuelles de précipitations au niveau régional (la région de Tanger_Tetouan) du fait que le nombre des stations météorologiques au niveau du secteur d'étude est trop insuffisant pour mener une étude climatologique plus détaillée. Pour cette raison, nous avons intégré des données pluviométriques des stations météorologiques situées au sein et en dehors de l'aire d'étude (FigureV.32, A et B). Cette interpolation a été calculée sur l'ensemble des données pluviométriques disponibles sur 70 ans (1941 ± 201) et au niveau de 24 stations (d'après Mastere, 2011), afin de limiter l'effet du faible nombre de stations.
L'interpolation des moyennes annuelles des précipitations par régression linéaire au niveau de la péninsule Tangéroise montre que les précipitations augmentent en fonction de l'altitude (FigureV.32,C).



Stations	Précipitations moyennes annuelles (mm)	Altitudes (m)
El Kser El Kebir	775	15
Arbaoua	713	184
Taatof	962	88
Tanakoub	1374	640
Chefchaouen	1234	630
Dar Chaoui	891	72
Larach	683	6
Souk Larbaa	680	220
Khimis des Arouss	966	220
Arbaa Beni Hessan	900	654
Mnasra	735	334
Ouazzane	885	164
Asila	646	12
Ketama	1369	1520
Souk Tlat	621	180
Oued Laou	750	3
Talemboute	825	500
Tamorot	1217	980
Bab Taza	1394	880
Tanger	745	15
Taounat	904	668
Targuiste	563	1020
Tétouan	777	15
Zoumi	1285	350

FigureV.32 : L'interpolation des moyennes annuelles des précipitations par régression linéaire au niveau de la péninsule Tangéroise. *A : Situation géographique des stations météorologique ;B : Précipitations moyennes annuelles effectives et altitudes respectives des stations ; B : corrélations des précipitations moyennes annuelles avec les altitudes de la région tangéroise (adaptées d'après Mastere, 2011).*

Parmi plusieurs interpolations qui ont été testées, nous avons choisi l'interpolation polynomiale locale (IPL) (*Local polynomial interpolation, LPI*), du fait que celle-ci se base sur plusieurs formules, ce qui permet l'optimisation du calcul pour un secteur assez grand, avec des données restreintes, aussi chaque formule est-il adapté à une partie donnée du secteur. La forme du calcul par voisinage et le nombre minimum de points peuvent être paramétrès. Ainsi les résultats obtenus par l'IPL sont-ils généralement beaucoup plus proches de

la réalité. Cette interpolation montre que la variable pluviométrie augmente en allant de l'Ouest vers l'Est d'une façon rectiligne ce qui coïncide avec la vérité terrain (FigureV.33).

Dans le cadre de cette recherche, du moment où notre objectif était l'estimation de la susceptibilité des versants aux mouvements de pentes, nous avons intégré la variable précipitation comme facteur déclenchant au niveau de l'approche heuristique et l'approche déterministe. Par contre, nous ne l'avons pas utilisée pour les deux approches probabilistes (la régression logistique et la théorie de l'évidence WoFe) du fait que ces approches ne tiennent compte que des variables de prédisposition.

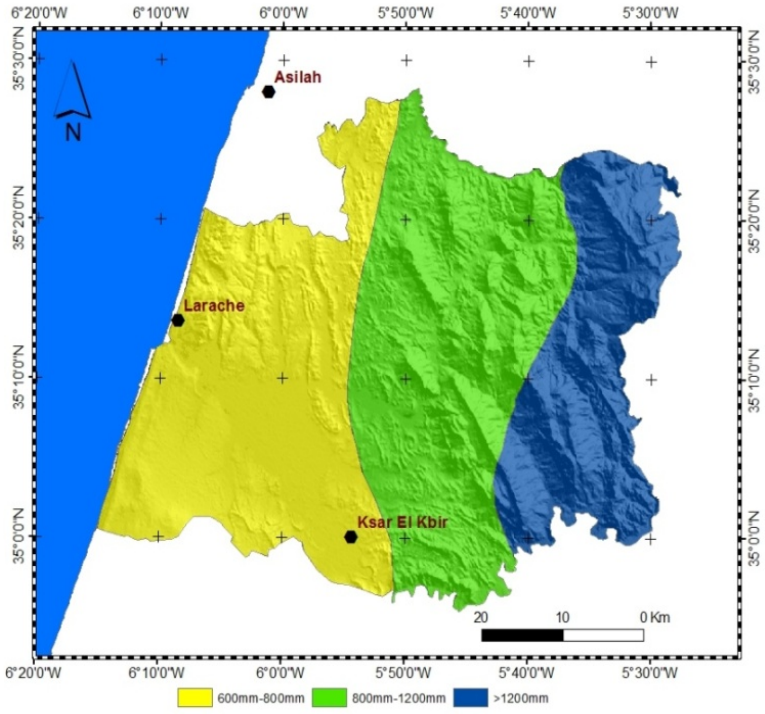


Figure V.33 : Carte des précipitations, issu d'interpolation polynomiale locale (IPL), drapée sur un MNT.

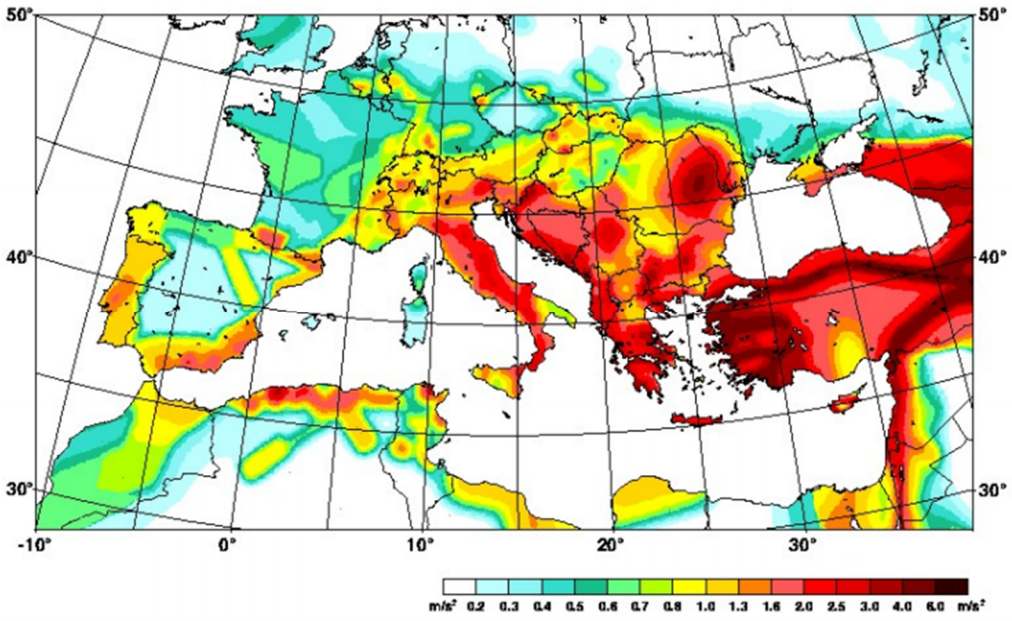
2.2. La variable sismicité:

Les secousses sismiques provoquent de nombreux glissements de terrain dans les zones de montagne actives. Dans la littérature mondiale, les rapports et les études de cas sur les mouvements de mass induits par les séismes sont abondants. L'exemple le plus désastreux pourrait être l'avalanche des roches de Nevado Huascarán, au Pérou, qui a été déclenchée par le tremblement de terre au Pérou (tremblement de terre d'Ancash; Mw= 7,9) le 31 mai 1970 et a enterré les villes de Yungai et Ranrahirca, avec 54000 victimes (Rodríguez et al., 1999). En outre, des événements de mouvements de terrain plus récents ont tracé aussi une ligne de destruction catastrophique et un taux élevé de pertes de vies humaines : Le séisme survenu au Salvador le 13 janvier 2001 (Mw= 7,6) a provoqué plusieurs glissements de terrain à Santa Tecla et à Comasagua faisant 500 morts (Evans & Bent, 2004). Lors de l'avalanche de roche Hattian Bala déclenchée par le séisme au Kashmir (Mw = 7,6) le 8 octobre 2005, environ 25 000 habitants de la vallée de Jhelum, au Pakistan, ont perdu la vie (Dunning et al., 2007). Un nombre tout aussi élevé (20 000) de victimes de la série de glissements de terrain à Beichuan, en Chine, après le séisme au Sichuan (tremblement de terre de Wenchuan ; Mw= 7,9) le 12 mai 2008 (Yin et al., 2009).le séisme de San Andreas du 18 avril 1906 (Lawson, 1908 ; Reid, 1910). En Italie, lors de la séquence sismique de 1783, une avalanche de roche a débuté près de la côte tyrrhénienne, près du village de Scilla, faisant environ 1500 victimes en raison du tsunami provoqué par l'impact de la masse rocheuse de la mer. Ces séismes étaient aussi violants qu'ils étaient à l'origine de plusieurs glissements co-sismiques les plus spectaculaires.

Au niveau régional, de nombreux documents historiques parlent des séismes de magnitude élevée, modérée, et faible, anciens et récents qui avaient un impact sur la stabilité des pentes, et qui ont aboutit à des pertes considérables et des enjeux non négligeables. Plusieurs cas ont été étudiés, à titre d'exemples : au niveau du Portugal (le séisme majeur du premier décembre 1755 dit "de Lisbonne", a causé de nombreux dégâts à l'intérieur du pays), l'Espagne (séisme de Lorca, 2011), l'Algérie (le 21 mai 2003, un fort séisme de magnitude Mw 6.8 a touché les régions de Boumerdès et d'Alger, causant d'énormes dégâts) ...

Le Maroc aussi n'est pas épargné du risque sismique comme ce fut le cas en 1522, 1624, 1755 ou en 1960 (T.Cherkaoui, 2012). De part sa situation au niveau d'une zone tectoniquement active, dans le cadre du

rapprochement des deux plaques : la plaque Africaine et la plaque Eurasiatique. Même ci les cas de séismes, à caractère destructif et qui ont engendré une déstabilisation des versants, sont trop minimes, en comparaison avec les autres pays avoisinants, le risque n'est pas nul (FigureV.34).



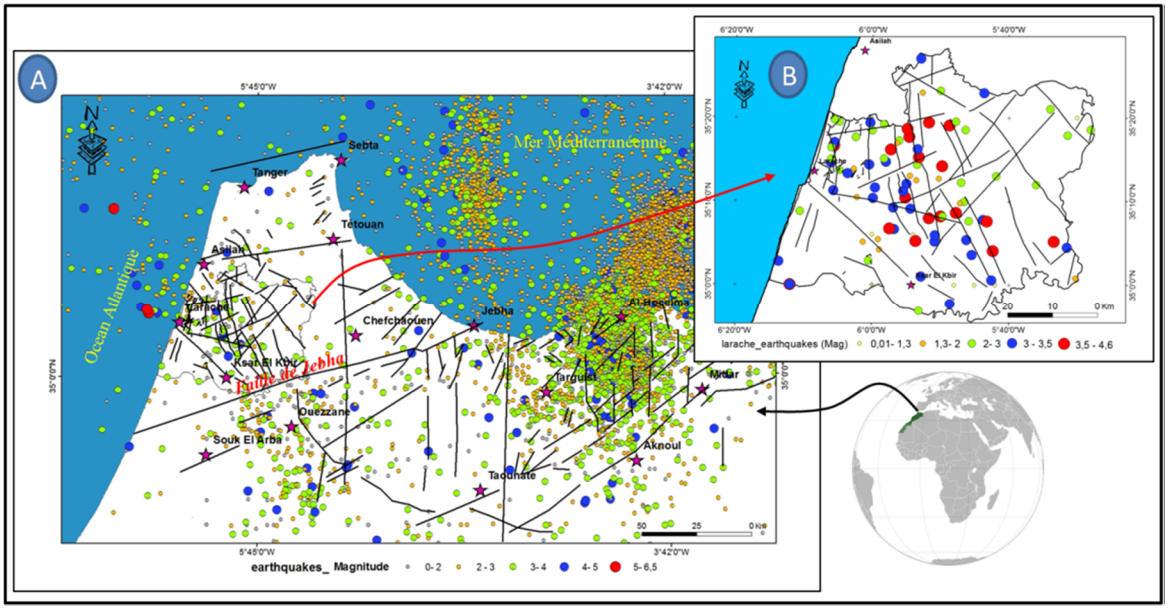
FigureV.34 : Carte de l'aléa sismique régional autour de la Méditerranée *: pic d'accélération maximale horizontale (m/s2). La probabilité de dépassement du pic maximum est de 10% sur une période de 50 ans (Grünthal et al., 1999; reprise par C.Larroque, 2009).*

Les cartes de sismicité du Maroc montrent que les provinces du Nord sont les régions les plus actives sismiquement ; du fait que le Nord du Maroc subit l'effet de la convergence, entre la plaque Africaine et l'Eurasie.Les études antérieures décrivent en domaine océanique une limite assez bien définie entre les deux plaques (Udias et al., 1976), mais la sismicité devient diffuse en domaine continental. Ces modèles font passer une faille de coulissage au niveau du détroit de Gibraltar entre le Maroc et l'Espagne. D'autres auteurs (Andrieux et al., 1971 ; Andrieux et Mattauer, 1973) envisagent plutôt l'existence d'une sous plaque d'Alboran coincée entre le Maroc et l'Espagne. Pour eux, elle estresponsable de la déformation continue de la région dans le cadre du rapprochement des deux plaques.
Au niveau du secteur d'étude, les données de la sismicité historiques établies pour le XIXe et le XXe siècle témoignent d'un caractère sismique faible à moyen, bien qu'il fasse partie de la chaîne rifaine (Maroc Nord ± Occidental), qui connait une activité sismique supérieure à celle enregistrée au niveau des régions Sud du royaume. La région a été affectée par d'importants tremblements de terre, qui ont été étudiés par plusieurs auteurs, de part leur relation avec le cadre géodynamique régional, structural, ainsi que leur impact sur l'environnement (Ramdani, 1991 ; El Mrabet, 1991 ; T.cherkaoui et al, 2012). Ces études ont mis le point sur des phénomènes liées à une déstabilisation des pentes, en relation avec les vibrations sismiques, à savoir : éboulement, glissements, processus de liquéfaction, crevasses... Notamment la crise sismique de 1755au Maroc au niveau de la région de Mly Zerhoun (Vogt Jean, 1985) ; le séisme d'Agadir 1961 (Cherkaoui et al., 2012) ; le Séisme d'El Houssima en 1994 (A.Talhaoui, 2014)...

2.2.1. Carte de sismicité et analyse sismo-tectonique au niveau du secteur d'étude :

En raison de l'absence de données sismiques publiques disponibles au Maroc, les paramètres des séismes ont été extraits du site en libre accès de IGN (Site officiel de l'Institut Géographique National espagnol): http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoFormularioCatalogo.do). Ce site publie tous les événements après leur occurrence, chaque une à deux heures, ainsi queleurs coordonnées géographiques, la magnitude, l'intensité,

la profondeur et la date/heure. La FigureV.35, montre la distribution spatiale (sur une carte de fracturation) de la totalité des séismes extraits des catalogues fournis par ce site, pour les régions Nord du Maroc y compris les zones littorales entre 1910 et 2018. Ce catalogue comporte au total 8501 évènements sur une surface de 55348Km^2 (3°28'48"W, 34°46'46"N ; 6°40'41"W, 34°47'5"N). L'analyse de ce fichiermontre que la région rifaine est le siège d'une activité microsismique importante ; les magnitudes sont comprises entre 0,2 et 6,3 et les profondeurs sont évaluées entre 0,2 et 103 km ; la plupart des séismes sont superficiels, où la majorité est localisée à une profondeur moins de 70 Km. En faisant un focus sur le secteur d'étude (la province de Larache), nous avons recensé 98 séismes pour la période 1937 et 2017. Ces événements ont une magnitude comprise entre 1.3 et 4.6. Cette activité micro-sismique est directement attribuée à la faille de Jebha qui affecte la région au Sud Est.



FigureV.35 : Distribution spatiale des séismes (1910 - 2018) au niveau du Rif septentrional *(A) et au niveau de la province de Larache (B). https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-acelerogramas/-/catalogo-acelerogramas/search*

L'analyse de la carte de sismicité montre une activité sismique diffuse sur toutes les régions rifaines au Nord du Maroc. Cette partie du pays, la plus active sismiquement, est situé dans une zone de collision, à proximité de la limite entre les deux plaques Afrique - Eurasie, ou le Nord du Maroc subit l'effet de la convergence. Une concentration élevée des épicentres au niveau de la mer d'Alborant et aux alentours d'Alhoucaima un peu moins au niveau de l'axe Larache-Ouezzane-Aîn Defali.

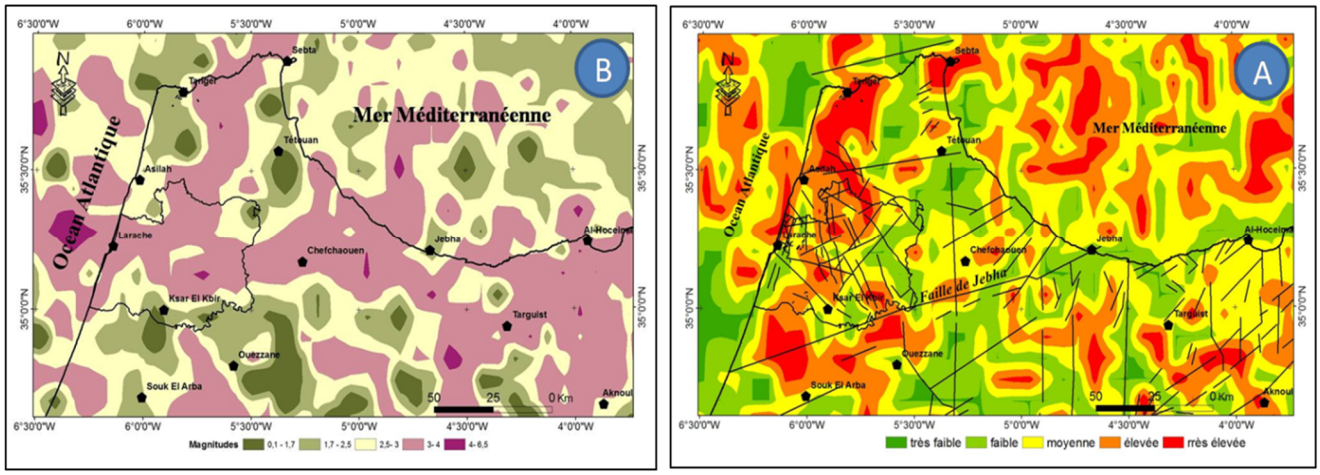
La chaîne rifaine, qui appartient à l'arc bético-rifo-tellien, est affectée au Miocène supérieur (Messinien), par des déformations à grand rayon de courbure suivie d'une tectonique cassante matérialisée par des décrochements et des failles normales au Plio-Quaternaire récent. Le jeu tardif de ces accidents majeurs (Paquet, 1969 ; Andrieux, 1971 ; Andrieux et al., 1971 ; Foucault, 1971 ; Didon et al., 1973, Aït brahim, 1991; Asebriy et al., 1993) a joué un rôle capital dans la structuration récente de la chaîne rifaine et dans l'activité sismique ancienne et récente.

La confrontation des données de sismicité, au niveau du Rif septentrional, avec la carte de fracturation, issue de la carte des mouvements tectoniques récents du rif 1:500 000 (J.Morel et al., 1992), révèle une certaine corrélation entre les failles NE-SW; NW-SE et N-S. (FigureV.35).

2.2.2. Interpolation des événements sismiques selon leur fréquence et leur magnitude:

Afin de corréler entre l'activité tectonique au niveau de la région et la sismicité,nous avons réalisé une interpolation en termes de fréquence d'événements et en termes de magnitude. Deux cartes sont ainsi

élaborées et interprétées (Figure V.36). Cette interpolation a été réalisée après plusieurs essais, en utilisant les commandes de la rubrique "*Interpolation*" incorporée dans le module "*Spatial Analyste Tools*" d'ArcToolbox 10.X. C'est l'interpolation IDW qui s'est avérée être la plus adaptée pour l'établissement de nos



cartes. Les cartes résultantes ont été reclassifiées en 5 classes.

FigureV.36 : (A) Interpolation IDW en termes de fréquence d'événements ; (B) Interpolation IDW en termes de magnitude.

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la fréquence des épicentres est trop élevée selon des directions NE-SW; N-S; NW-SE. Ces directions rappellent celles des failles déjà décrites, en particulier la faille de Jebha qui connait des accumulations élevées (J.Morel et al., 1992), ce qui justifie le rôle de la fracturation dans l'activité sismique au niveau du rif septentrional. Cependant l'analyse de la carte issue de l'interpolation, en termes de magnitude, montre que les grandes magnitudes coïncident avec les limites de nappes de charriage imbriquées les unes sur les autres ; sauf que les séismes à grande magnitude sont trop rares au niveau de la région. Ceci peut être expliquer par l'accumulation des effets du déplacement des nappes de charriage sur des périodes assez longues (Tahayt et al., 2008)

2.2.3. Relation sismicité et instabilités de terrain d'après les études antérieures:

Longtemps considérés comme un effet secondaire des séismes, les mouvements de terrain déclenchés par les séismes, essentiellement des éboulements, des avalanches rocheuses, des glissements de terrain, des coulées boueuses et des solifluxions peuvent être responsables d'une part importante des dégâts associés aux séismes (J.J. Bird & J.J. Bommer, 2004). Au court du vingtième siècle, près de 80 séismes sont à l'origine de 100 000 à 1000 000 de mouvements de terrain qui ont coûté la vie à plusieurs dizaines de milliers de personnes (D.K.Keefer, 1984; G.Domej, 2017; C.Bourdeau, 2018).

Lorsqu'on parle de l'impact des secousses sismiques sur la stabilité des versants étant donné un facteur déclencheur, une question s'imposealors :"*est-ce que tous les séismes peuvent déclencher des mouvements de terrain ?"*

Pour répondre à cette question, Keefer a recensé et analysé tous les mouvements de terrain déclenchés par des séismes à travers le monde entre 1811 et 1980. Sur la base d'un ensemble de 40 glissements de terrain induits par des séismes, Keefer, 1984 a pu définir des corrélations entre les caractéristiques des séismes qui génèrent des instabilités de terrain et celles des mouvements de terrain induits. Ainsi a-il associé l'ampleur des séismes (magnitudes) aux distances maximales par rapport aux mouvements gravitaire qui se produisaient (FigureV.37). Les relations sont représentées par la distance qui sépare l'hypocentre ou l'épicentre de la zone de rupture (glissement de terrain), ainsi que la magnitude du séisme qui a provoqué les mouvements gravitaires. Cette étude a été reprise et confirmée par G.Domej, 2017, en rajoutant des données plus récentes.

A cause des informations indisponibles sur l'emplacement exact de la rupture de faille ou sur l'hypocentre, pour plusieurs cas de séismes, les relations comparatives "magnitude-distance" ont été limitées aux distances des épicentres. Les valeurs se rapportent à la longueur de la ligne de connexion entre l'épicentre officiel et le glissement de terrain à la surface de la Terre par rapport au système géodésique mondial 1984 (WGS 84). Il convient à noter que les distances entre les glissements de terrain et l'épicentre peuvent varier considérablement par rapport aux hypocentres, en particulier si l'hypocentre est profond (G.Domej et al., 2017).

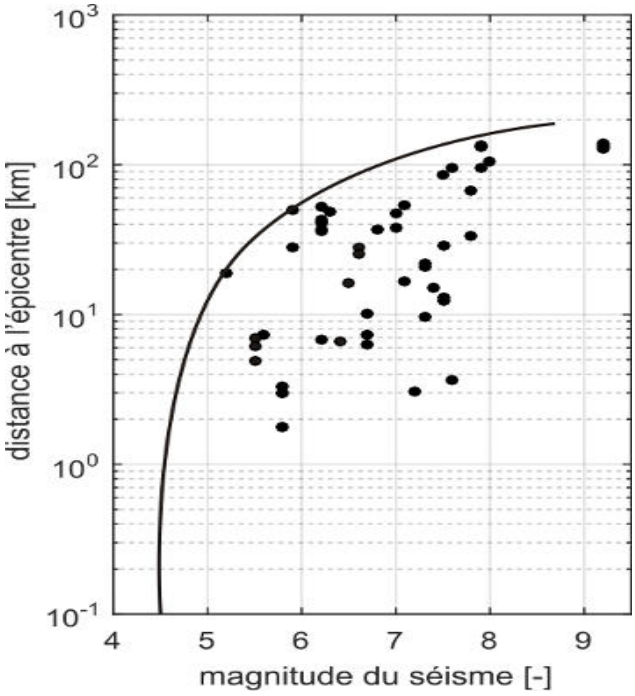


Figure V.37 : Corrélation entre la magnitude d'un séisme et la distance entre l'épicentre du séisme et le mouvement de terrain le plus lointain déclenché par ce séisme, la courbe noire est "la courbe enveloppe" qui englobe tous les mouvements de terrain déclenchés par des

D'après ces études, plus la magnitude du séisme est forte, plus il est capable de déclencher des mouvements de terrain à une grande distance de l'épicentre.Certains séismes peuvent même réactiver d'anciens mouvements de terrain comme ce fut le cas lors du séisme du 12 Janvier 2010 en Haïti, Deux observations sont à noter (V.Gishig et al., 2016; C.Bourdeau, 2018): **i**.la plupart des instabilités sont déclenchées par des séismes de magnitude modérée à élevée, typiquement supérieure à 5 (FigureV.37). Cette notion de "*magnitude minimale*" ou seuil de magnitude est toutefois à considérer avec prudence car elle ne tient pas compte de l'état de stabilité du versant avant le séisme. Cet état, souvent mal connu, résulte de toute l'histoire des "chargements" (séismes, fortes précipitations...) subis par le versant au cours des jours voire des années qui ont précédé le séisme. **(i).** Dans un versant en limite de stabilité, un séisme de magnitude modérée peut suffire à déclencher une instabilité. (**ii)**. la plupart de ces mouvements de terrain ne se produisent pas au-delà d'une certaine distance à la source du séisme qui dépend de la magnitude du séisme considéré. Plus la magnitude d'un séisme est forte, plus il est capable de déclencher des mouvements de terrain à grande distance de l'épicentre. (G.Domej, 2017; C.Bourdeau, 2018)

L'état de stabilité ou non stabilité d'un versant est lié à deux types de forces :**(i).** les forces motrices qui tendent à déstabiliser le versant. Ces forces sont causées par un séisme ou/et de fortes précipitations. **(ii).**les forces résistantes qui s'opposent au mouvement. Ces forces sont associées aux caractéristiques intrinsèques des matériaux, notamment leur cohésion et leur angle de frottement interne. Deux paramètres qui traduisent le comportement des sols à la rupture selon la loi de Mohr Coulomb[3]. (C.Bourdeau,2018; G.Domej, C.Bourdeau,2019): Un paramètre lié à l'effet des conditions géologiques et topographiques locales sur la propagation des ondes sismiques et les mouvements enregistrés en surface; paramètre connu sous le nom d'effet de site. L'autre paramètre est en relation avec les caractéristiques mécaniques et hydrostatiques des matériaux. Les séismes répétés subis par un versant conduisent à une déformation des matériaux constituant

[3]*Loi de Mohr Coulomb : cette loi mathématique est utilisée en géotechnique pour décrire de manière approchée le comportement de la plupart des sols à long terme soumis à des contraintes de cisaillement (on parle de rupture en cisaillement). Cette loi est caractérisée par deux paramètres : la cohésion qui définit la résistance au cisaillement du sol sous contrainte normale nulle et l'angle de frottement interne qui correspond à l'angle formé naturellement par un sol mis en tas, par rapport à l'horizontal.*

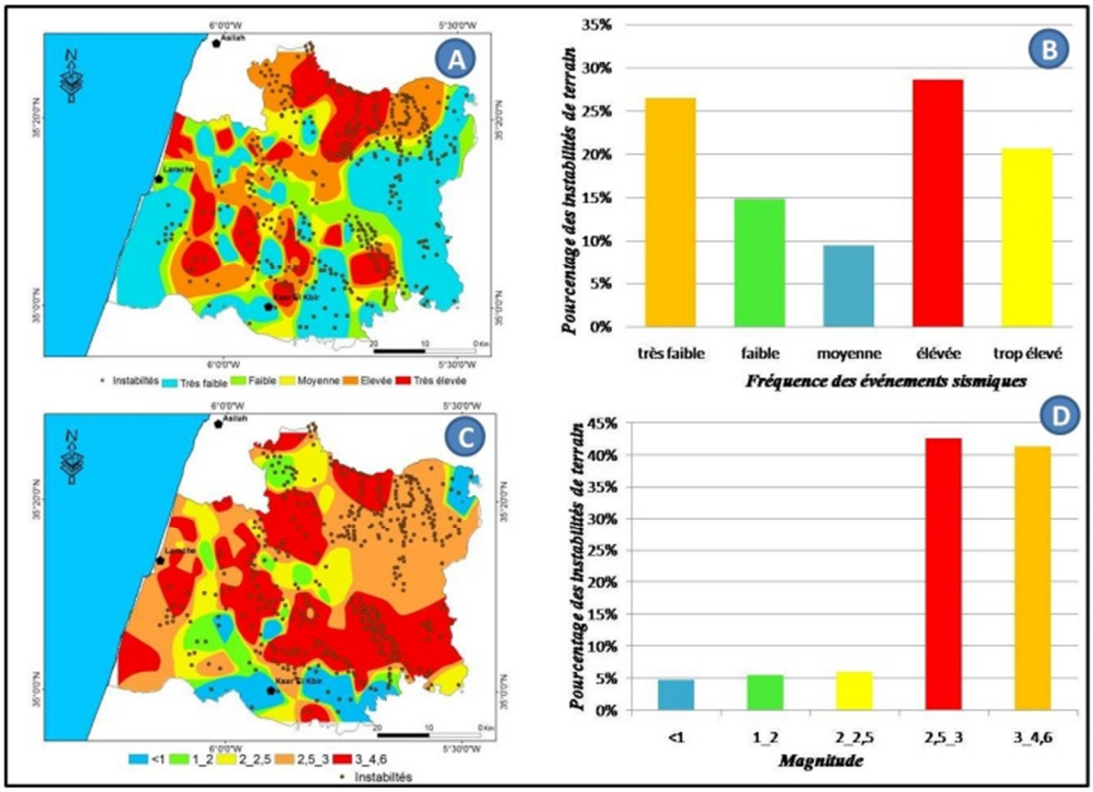
le versant. Celle-ci peut entraîner une diminution des caractéristiques intrinsèques des matériaux qui tendent à s'opposer au mouvement et ainsi faciliter le développement d'une rupture globale dans le versant.

2.2.4. Relation séisme-précipitation et déclenchement des mouvements de terrain:

Plusieurs auteurs ont mis le point sur la relation entre séisme et précipitation et leur contribution dans le déclenchement des instabilités de terrain. Cette corrélation vient du fait que plusieurs séismes se déclenchent juste après une bonne période pluvieuse (Costain et al., 1987 ;Muço, 1999). De ces observations découle l'hypothèse d'hydrosimicité ou sismicité induite par une saturation en fluides au niveau des failles et des fractures. Cette hypothèse de l'interrelation séisme-précipitation a mis fin à la théorie qui suppose que toute manifestation sismique est le résultat direct des variations dans les champs des contraintes (stress) tectoniques, comme l'effet de charge d'un barrage, et qui, elles mêmes se trouvent régies par une activité plus globale, c'est celle de la tectonique des plaques (Mastere, 2011).
Au niveau d'une région aussi fracturée et dont les unités lithologiques sont altérables telles que la nôtre, et si on rajoute les quantités de précipitations non négligeables, l'approche d'hydrosismisité est tout à fait concevable. En effet, le déclenchement d'un séisme peut être facilité par une altération chimique des roches accentuée par les contraintes tectoniques, associé aux effets mécaniquesgénérés par des changements dans la pression hydrostatique (Costain et al., 1987), et à la fatigue mécanique des roches sous l'effet de leur poids qui s'amplifie quand elles se gorgent brutalement d'eau, ceci entraine l'annulation de la résistance au cisaillement interne des roches par lubrification des plans de faille (Liritzis et Petropoulos, 1992).
Tout de même, la propagation des ondes de compression émises par les séismes dans les sols peu compacts, tend à comprimer les sols. Lorsque ces sols sont saturés en eau (précipitations ou autre...), l'eau occupe la totalité des pores (ou interstices) entre les grains de sols. En réponse à cette compression, la pression de l'eau contenue dans les pores des sols augmente et l'eau cherche à s'échapper des sols généralement vers la surface. Cependant lorsque le séisme est rapide, suffisamment grand ou répété par rapport au temps nécessaire au drainage des sols, l'eau ne parvient pas à s'échapper des sols. Plus la pression d'eau augmente dans les sols, plus la résistance mécanique des sols diminue et plus la rupture du versant est probable (C.Bourdeau, 2019).

2.2.5. Corrélation entre les données sismiques et les instabilités de terrain auniveau de la région de Larache :

Afin de tester l'impact de l'activité sismique au niveau de la région sur l'occurrence des instabilités de terrain, nous avons essayé d'effectuer une corrélation entre les données de sismicité et la distribution des instabilitésde terrain au niveau du secteur d'étude, ceci en fonction de la densité des épicentres et selon les magnitudes. Du coup, nous avons calculé le pourcentage des points de mouvements de pentes (touts types confondues), au niveau de chaque classe, que ce soit pour la carte de densité des épicentres ou pour la carte des magnitudes (FigureV.38).
D'après les résultats obtenus, il paraît que le plus grand nombre d'instabilités de terrain coïncide avec les classes à fréquence élevée à trop élevée, et avec les classes dont la magnitude est comprise entre 2,5 et 4,6. Quoique les événements sismique à grande magnitude (>5) soient trop rares, il paraît que la fréquence élevée d'événements à magnitude modérée (entre 2,5 et 4,6) joue un rôle important dans la genèse des instabilités de terrain, d'où le rôle de l'activité tectonique régionale dans l'occurrence des mouvements gravitaires.



FigureV.38 : Relation de l'activité sismique avec les instabilités de terrain. *(A) carte de densité des épicentres (fréquence); (B) histogramme de corrélation entre les points d'instabilités en fonction de la fréquence d'événement sismique enregistrés entre 1937 et 2016; (C) carte d'interpolation des magnitudes; (D) histogramme de corrélation entre les points d'instabilités avec les magnitudes enregistrés entre 1937 et 2016.*

Conclusion :

Ce chapitre a permis de détailler les différents variables prédictives et déclenchants en vue de la cartographie de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain au niveau de la province de Larache. Nous avons alors créé une base de données structurée selon divers échelles et adaptable avec les différentes méthodes de prédiction. Certains paramètres ont été acquispuis traités, d'autres sont créés spécifiquement. Ces jeux de données se distinguent selon quatre catégories de facteurs prédictifs principaux :

1. données topographiques et géomorphologiques ;
2. données géologiques: la lithologie et la fracturation ;
3. données sur l'occupation du sol ;
4. données hydrologiques et hydrogéologique;

Ainsi que deux catégories de facteurs déclencheurs naturels :

1. Pluviométrie;
2. Sismicité;

Le tableau.V.10 propose une synthèse des différents jeux de données acquis pour la cartographie de la susceptibilité. En plus de la présentation spatiale, au niveau régional, de chacun des facteurs cartographiés, la source d'acquisition, leur classification et les indices préliminaires attribués à chaque classe.

Ces différents facteurs ont été constitués en fonction de l'échelle de travail visée pour la cartographie de la susceptibilité. Une grande attention a été portée à l'adaptation des données, à la thématique de recherche, à la résolution, et à l'occurrence de chaque variable vis à vis de l'instabilité des versants.

Pour la cartographie à l'échelle moyenne et large (1/50 000 et 1/10.000ème), les données de base nécessitent d'être créées spécifiquement, en rajoutant plus de détails.

Les analyses descriptives de ces variables ont permis de comprendre la part de chacune d'elles dans l'occurrence des mouvements de terrain au niveau de la province de Larache. C'est ainsi que nous avons pu prendre la décision dans la quantification préliminaire des différentes classes pour les variables qui vont être considérés dans l'évaluation de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain.Les statistiques descriptives, réalisées pour chacune de ces variables ne permettent pas de choisir la plus adaptée pour notre recherche. Du coup, cette quantification sera plus tard revérifiée et calculée en termes de poids en utilisant différentes méthodes de calcul, selon le modèle de prédiction adopté (voir chapitres, VI, VII). Finalement, nous avons élaboré une base de données structurée et adaptée pour être utilisée dans l'estimation de susceptibilité des versants aux mouvements gravitaires. Cette phase nous a pris le plus de temps et d'effort, que ce soit lors de l'acquisition des données ou dans leur traitement.

Tableau V. 10 : Synthèse des différents facteurs acquis et structurés pour la cartographie de la susceptibilité

Catégories	Variables		Sources	Présentation spatiale	Echelle/ Résolution	Classes	Surface (Km^2)	MT (%)	Indice
Facteurs prédictifs	**Géologiques**	**Lithologie**	Cartes géologique; images satellitaires; visites du terrain	Vecteur convertie en raster	1/200 000 Et 1/50 000	Marnes	1406,98	59,05	4
						Pélites gréseux	203,03	8,33	1
						Grés	559,46	13,57	2
						Terrasses alluviales	595,73	19,05	3
		fracturation	Cartes géologiques et structurales; images satellitaires; visites du terrain	Vecteur convertie en raster par interpolation "Line density"	1/100 000 Et 1/50 000	Densité très faible	345,59	29,06	1
						Densité faible	567,45	37,53	2
						Densité moyenne	599,31	19,94	3
						Densité élevée	603,10	10,46	4
						Densité très élevée	642,46	2,97	5
	Topographiques	**La pente**	MNT (Résolution 30m et 5m)	raster	30m 5m	<2,5°	1009,36	22,03	3
						2,5°-7°	748,02	31,87	5
						7°-20°	516,65	24,2	4
						20°-40°	319,88	18,57	2
						>40°	170,64	5,66	1
		L'exposition	MNT (Résolution 30m et 5m)	raster	30m 5m	NE	680,53	21,96	4
						NW	459,73	24,58	5
						SW	560,61	14,56	1
						E	673,38	19,75	3
						S	386,87	19,33	2
		L'hypsométrie	MNT (Résolution 30m et 5m)	raster	30m 5m	<25m	449	13,96	3
						25m-150m	1158,61	23,94	4
						150m-550m	850,69	48,13	5
						550m-1000m	249,10	9,48	2
						1000m-1648m	37,54	4,49	1
	L'hydrogéologie	**Réseau hydrographique**	Cartes topogra-phique; MNT	Vecteur convertie en raster par interpolation "Line density"	1/200 000 Et 1/50 000	Densité très faible	386,78	19,24	1
						Densité faible	574,67	37,53	2
						Densité moyenne	721,08	27,08	4
						Densité élevée	722,29	11,40	5
						Densité très élevée	364,02	4,75	3
		Anomalies du réseau hydrographique	Carte du réseau hydrographique et MNT	Vecteur convertie en raster	1/100 000 Et 1/50 000	-	-	-	-
	Occupation du sol	**Couverture végétale et habitations**	Bibliographie; Images satellitaires	Vecteur convertie en raster	1/100 000 Et 1/50 000	Les terrains agricoles	1783,089	63	5
						Forêt et boisements	778,52	23	4
						Matorrals	133,68	11	3
						Habitations	46,57	2	2
						Lacs et marécages	18,69	1	
		Réseau routier	Cartes topographique; Images satellitaires	vecteur convertie en raster	1/100 000 Et 1/50 000	-	-	-	-
Facteurs déclencheurs	**La pluviométrie**		worldClim.org	Raster interpolation IDW	-	-	-	-	-
	La sismicité	**Carte de densité**	Site officiel de l'Institut Géographique National espagnol	Vecteur convertie en raster par interpolation IDW	1/100 000	-	-	-	-
		Carte des magnitudes						-	

CHAPITREVI: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE DES VERSANTS AUX INSTABILITES DE TERRAIN A UNE ECHELLE REGIONALE (1/100 000) EN UTILISANT LA METHODE HEURISTIQUE

1. Introduction :

Comme il est difficile de prédire avec précision l'instant d'une rupture de pente, il est donc important d'identifier les zones sensibles à ces instabilités de terrain et de cartographier la susceptibilité des versants à cet égard, cecien fonction des facteurs conditionnants propres à chaque région. Cette prédiction de l'occurrence des mouvements de terrain est nécessaire, afin d'éviter des enjeux graves sur les individus, l'environnement et l'économie.

Les cartes de zonage de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain peuvent aider les concepteurs et les ingénieurs environnementaux à choisir un endroit approprié pour la mise en œuvre des projets de développement. Les résultats de ces études peuvent être utilisés comme informations fondamentales par les responsables et les planificateurs (Pradhan, 2011). Tout de même, l'identification des zones à fort potentiel de glissement de terrain permet d'éviter d'ultimes dangers possibles.

Depuis le début des années 1970, de nombreux scientifiques ont tenté d'évaluer l'aléa lié aux mouvements de terrain et ont produit des cartes de zonage des risques décrivant la distribution spatiale des phénomènes d'instabilité de terrain, en appliquant différentes méthodes basées sur le SIG. Plusieurs modèles et méthodes ont été proposés afin de produire des cartes d'occurrence aux instabilités de terrain. Parmi ces méthodes, l'approche AHP (Analytic Hierarchy Process) qui a été largement utilisée par plusieurs chercheurs (Saaty, 1980; Komac, 2006; Yalcin, 2008, L.Aitbrahim& al., 2018).

Le processus d'analyse hiérarchique ou AHP (Analytic Hierarchy Process) est une théorie de mesure et de prise de décision, c'est une méthode multicritère développée à la "*Wharton School of Business de l'Université de Pennsylvanie par T.L. Saaty*" (Saaty, 1980). L'AHP a été appliqué à de nombreux domaines. Pour ceci, elle a été implantée au niveau de plusieurs logiciels d'aide à la décision tels (Expert Choice, HIPRE3^{+}, ArcGis, Multcsync). Elle permet ainsi de résoudre un grand nombre de problèmes décisionnels de façon quantitative en élaborant un modèle d'aide à la décision, représenté sous la forme d'une hiérarchie. Elle permet la comparaison des critères quantifiables et intangibles (Vargas, 1990).

En utilisant cette méthode, dans le cas de la cartographie de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain, chaque couche de données utilisée est divisée en sous-facteurs, qui sont pondérés en fonction de leur importance, puis ces couches sont assemblées dans le but de produire la carte finale. Cette approche repose sur trois principes : décomposition, jugement comparatif et synthèse des priorités (Malczewski, 1999).

Cette méthode étant donné une approche semi-quantitative, le poids de chaque couche dépend du jugement de l'expert, de sorte que plus ce jugement est précis, plus la carte produite est compatible avec la réalité (Moradi et al., 2012).

Les objectifs de cette étude sont : l'assemblage des facteurs prédictifs et leur structuration, inventaire et cartographie des instabilités de terrain, évaluation du poids relatif à chaque facteur prédictifen appliquant le modèle AHP et enfin la superposition de différentes couches pour l'élaboration d'une carte de susceptibilité aux glissements de terrain sur un environnement SIG.

Tout de même, le développement actuel des systèmes d'information géographique (SIG) facilite les analyses morpho-métriques complexes des facteurs prédictifs, et l'estimation de la probabilité spatiale qu'un

mouvement de terrain se produit, sur un versant, pour différentes conditions locales. La méthode AHP étant basée sur l'avis de l'expert, celui-ci se sert de l'inventaire des instabilités de terrain afin d'effectuer une comparaison binaire estimative entre les différents facteurs prédictifs.

2. Le choix de l'hiérarchie analytique (AHP) pour l'analyse des risques de glissement de terrain :

La prévention et la gestion des différents risques naturels (séismes, inondations, éruptions volcaniques, etc...) répond à certains critères généraux communs, sauf que les caractéristiques propres à chacun de ces phénomènes rendent impossible une utilisation systématique d'un même raisonnement ou d'une procédure similaire. Les instabilités de terrain, qui constituent un des risques naturels les plus répandus dans le monde, présentent en effet quelques spécificités telles que : (E.A.Yazdad, 2016)

- chaque événement affecte une zone limitée, à la différence par exemple d'un séisme qui frappe des aires se mesurant en centaines ou milliers de kilomètres carrés ;
- certains événements sont parfaitment identifiés à l'avance, par exemple lorsqu'il s'agit du basculement d'une colonne rocheuse bien individualisée ; d'autres en revanche sont supposés pouvoir survenir à un emplacement quelconque d'une formation géologique donnée ;
- chaque événement est unique, par opposition aux pluies extrêmes, aux crues ou aux avalanches qui peuvent se reproduire quasiment à l'identique plusieurs fois au même endroit.

D'après Saaty, 2008, "*nous sommes tous fondamentalement des décideurs ; tout ce que nous faisons consciemment ou inconsciemment est le résultat d'une décision. Les informations que nous recueillons sont pour nous aider à comprendre les événements, afin de développer de bons jugements lors de prise des décisions à propos d'un événement donné. Cependant, les informations recueillies ne sont pas toutes utiles pour améliorer notre compréhension et nos jugements, et si nous ne prenons des décisions que de manière intuitive, nous sommes enclins à croire que toutes sortes d'informations sont utiles et plus le nombre d'information est grand, plus la décision prise est juste. Or, ce n'est pas toujours vrai, il existe de nombreux exemples qui montrent que trop d'informations présente un vrai problème, dans le cas où il faut prendre une décision, que d'avoir peu d'informations. En savoir plus ne garantit pas que nous comprenions mieux. Pour prendre une décision, nous devons connaître :* ***(i)*** *le problème,* ***(ii)*** *la nécessité,* ***(iii)*** *le but de la décision,* ***(iv)*** *les critères de la décision,* ***(v)*** *leurs sous-critères,* ***(vi)*** *les parties prenantes* ***(vii)*** *les groupes concernés et* ***(viii)*** *les actions alternatives à prendre. Nous essayons ensuite de déterminer la meilleure alternative, ou dans le cas de l'allocation des ressources, nous avons besoin de priorités pour les alternatives afin d'allouer leur part appropriée des ressources*".

C'est pour cela, le fait de procéder à des approches probabilistes est alors une chose inhérente ; afin de diminuer le taux de subjectivité ; puisqu'il s'agit d'un phénomène où le poids de l'incertain est évident (cas des instabilités de terrain), Favre et al., 2000. De ce fait, la demande de la quantification des risques en utilisant des méthodes probabilistes est de plus en plus impérieuse, dans le domaine des mouvements de terrain, ainsi que pour tous les autres risques.

Plusieurs méthodes ont été décrites dans le chapitre.III, parmi elles la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) dite aussi Analyse Multicritère Hiérarchique. Cette approche qui a été créée par Saaty (1980), c'est une approche semi-quantitative fondée sur la base des règles d'analyses hiérarchiques. C'est l'une des solutions qui ont été largement sollicitées par plusieurs chercheurs (Figueiredo, 2001 ; Correia, 2007 ; Saaty, 2008...), étant donné que c'est une méthode qui offre la possibilité de quantifier des caractéristiques qualitatives, par le biais de sa pondération. Le choix de la méthode d'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrain est lié aussi à l'échelle de la zone étudiée, ce qui a été mentionné dans les chapitres. I et III.

Selon plusieurs auteurs, l'AHP est une méthode efficace pour prendre une décision complexe, il aide le décideur à établir des priorités et prendre alors une meilleure décision (M.Boroumandi, 2014; Figueiredo, 2001; Correia, 2007; Saaty, 2008; L.Aitbrahim & al., 2018). Les principaux avantages de l'utilisation de l'AHP en tant que méthode experte dans l'analyse de la susceptibilité aux instabilités de terrain sont :

1) Tous les types d'informations relatives aux mouvements de terrain peuvent être inclus dans le processus de discussion ;

2) le jugement est structuré de manière à ce que toutes les informations soient prises en compte ;

3) Les règles de discussion sont basées sur les connaissances et les expériences des experts ;

4) Lorsqu'un consensus est atteint, les pondérations pour chaque facteur prédictif sont obtenues automatiquement par calcul de vecteur propre de la matrice de comparaison ;

5) la consistance du processus de décision peut être détecté en utilisant des valeurs d'Indice de Consistance (IC) et le rapport de cohérence (RC). (Yalcin, 2008 ; Kayastha et al., 2013).

3. Processus de l'hiérarchie analytique (AHP) pour l'analyse des risques de glissement de terrain :

La méthode est basée sur la comparaison des différents facteurs conditionnants, deux par deux. À partir de la construction d'une matrice carrée (Figure VI.2, A), nous évaluons l'importance relative d'un facteur par rapport à un autre, en utilisant pour cela une échelle adéquate (Saaty, 1990), voir figure VI.1 et c'est à ce niveau que l'expert doit intervenir, en se référant à une connaissance profonde de la vérité terrain.

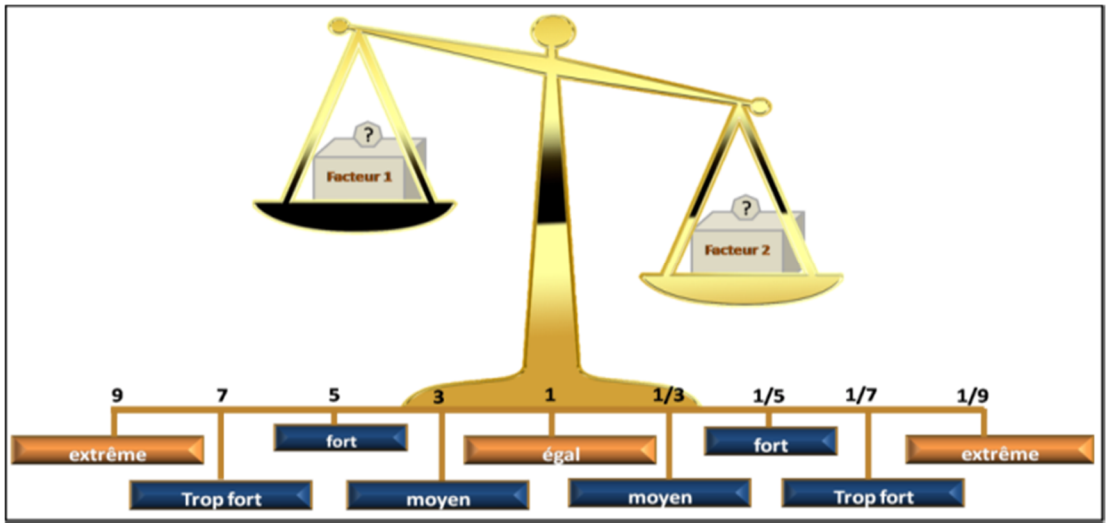


Figure VI.1: L'échelle de comparaison binaire entre les différents facteurs conditionnants *; adaptée d'après (Saaty, 1990).*

Une fois que la matrice de comparaison est remplie, sur la fonction "*Set weights*" de l'application AHP implanté sur ARCmap, un poids propre à chaque facteur prédictif est calculé, en exécutant la commande "*Compute*", puis la carte des probabilités à posteriori correspondante sera générée en exerçant l'instruction "*Create map*" (Figure VI.2). Le raster résultant n'est qu'une expression de la hiérarchie ou de l'ordre de priorité calculé pour les variables considérées. Ce résultat peut être enfin jugé et validé par le décideur à travers une simple interpolation entre la carte obtenue et l'inventaire des instabilités de terrain qui ont survenu dans le passé.

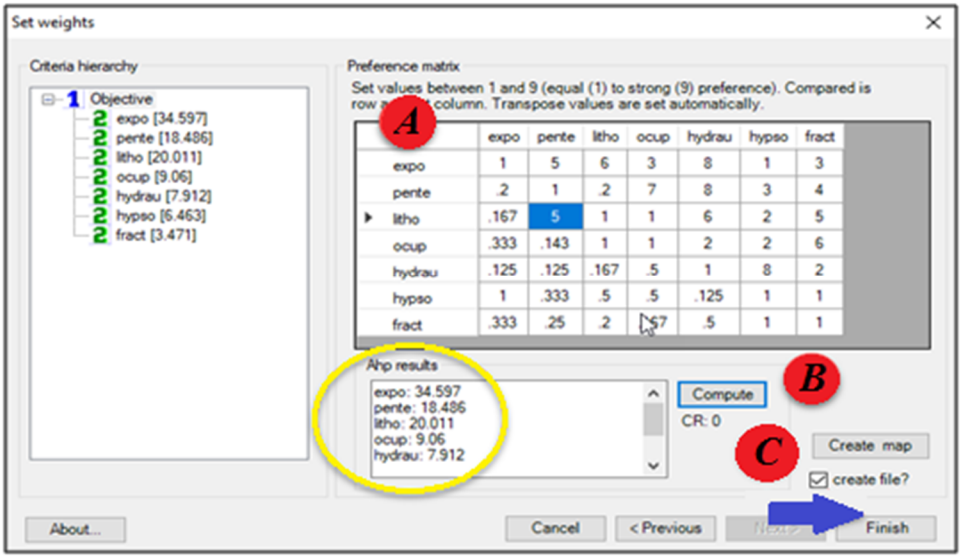


Figure VI.2: La procédure de l'exécution de la fonction AHP, sur ARCmap*: (A) remplir la matrice; (B) Calculer le poids; (C) Générer la carte des probabilités.*

L'estimation de la susceptibilité des versants aux glissements de terrains a nécessité en premier lieu la collecte et la numérisation de l'information spécifique aux variables prédictives (facteurs conditionnant de l'occurrence des mouvements de terrain) ; constituant ainsi une base de données graphique et tabulaire numérique.

Pour le calcul des poids des facteurs prédictifs, qui ont été pris en compte, nous avons procédé à une estimation de l'occurrence de chaque facteur vis à vis des mouvements gravitaires, en analysant la corrélation des instabilités inventoriés avec chaque facteur et même chaque classe. Ainsi pour chaque classe, nous avons indiqué un indice de 1à 5 (5 forte occurrence;....; 1 faible occurrence). Puis nous avons essayé plusieurs simulations pour le calcul du poids sur l'application AHP. Les résultats ont été contrôlés par la suite.

La superposition des cartes des facteurs nous a permis d'établir une carte de susceptibilité en mouvements de terrain. Ce type d'analyse requiert alors les étapes suivantes (Aleotti et Chowdhury, 1999) : (Figure VI.3)

(1) Cartographie et structuration des facteurs qui contrôlent la stabilité des versants ;
(2) Établissement de la carte d'inventaire des glissements de terrain ;
(3) Superposition et corrélation des différents facteurs avec les glissements de terrain ;
(4) Établissement de la matrice de comparaison binaire ;
(5) calcul des poids des facteurs en utilisant la fonction AHP ;
(6) Validation des résultats ;
(7) L'élaboration de la carte des probabilités, en associant les facteurs à leurs poids ;

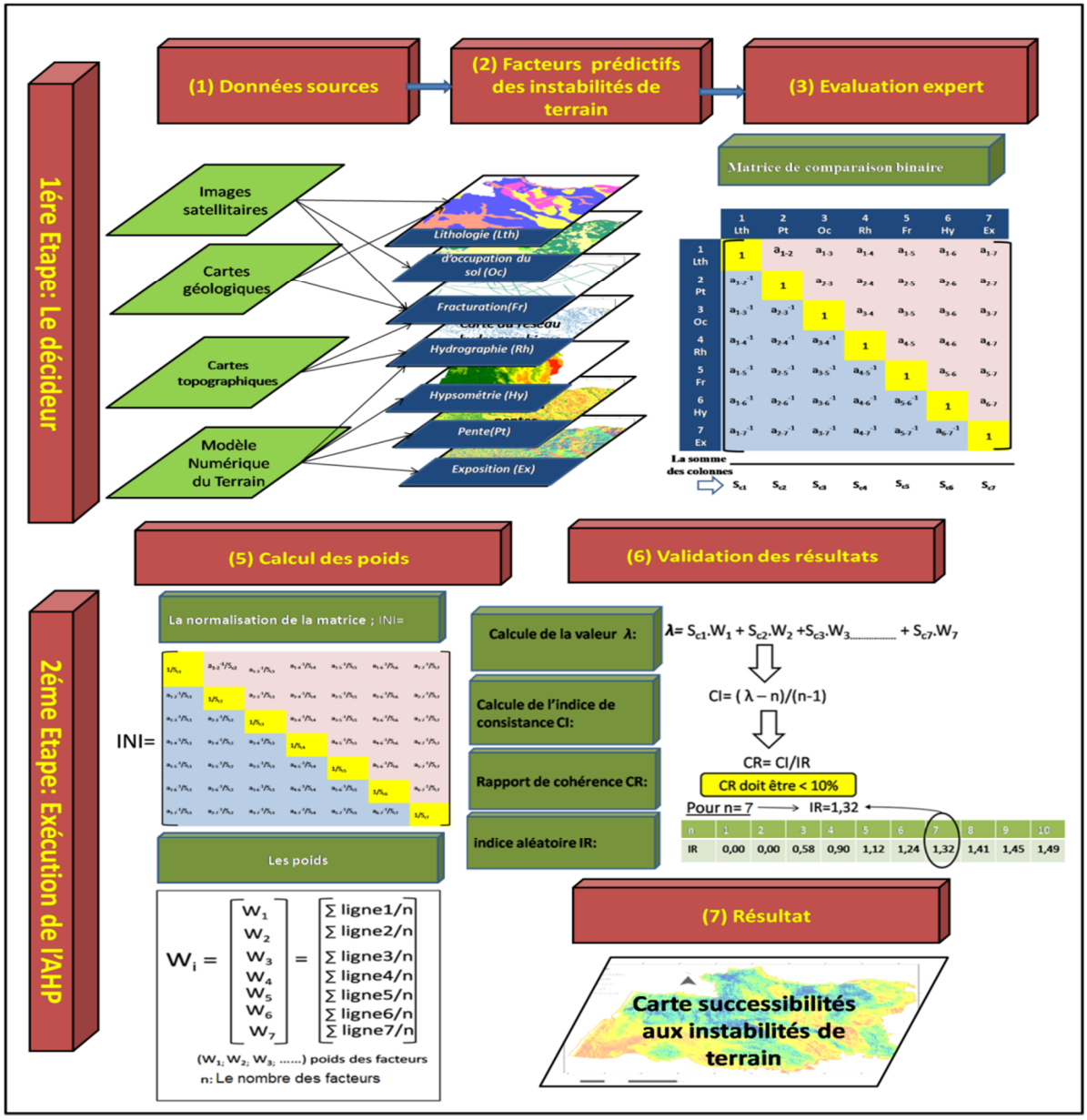


Figure VI.3: Démarche suivie pour l'élaboration de la carte de susceptibilité aux instabilités de terrain par approche heuristique.

Dans notre cas, seulement la composante spatiale de l'aléa a été prise en compte. Cependant; il est possible d'incorporer une composante temporelle dans l'analyse, en particulier lorsqu'un lien est établi entre certains paramètres hydro-météorologiques, sismologiques ou autres paramètres déclenchants... et le déclenchement des mouvements de terrain.

4. Pondération des facteurs conditionnants par le processus d'analyse hiérarchique :

La démarche scientifique d'analyse pour la cartographie du risque telleque les instabilités de terrain est synthétisée par les questions suivantes (Malet, 2003 ; Cruden.D. and Fell.R., 1997 ; Fell et al., 2005), en distinguant les caractéristiques des variables génératrices d'un aléa et les caractéristiques des variables prédictives du terrain, et aussi l'ampleur des enjeux :

- quel type de mouvements de terrain peut-il se produire dans une unité de surface à caractéristiques définies ?
- quelle probabilité d'occurrence spatiale d'instabilité de terrain pour une multitude de facteurs de prédisposition ?
- quel est le poids attribué à chaque facteur dans le calcul d'aléa ?
- comment évaluer l'aléa d'instabilité de terrain avec une intensité donnée, et la probabilité de sa propagation spatiale et temporelle ?

4.1. Estimation de l'occurrence des variables conditionnant vis à vis des instabilités de terrain :

Le problème de prédétermination des niveaux de susceptibilité a été largement discuté par plusieurs auteurs (Millies-Lacroix, 1968 ; Antoine, 1995 ; Antonini, 2000 ; F.Sossi Alaoui, 2005, Fell et al, 2008). Fell et al, 2008 a dressé une échelle d'estimation de référence, qui a été adoptée surla base de deux critères seulement : le degré de pente et la nature géotechnique des matériaux. Cinq classes de susceptibilité ont été décrites (voir tableau VI.1).

Tableau VI. 1 : Echelle de degré de susceptibilité d'après Fell et al, ; 2008

Degré de susceptibilité	Définition	Critères d'identification
Faible à nul	Faible à nulle probabilité d'apparition deglissement de terrain	Pente faible à nulle
Faible à moyen	- Faible à moyenne probabilité deglissement de faible ampleur, pouvantdevenir forte sous action anthropique (surcharge, route, terrassement - Faible à nulle probabilité d'apparition demouvement de grande ampleur	Traces d'instabilité reconnueslocalement au niveau du versant pente moyenne (10°< p<30°), terrainmeuble, peu cohérent et/ou altérationprofonde des matériaux
Moyen à fort	Faible probabilité d'apparition de glissementde grande ampleur	Traces d'instabilité nombreuses
Fort	Forte probabilité d'apparition de glissementde faible ampleur	Pente forte à très forte (p>30°), terrainmeuble, peu cohérent et/ou altérationprofonde des matériaux
Très fort	Forte probabilité d'apparition de glissementde grande ampleur	Traces d'activité de glissement degrande ampleur

(Source : BRGM/RP-55533-FR ; Mai 2007)

Cette méthode de prédétermination de la susceptibilité des versants aux mouvements gravitaires néglige plusieurs facteurs conditionnants qui peuvent avoir un rôle non négligeable dans la genèse des instabilités de terrain. D'autre part, l'intégration de plusieurs facteurs rend le jugement beaucoup plus compliqué.
Dans le but de réussir cette étape, nous nous sommes basés sur plusieurs visites de terrain et sur l'analyse des différentes études antérieures. C'est ainsi que nous avons bâti une base de données contenant des facteurs prédictifs et des facteurs déclenchants (voir chapitre IV). Ces variables ont été par la suite structurées en format "Grid" puis reclassifiées, puis nous avons élaboré une corrélation entre chaque paramètre et l'existence des instabilités de terrain dans le présent ou dans le passé (voir chapitre V). Nous avons aussi élaboré des études ponctuelles sur certains cas de glissement de terrain (voir chapitre IV), ainsi nous avons procédé à une cartographie de la susceptibilité de terrain, d'après une approche qualitative reposant principalement sur l'avis de l'expert. Tout ceci, nous a permis de construire une idée sur l'occurrence de

chaque facteur vis à vis duphénomène "mouvements de pente", ce qui rend la prise de décision, lors de la comparaison binaire et l'exécution de la matrice, plus facile et aussi afin de diminuer toute subjectivité.
Les facteurs de prédisposition (facteurs de contrôle) et les facteurs déclenchants, qui ont été considérés et jugés comme paramètres expliquant l'occurrence de nouveaux glissements de terrain, sont de cinq catégories: géologiques (la lithologie, lafracturation, sismicité); topographiques (pente, hypsométrie, exposition); hydrologiques; occupation du sol; climatologiques.
Le faciès : la nature lithologique joue un rôle très important dans la stabilité des pentes, du fait que la région connait un grand contraste de point de vue qualité géotechnique des sols. Selon les unités lithologiques, la plupart des glissements de terrain se situent dans les marnes et lesterrasses alluviales (voir chapitre V). Selon la susceptibilité de chaque entité ou classe aux instabilités de terrain, la carte a été reclassée en quatre classes aux quelles nous avons attribué un indice (1;3;4;5).
L'angle de pente : ce paramètre joue un rôle important dans la susceptibilité des versants aux glissements de terrain (Rozos et al. 2008), du fait que les mouvements gravitaires sont directement liés au degré de pente. Selon la corrélation entre les instabilités de terrai, la carte des pentes a été reclassée en 5 classes avec des indices (1;2;3;4;5). Sauf que la pente est moins importante que le faciès du fait que les unités lithologiques à qualité géotechnique médiocre peuvent connaître des instabilités de terrain même sur des pentes douces.
L'occupation du sol : la présence et la densité du couvert végétal est l'un des facteurs déterminants dans la stabilité des versants ; c'est pour cela que cette variable a été jugée aussi importante, sauf qu'elle est moins prétentieuse que la pente du fait qu'au niveau des forêts où la couverture végétale est très dense, on y trouve tout de même des glissements de terrain surtout au niveau des pentes plus raides.
Les précipitations : La plupart des instabilités de terrain se produisent après de fortes averses, à cause de l'infiltration rapide des eaux lors de fortes pluies, ce qui augmente le degré de saturation des sols. Ceci a une influence directe sur le potentiel d'occurrence des versants aux instabilités de terrain (Pourghasemi et al., 2009). La région est sujette à des averses forte au cours de la saison pluvieuse, avec une pluviométrie moyenne annuelle dans ce bassin est de 890 mm, donc les précipitations sont l'un des principaux paramètres déclencheurs des mouvements de pente.
L'introduction de la variable pluviométrie, dans le modèle de prédiction, conduit à une évaluation de la probabilité du déclenchement des glissements conditionnellement à une quantité de pluie bien déterminée, et sur une durée donnée ; donc ce paramètre peut être considéré dans l'occurrence temporelle des instabilités de terrain plutôt que l'occurrence spatiale. Pour cela, nous avons élaboré des essais de calcul de la susceptibilité aux instabilités de terrain, en introduisant la pluviométrie et d'autres essais qui n'ont paspris en considération ce paramètre.
Le réseau hydrologique : En général, le potentiel d'instabilité de terrain augmente à proximité des rivières, car les cours d'eau peuvent nuire à la stabilité des versants, soit sous leur effet érosif ou par augmentation du niveau de l'eau au niveau des parties inférieures, ce qui entraîne une saturation des matériaux et une exagération de la pression interstitielle (Ercanoglu et al., 2004). Dans notre région d'étude, la proximité des cours d'eau est l'un des facteurs qui influence la survenue des mouvements de pente. Une carte de densité des cours d'eau a été créée à l'aide d'une interpolation (voir chapitreV).
La fracturation : Les failles représentent les caractéristiques structurelles de la région. Elles décrivent une zone de faiblesse associée à un mouvement relatif au niveau duquel l'occurrence aux instabilités de terrain est logiquement plus élevée (Pourghasemi, 2008). De ce fait, la probabilité d'occurrence de glissements de terrain augmente lorsque la densité de fracturation augmente, ou aussi lorsque la distance par rapport à la faille diminue. Ce facteur affecte non seulement les structures des unités lithologiques, mais il contribue également à la perméabilité du terrain, provoquant une instabilitédes pentes (Iovine et al, 2008).
L'exposition : Les paramètres liés à ce facteur tels que l'exposition des versants au soleil, les vents desséchants, les précipitations (humidité ou degré de saturation) et les discontinuités peuvent contrôler la fréquence des glissements de terrain ; quoique certains auteurs (Greenbaum et al., 1995) aient mentionné que l'exposition n'a pas une influence significative sur l'instabilité des versants. Cependant plusieurs chercheurs

ont prouvé le lien entre l'orientation des pentes et la fréquence des mouvements de terrain (De Graff et al., 1980, Marston et al. 1998). Dans cette étude, l'exposition a été subdivisé en cinq intervalles (NNE; E; S; SW; NW). Les classes présentant une forte occurrence le NW et NNE.

L'hypsométrie : la relation entre l'activité des glissements de terrain et l'altitude est très discutable : Certains chercheurs utilisent l'élévation comme paramètre de contrôle des instabilités de terrain (Creighton et al, 2006); d'autres chercheurs constatent que l'activité des mouvements de pente, dans un bassin spécifique, est plus importante au niveau de certaines altitudes (Hatamifar et al., 2012). Cependant, dans la plupart des régions de l'hémisphère Nord, les relations entre l'altitude et les précipitations sont directes, d'autre part le changement d'altitude a une relation étroite avec la température de l'air. De ce fait, le changement de ces deux paramètres (la pluviométrie et la température) influence la quantité d'eau de stockage, le type et la densité de végétation ainsi que l'évapotranspiration, etc. Cinq classes ont été créées : 0-25m, 25m-150m, 150m-550m, 550m-1000m, 1000m-1650m. D'après l'étude de corrélation avec les instabilités cartographiées, la forte occurrence des mouvements de pentes correspond à la classe 150m-500m.

La sismicité : c'est un facteur déclencheur, du fait que suite aux tremblements de terre plusieurs glissements de terrain se produisent (Moreiras, S.M., 2004). Dans la région d'étude, l'activité sismique est faible ; et du fait que la survenue d'un tremblement de terre est directement liée à l'activité des failles, nous n'avons pas intégré ce facteur dans le modèle de prédiction, et on s'est contenté de la fracturation. Le tableau VI.2, résume les jugements qui ont été proposés sur la base de l'analyse de la relation entre la genèse des glissements de terrain et l'occurrence des variables conditionnants.

Tableau VI. 2 : L'estimation de l'occurrence des facteurs conditionnants par interpolation

Catégorie	Le facteur	Les classes	L'occurrence par classe	L'indice	L'occurrence par facteur
Géologique	Lithologie	Marnes	Très forte	5	Très forte
		Pélites gréseux	Moyenne	3	
		Grés	Faible	1	
		Terrasses alluviales	Forte	4	
	Fracturation	Densité très élevée	Moyenne	4	Moyenne
		Densité élevée	Très forte	5	
		Densité moyenne	Forte	3	
		Densité faible	Faible	2	
		Densité très faible	Très faible	1	
topographique	Pente	0°-2,5°	Moyenne	3	Forte
		2,5°-7°	Très forte	5	
		7°-20°	Forte	4	
		20°-40°	Faible	2	
		40°-60°	Très faible	1	
	Exposition	Nord-Nord Est	Forte	4	Faible
		Sud West	Très faible	1	
		Nord West	Très forte	5	
		Est	Moyenne	3	
		Sud	Faible	2	
	Hypsométrie	>25m	Moyenne	3	Très Faible
		25m-150m	Forte	4	
		150m-550m	Très forte	5	
		550m-1000m	Faible	2	
		1000m-1648m	Très Faible	1	
Occupation du sol	Occupation du sol	Terrains agricoles	Très fort	5	Forte
		Forêt et reboisements	Fort	4	
		Matorrals et végétations naturelles	Moyenne	3	
		Habitations	Faible	2	
		Lacs et marécages	Très faible	1	
Hydrologique	Densité du réseau hydrograph-ique	Densité très élevée	Moyenne	3	Moyenne
		Densité élevée	Très forte	5	
		Densité moyenne	Forte	4	
		Densité faible	Faible	2	
		Densité très faible	Très faible	1	
Climatologique	Précipitations	600mm-800mm	Faible	2	Forte
		800mm-1200mm	Moyenne	3	
		>1200m	Très forte	5	

4.2. Établissement de la matrice des comparaisons binaires et calcul du poids :

Le processus de l'hiérarchie analytique (AHP), implanté sur ARCmap, calcul la pondération pour chaque critère (*Wi*) en prenant le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre de la matrice, puis en normalisant la somme des composants à l'unité comme suit :

$$\sum_{i=0}^{n} Wi = 1 \quad \textit{(Equation VI.1)}$$

Sur la base des résultats obtenus, nous avons procédé à une comparaison, deux à deux, de l'occurrence des paramètres conditionnants vis à vis desinstabilités de terrain. Chaque facteur est évalué par rapport à tout autre facteur en attribuant une valeur relative comprise entre 1 et 9. Lorsqu'un facteur "*i*" sur la colonne est plus important que le facteur "*j*" sur la ligne, cette valeur varie entre 1 et 9. A l'inverse, la valeur varie entre 1/2 et 1/9.

Nous avons effectué plusieurs essais : dans certains, nous avons utilisé sept paramètres prédictifs seulement, pour d'autres, nous avons introduit en plus des sept paramètres, le facteur pluviométrie (comme facteur déclencheur).

Pour sept paramètres, la matrice de comparaison 7x7 similaire aux matrices de comparaison par paire qui sont de nature symétrique, seules 25 valeurs étaient nécessaires pour remplir, c'est la moitié diagonale et triangulaire supérieure de la matrice. Les cases diagonales d'une matrice de comparaison par paire prennent toujours une certaine valeur de 1. Les cases des moitiés supérieure et inférieure sont symétriques et les valeurs correspondantes sont donc réciproques. Une fois la matrice construite, le programme AHP génère les poids des couches thématiques de tous les facteurs causaux classés sur la base des poids des classes entrées et sur la base des comparaisons binaires effectués.

Le résultat final se compose des poids des facteurs et d'un ratio de cohérence calculé (CR). Les modèles avec un CR supérieur à 0,1 ont été automatiquement rejetés, tandis qu'un CR inférieur à 0,1 était souvent acceptable.

Dans cette étude, nous avons gardé les résultats qui ont le CR le plus faible. Pour le modèle 7x7 nous avons obtenu un CR de 0,04 (modèle (1)) ; Pour le modèle 8x8 (sept paramètres prédictifs plus la pluviométrie) (modèle (2)) le CR est de 0,00 ; ce rapport indique un niveau raisonnable de cohérence dans la comparaison par paire pour les deux modèles, ce qui est assez bon pour reconnaître les pondérations des facteurs. Par conséquent, le poids correspondant à la lithologie est le plus élevé, tandis que l'hypsométrie est la plus faible.

Les tableaux VI.3 présentent les matrices qui ont été retenues et les poids des facteurs obtenus par l'application AHP.

Tableau VI. 3 : Les matrices utilisées pour le calcul du poids *(modèles 1 et 2)*

« J » / « i »	Matrice de comparaison							Les poids en %
	Lithologie	Pente	Occupation du sol	Densité du réseau hydrographique	Densité de fracturation	Exposition	Hypsométrie	
Lithologie	1	2	3	4	5	6	7	35.2445
Pente	0,5	1	2	3	4	5	6	23.8735
Occupation du sol	0,333	0,5	1	2	3	4	5	15.7719
Densité du réseau hydrographique	0,25	0,333	0,5	1	2	3	4	11.1501
Densité de fracturation	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2	3	6.429
Exposition	0,167	0,2	0,25	0,333	0,5	1	4	4.4374
Hypsométrie	0,143	0,167	0,2	0,25	0,333	0,25	1	3.0935

« j » / « i »	Matrice de comparaison								Les poids en %
	Lithologie	Pente	Occupation du sol	Densité du réseau hydrographique	Pluviométrie	Densité de fracturation	Exposition	Hypsométrie	
Lithologie	1	2	3	4	5	6	7	8	33.1325
Pente	0,5	1	2	3	4	5	6	7	23.066
Occupation du sol	0,333	0,5	1	2	3	4	5	6	15.7235
Densité du réseau hydrographique	0,25	0,333	0,5	1	2	3	4	5	10.5903
Pluviométrie	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2	3	4	7.0936
Densité de fracturation	0,167	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2	3	4.7681
Exposition	0,143	0,167	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2	3.2698
Hypsométrie	0,125	0,143	0,167	0,2	0,25	0,333	0,5	1	2.3562

4.3. Génération des cartes de susceptibilités en appliquant l'AHP :

Le principe général de l'approche heuristique multicritères est basé sur la combinaison de la pondération relative de plusieurs jeux de variables conditionnants.

Pour la cartographie de la susceptibilité aux instabilités de terrain, deux niveaux de pondération ont été pris en considération :

- Un poids relatif a été attribué, en premier lieu, aux classes de variables. Il correspond à leur importance estimée dans le processus de mouvements gravitaires.
- Sur la base du même principe, les facteurs prédictifs ont été pondérés en adoptant la comparaison par paire.

Une fois que les scores des critères sont normalisés et que les poids ont été calculés, on peut générer la carte d'index de susceptibilité, en utilisant la méthode "*Weighted Linear Combination*" WLC (Voogd, 1983), c'est la méthode la plus simple qui regroupe les critères pour former un seul score d'évaluation. Dans la méthode WLC, chaque critère est multiplié par son poids à partir de la comparaison par paire. Les poids calculés sont intégrés dans une somme linéaire, selon l'équation suivante (Nijkamp& al., 1990 et Voogd, 1983):

$$S = \sum W_j \times X_{ij} \qquad \textit{(Equation VI. 2)}$$

S étant la carte d'index de susceptibilité finale, W_j est le poids attribué à la viable à la variable "j" et X_{ij} est le poids attribué à la classe i de la variable j.

Les poids peuvent avoir une grande influence sur le résultat. Étant donné que les poids des facteurs sont additionnés un à un, les scores finaux de la carte résultante sont exprimés sur une même échelle. De plus, les pondérations attribuées à chaque critère déterminent le niveau de compromis par rapport aux autres facteurs explicatifs.

L'exécution de la commande "Craete map" implique l'application de la formule *(Equation VI. 2)*. Les cartes index de la probabilité à posteriori, résultantes par approche AHP, comportent cinq classes de susceptibilité : très forte, forte, moyenne, faible, très faible. La Figure VI.4. La carte de zonage de l'aléaglissement de terrain obtenue indique que les zones à risque fort à très fort couvrent environ 40,99% (1118,6km^2) de la superficie totale tandis qu'environ 21,83% (583,22km2) ont été classées comme étant à risque modéré et 37,64% de la zone d'étude (1027,32km^2) sont classés comme peu ou non susceptible.

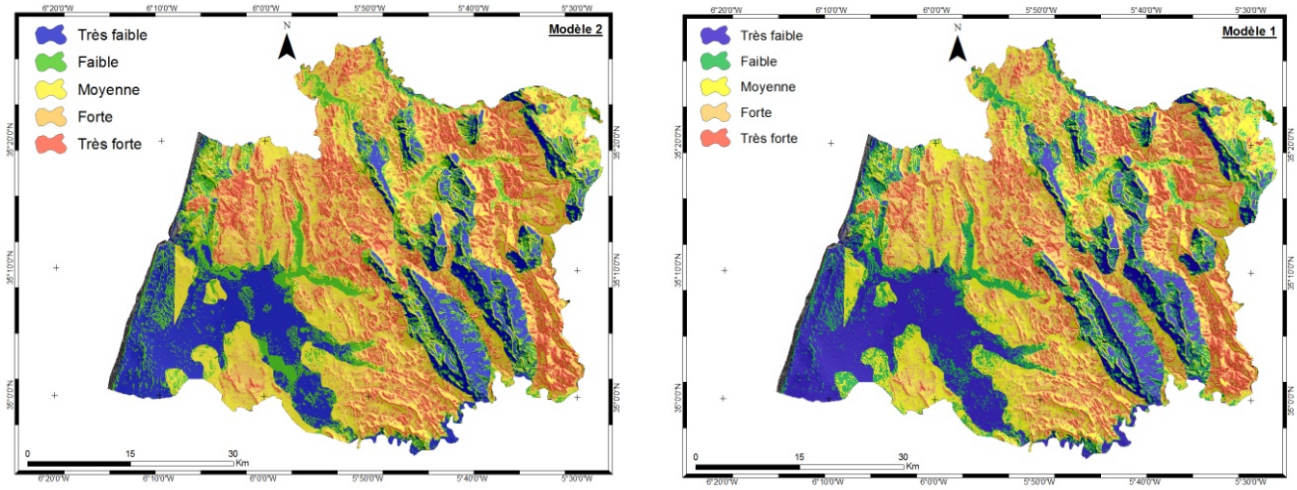


Figure VI.4: Cartes de susceptibilité des instabilités de terrain par approche heuristique, *dans la région de Larache (modéle 1: facteurs prédictifs; modéle2: facteurs prédictifs et déclenchants)*

Les cartes de susceptibilité de glissements de terrain obtenues, pour les deux modèles par la méthode AHP, montrent des résultats très proches quoi que nous avons introduit un des facteurs déclencheurs les plus déterminants. Ces cartes comportent 5 classes : très faible, faible, moyenne, fort et très fort. Elle a été croisée avec les mouvements de terrain inventoriés pour tester et évaluer sa validité. Les résultats montrent que : 57% des mouvements de pentes identifiés sont situés dans des régions à susceptibilité forte à très forte. 17% des mouvements gravitaires sont situés dans une zone de susceptibilité moyenne et 26% des mouvements de pente appartiennent à des zones de susceptibilité faible à très faible. Les résultats obtenus sont considérés comme satisfaisantes pour la validation des cartes de susceptibilité des mouvements de terrain élaborée et le modèle AHP utilisé. Ces cartes de susceptibilité aux instabilités de terrain fournissent des informations logiques et pertinentes sur les instabilités actuelles et aussi sur d'éventuelles instabilités de terrain qui peuvent surgir dans le futur, ainsi ces résultats paraissent en parfait harmonie avec l'évolution morphologique de la région.

Les histogrammes de la figure VI.5 présentent lesrésultats statistiques qui ont été appliqués pour la validation des cartes résultantes.

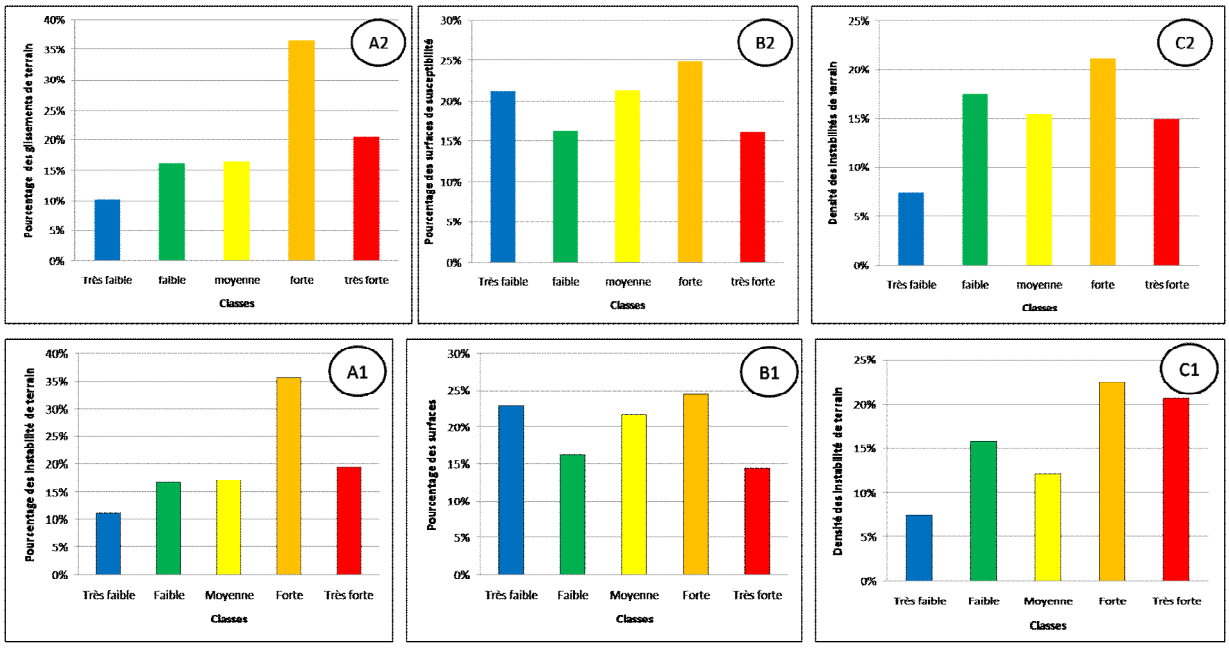


Figure VI.5: Résultats de corrélation entres les classes de susceptibilités et les mouvements de pente cartographiés *: modèle1 (A1, B1, C1) ; modèle 2 (A2, B2, C2).*

Conclusion :

Dans la présente étude, nous avons utilisé la méthode d'analyse AHP dans un environnement SIG pour produire une carte de susceptibilité de glissement de terrain au niveau de la province de Larache (échelle régionale). Les paramètres explicatifs utilisés dans la production de cette carte ont été sélectionnés soigneusement en analysant la relation entres les paramètres et la genèse des instabilités de terrain dans la région. Une base de données est produite et structurée en numérisant les données du terrain, d'image satellitaire, des MNT, cartes topographiques et géologiques... Ceci, en profitant des différentes fonctionnalités que nous offre ArcGis10.X. La pondération des facteurs affectant et les glissements de terrain a été obtenue par la méthode AHP. L'effet des classes de la couche de données ainsi que le poids lié à chaque facteur sont déterminés quantitativement par la méthode AHP.

Les résultats obtenus dans cette modélisation ont démontré que l'utilisation de la méthode AHP peut être considéré parmi les approches pratique et assez réaliste pour définir les poids des facteurs dans le cas d'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrain sur une échelle d'ordre régionale.

Les résultats ont révélé que les instabilités de terrain dans la province de Larache sont fortement influencées par la lithologie, le degré de pente et l'occupation du sol. Les zones les plus susceptibles aux instabilités de terrain sont situées dans les parties appartenant à l'unité de Tanger et l'unité deLoukkos. La carte réalisée servira comme document de base afin de planifier des mesures d'atténuation de risque appropriées et des stratégies de développement futures basées sur l'identification des zones sujettes à des mouvements de pente dans la région.

CHAPITRE VII: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN A UNE ECHELLE MOYENNE (1/50000 EME) EN APPLIQUANT LA THEORIE DE L'EVIDENCE AU NIVEAU DE DEUX REGIONS KSAR EL KEBIR ET SOUK EL QUOLA

Introduction :

La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain a connu un fort développement méthodologique dans la dernière décennie, grâce à la démocratisation des SIG (Guzzetti et al., 1999 ; Chacon et al., 2006). L'apport des SIG et des méthodes probabilistes ainsi que les comparaisons de méthodes ont largement nourri la littérature scientifique. Parmi le large corpus de méthodes disponibles, la théorie de l'évidence est la plus populaire (Dai & Lee, 2001 ; Y.Thiery, 2005 **;** Van Ouesten, 2008 ; Olivier Dewitte, 2006 ; Mathew et al., 2009). Les méthodes indirectes, telles que la théorie de l'évidence et la régression logistique, s'appuient essentiellement sur le croisement de la carte d'inventaire des mouvements gravitaires avec les cartes des facteurs de prédispositions conditionnants afin de dégager les relations entre la présence de ces facteurs et les phénomènes liées à l'instabilité des versants.

Ce chapitre propose alors l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain, en appliquant l'approche indirecte bivariée "*la théorie de l'évidence*". Cette approche propose de saisir la relation entre les facteurs prédictifs (V_P) et la distribution spatiale des glissements de terrain (la variable a modélisé V_M). Elle est particulièrement adaptée aux problématiques de mouvements de versant dans la mesure où elle recherche des relations entre une variable binaire (présence/absence de glissement) et les différentes variables prédictives sous la forme cartographique (facteurs de prédisposition).

La modélisation des données par SIG prend en compte des variables liées à la topographie (la pente, l'exposition des versants, l'hypsométrie), les variables liées à la géologie (la nature géologique du terrain, la fracturation), l'occupation du sol et la distance par rapport au réseau de drainage. Pour chaque V_P, deux poids sont calculés, un positif (W^+) et un autre négatif (W^-), dont les valeurs dépendent de la relation spatiale entre les variables prédictives et la variable à modéliser survenus dans le passé (Bonham-Carter 1990). Les calculs des valeurs de W^+ et de W^- pour toutes les Vp permettent de calculer la probabilité à posteriori, qui actualise la probabilité à priori. Ainsi avons-nous obtenu une carte de susceptibilité aux glissements de terrain. La validité des modèles de prédiction a été vérifiée d'une part par approche expert et d'autre partà l'aide de la courbe du taux de succès(SRC) et le test aveugle (BT).

1. Outils et méthodologie :

Une zone est déclarée susceptible aux mouvements de terrain quand les conditions du terrain de ce site sont comparables à celles d'une zone dans laquelle un mouvement s'est déjà produit (Varnes, 1984 ; Hutchinson, 1995).

Pour évaluer la susceptibilité des terrains, c'est-à-dire la possibilité qu'un mouvement se produise dans une zone particulière, sur la base de conditions environnementales locales, cela revient à répondre aux questions ci-dessous :

- quels sont les facteurs de prédisposition qu'il faut prendre en considération ?
- quel est le poids de chaque facteur prédictif vis-à-vis de la variable mouvement de terrain ?
- où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

Le principe du modèle utilisé dans ce chapitre consiste à définir des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (variables prédictives, Vp) et l'occurrence spatiale de glissements de terrain (variable dépendante, Vd) ce qui permet d'évaluer quantitativement la probabilité de rupture pour des régions non affectées par des glissements de terrain, et diminuela subjectivité de l'expert (Soeters et van Ouesten, 1996). La méthode utilisée est celle issue du théorème de Bayes dite la théorie de l'évidence ou " *weight of evidence* " (Bonham-Carter, 1994 ; van Ouesten et al., 2003).

Le principe de cette méthode repose donc sur le fait de combiner chaque classe de facteurs de prédisposition avec une carte d'inventaire des glissements de terrain sous forme de points d'instabilité, afin de lui donner un poids qui sera attribué en fonction de la densité de glissements de terrain dans chaque unité de surface. Les poids obtenus pour chaque classe de facteurs sont additionnés un à un, le calcul final attribue plusieurs probabilités par combinaison de classes (Thiery et al., 2007). Quoi-que cette technique soit considérée la plus valable, elle nécessite une hypothèse d'indépendance conditionnelle (IC) des paramètres, ce qui suppose que les différents facteurs de prédisposition introduits dans le modèle sont indépendants par rapport à la probabilité de localisation d'un mouvement de terrain (Thiery et al., 2005), ce qui rend le choix des paramètres indépendants plus difficile.

Les cartes obtenues seront par la suite évaluées statistiquement, puis comparée à une carte d'inventaire acquise par une démarche géomorphologique (approche expert). Des tests de validation seront élaboréesafin d'évaluer la performance du modèle ; dans ce but, nous avons réalisé une courbe du taux de succès(SRC) et le test aveugle (BT).

Au niveau de la conclusion du chapitre. VIII, nous allons effectuer une comparaison entre les résultats obtenus, en utilisant la théorie de l'évidence. La figure VII.1, résume la démarche procédée lors de ce travail.

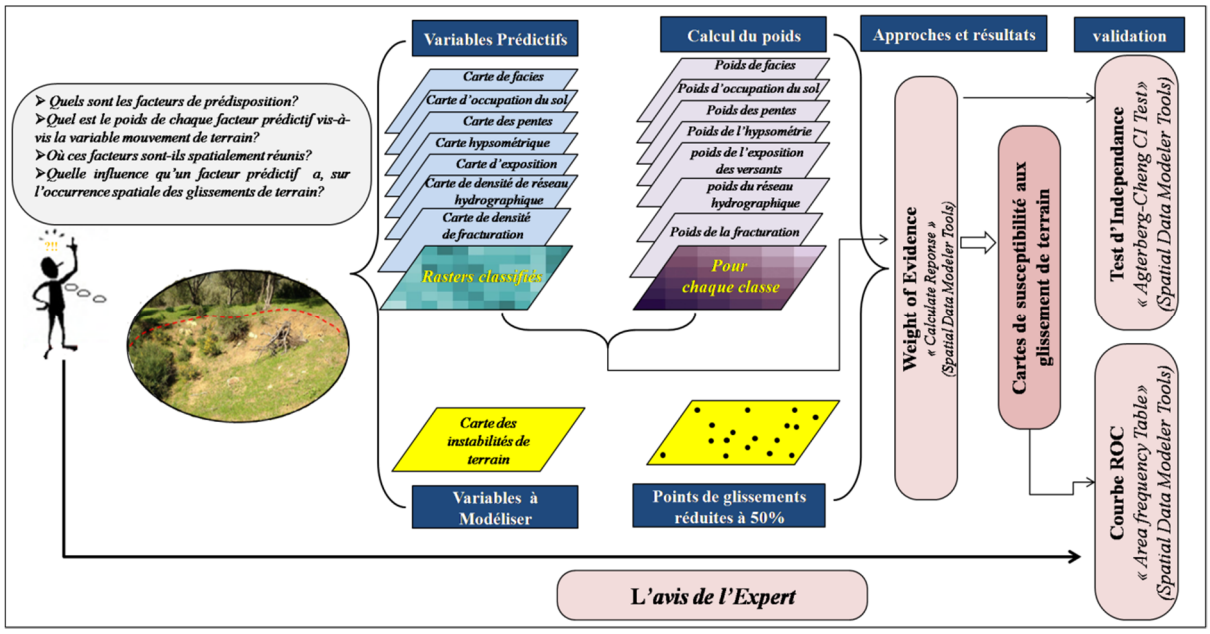


Figure VII.1 : La démarche suivie au cours de la modélisation.

1.1 Principe de la méthode et outils :

L'approche bivariée par la théorie de l'évidence (*Weight of evidence*) est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité à priori

et de probabilité à posteriori (Agterberg etal., 1990 ;Bonham- Carter et al., 1989, 1990 ; Bonham-Carter, 1994; Theiry, 2007), (cf. Chapitre.III, 4.3.1).

La premiere étape dans toute analyse de susceptibilité des instabilités de terrain consiste à collecter les informations et les données necessaires pour la modélisation. L'importance de la précision dans la collecte et le stockage des informations a été largement decrite dans de nombreuses publications (Carrara, 1983 ; Cruden et Brown,1991 ; Maquaire,1990). Deux règles fondamentales doivent être prises en considération, lors de la création d'une banque de données:

- Les informations doivent être homogènes, c'est-à-dire à la méme échelle de travail et dans le même systéme de projection cartographique ;
- La banque de données doit être organisée à partir des couches monothématiques (une couche par type d'information).

Cinq principaux groupes de données d'entrées sont préparés, analysés et structurés (cf. Chapitre.V): géomorpholôgiques, topographiques, géologiques et géotechnique, hydrogéologiques et occupation du sol. Les étapes essentielles pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain, en appliquant l'approche weight of evidence, sont définies en cinq étapes (Van Ouesten, 2000) :

1) La cartographie des mouvements (carte d'inventaire), en les distinguant selon le type d'activité, et en se basant sur les informations couvrant une large période ;

2) La cartographie et la rastérisation des paramètres de terrain les plus significatifs pour l'occurrence des mouvements de terrain et leurs reclassifications;

3) La définition des poids relatifs de chacun des facteurs en cause, leurs relations et la définition de classes de susceptibilité.

4) La modélisation probabiliste de la susceptibilité à moyen échelle, en utilisant la fonction " *Spatial Data Modeller Tools*" sur Arc-Gis10.3. Cette étape propose également la comparaison entre les méthodes expertes et les méthodes quantitatives de cartographie.

5) La validation des modèles utilisées par des tests d'évaluation.

1.1.1 Principe de la méthode "Weights of Evidence" :

La méthode "*Weights of Evidence*" a été développée initialement dans le domaine médical. Elle a ensuite été appliquée au domaine de la prospection minière par Agterberget al., 1989 puis Bonham-Carter, 1994. Il s'agit d'une méthode d'optimisation de la probabilité a priori basée sur le théorème de Bayes. Cette méthode peut être appliquée pour toutes modélisations prédictives. Elle se déroule selon cinq étapes principales que nous expliquerons par la suite :

1.1.2 Estimation de la probabilité à priori :

Sachant le nombre d'occurrences estimées dans une surface d'étude bien définie, il est possible de calculer la probabilité d'occurrence par unité de surface, selon une "matrice de calcul". Si l'aire d'étude "de $t\ km^2$" est subdivisée en unité cellulaire (pixel) ayant une surface $u\ km^2$, alors le nombre total des unités cellulaire de l'aire d'étude est bien "$T = t / u$". Donc, s'il y a D cellules unitaires contenant une occurrence (événement), alors la probabilité a priori qu'une cellule unitaire tirée au hasard contienne une occurrence est de $P(D)=D/T$.

1.1.3 Calcul des poids :

Soit "*Bj*" l'unité de surface où le paramètre probant "*j*" est présent, alors l'aire où le paramètre probant est absent sera définit par:

$$\bar{B}j = T - Bj \quad \text{(Equation VII.1)}$$

Dans le cas où le thème comprend des zones non mentionnées ou si quelques données sont manquantes, il convient de les déduire également.

La probabilité conditionnelle, qu'une unité cellulaire tirée au hasard contienne l'occurrence du paramètre "*j*", s'écrit:

$$P\{D|Bj\} = \frac{\{Bj \cap D\}}{Bj}$$ (Equation VII.2)

De même, trois autres probabilités conditionnelles peuvent être définies, notamment :

- la probabilité de ne pas trouver d'occurrences si le paramètre probant est présent;

$$P\{\overline{D}|Bj\} = \frac{\{Bj \cap \overline{D}\}}{Bj}$$.....(Equation VII.3)

- la probabilité de trouver des occurrences si la variable en question est absente ;

$$P\{D|\overline{Bj}\} = \frac{\{\overline{Bj} \cap D\}}{\overline{Bj}}$$.....(Equation VII.4)

- la probabilité de ne pas trouver d'occurrences si l'événement probant est absent;

$$P\{\overline{D}|\overline{Bj}\} = \frac{\{\overline{Bj} \cap \overline{D}\}}{\overline{Bj}}$$ …… (Equation VII.5)

Les calculs des poids positif et négatif sont alors les suivants :

$$Wj^{+} = \ln\frac{P\{Bj|D\}}{P\{Bj|\overline{D}\}} = \ln\frac{N\{Bj \cap D\}/N\{D\}}{N\{Bj \cap \overline{D}\}/\{\overline{D}\}}$$ (Equation VII.6)

et

$$Wj^{-} = \ln\frac{P\{\overline{Bj}|D\}}{P\{\overline{Bj}|\overline{D}\}} = \ln\frac{N\{\overline{Bj} \cap D\}/N\{D\}}{N\{\overline{Bj} \cap \overline{D}\}/N\{\overline{D}\}}$$ (Equation VII.7)

Le ratio calculé représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence du glissement de terrain au sein d'une classe pour une variable prédictive donnée. Les pondérations sont additionnées en utilisant le logarithme naturel des ratios appelé logit (Agterberget al., 1989 puis Bonham-Carter, 1994).

Pour le cas de l'occurrence des instabilités de terrain, la valeur positive du poids (W^{+}) indique qu'il y a plus de glissements au niveau d'une classe que ceux dûs au hasard ; inversement, une valeur négative (W^{-}) indique que moins de glissements se produisent que prévu. Ce calcul prend en compte seulement la zone centrale de chaque mouvement (centroïde : centre de chaque surface d'instabilité de terrain). La différence entre le poids positif et le poids négatif est connu comme le contraste *C*.

Le contraste est alors calculé comme : $C=W^{+}-W^{-}$ dans le cas d'un paramètre binaire, ou $C = W_{max}-W_{min}$ dans le cas d'un thème à plusieurs classes. C'est une mesure utile car il permet de corréler entre le paramètre et les occurrences. Il est donc défini comme une mesure globale de l'association spatiale entre les points de chaque facteur et la variable à modéliser, en combinant les effets des deux poids. En général, les valeurs du poids absolu comprises entre 0 et 0,5 sont légèrement prédictives ; des valeurs comprises entre 0,5 et 1 sont modérément prédictives ; des valeurs comprises entre 1 et 2 sont fortement prédictives, et supérieures à 2 sont extrêmement prédictives. En général, pour le calcul des poids (ou coefficients de pondération) pour les thèmes binaires, il faut effectuer le rapport des probabilités conditionnelles : voir équations (6) et (7) (Bonham-Carter ,1994; Lee et al., 2002; Nguyen and Bui, 2004; Bettina et al., 2007; Ranjan et al., 2008). La Figure VII.2 illustre le principe du calcul des poids pour chaque paramètre causatif :

NB :
B : la présence potentielle du facteur prédictif ;
$\overline{B}$: l'absence du facteur prédictif ;
D : la présence du glissement de terrain ;
$\overline{D}$: l'absence du glissement du terrain ;
P : la probabilité ; " Quelle influence a un facteur prédictif, sur l'occurrence spatiale des glissements de terrain ?"
N : Nombre de pixels

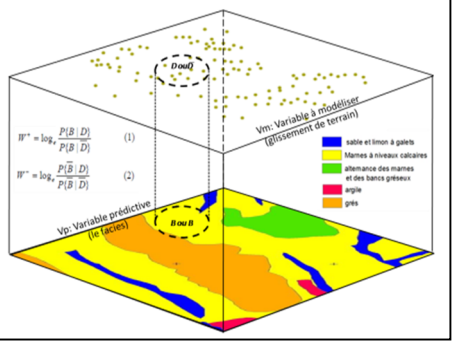


Figure VII.2 : Schémas illustrant le principe de calcul du poids des facteurs (formules (6) et (7)).

1.1.4. Calcul de la probabilité a posteriori et estimation de l'incertitude :

Le calcul de la probabilité a posteriori s'effectue pour chaque combinaison unique de paramètres probants. D'après le théorème de Bayes, on obtient que :

$$P\{D|Bj\} = [P\left(\frac{Bj}{D}\right)\frac{P(D)}{P(Bj)}] \qquad \textit{(Equation VII.8)}$$

Et que : $P\{D|\overline{Bj}\} = [P((\overline{Bj}|D))\frac{P(D)}{P(\overline{Bj})}]$ *(Equation VII.9)*

D'après les formules des poids, la probabilité a posteriori peut alors s'écrire sous sa forme logarithmique :

$\ln(D|Bj) = Wj^{+} + \ln D$(Equation VII.10) et$\ln(D|\overline{Bj}) = Wj^{-} + \ln D$ (Equation VII.11)

L'avantage de cette écriture réside dans la possibilité d'additionner les poids. Ainsi, si tous les paramètres probants sont conditionnellement indépendants, le logarithme de la probabilité a posteriori globale en additionnant tous les poids sera :

$$\ln\left(D\middle|B_1^k \cap B_2^k \cap B_3^k \ldots . B_n^k\right) = \sum_{j=1}^{n} W_j^k + \ln(D)$$

1.1.5. L'incertitude de la probabilité a posteriori (tests de Student) :

Elle est évaluée à travers deux composantes : l'incertitude due à la valeur des poids et celle due au fait qu'un ou plusieurs thèmes probants soient incomplets, c'est-à-dire présentant des données manquantes. La formule donnée pour une unique condition de recouvrement est :

$$_^2(totale) = _^2 + \sum_{j=1}^{n} __j^2 \ (_^2 le\ manquant).$$

L'incertitude totale ainsi estimée par des tests "*Student*" peut être représentée sous la forme d'une carte de confiance.

Après le calcul final de la probabilité a posteriori, un dernier test permet de vérifier l'indépendance conditionnelle générale.

1.1.6 Test d'indépendance conditionnelle :

La modélisation WofE suppose une indépendance conditionnelle (CI) entre les facteurs prédictifs (Agterberg et Cheng 2002). Cependant dans la pratique, et surtout lorsqu'on travaille avec des phénomènes géologiques et géomorphologiques, la règle de l'indépendance conditionnelleest souvent violée à certaines mesures (Bonham-Carter, 1994 ; Agterberg et Cheng 2002 ; Porwal et al., 2003). De ce fait, le modélisateur doit évaluer la gravité de cette violation (Bonham-Carter, 1994).

Le test d'indépendance conditionnelle s'avère nécessaireafin d'évaluer le degré de redondance et aussi pour identifier les thèmes qui posent problème, qui peuvent alors être rejetés du modèle, reclassifiés ou amalgamés. De ce fait, des tests de l'indépendance conditionnelle entre les différentes variables prédictives sont obligatoirement appliquées (Thiart et al., 2006), à savoir :

1) Essais de Table de Contingence $\chi 2$ (le test chee carré) (décrit dans Bonham-Carter 1994, P.313). Ce test a été décrit comme potentiellement peu fiable (Thiart et al., 2006).

2) Le test Overall (test OT) (décrit dans Bonham-Carter 1994, p.315) : Ce test suggère que si le nombre prévu de points de glissements (T) estlargement supérieure au nombre observé de points de glissements (n), alors il peut y avoir une violation de l'indépendance conditionnelle. T est calculé comme étant la somme des probabilités postérieures pondérées par la surface de la cellule unitaire (Bonham-Carter 1994), tandis que n est tout simplement le nombre de points de glissements introduits lors de la modélisation.

3) Le test " CI Ratio "n'est que le rapport n/T ; de ce fait, des valeurs inférieures à 1,00 peuvent indiquer une dépendance conditionnelle entre deux ou plusieurs facteurs. Cependant Bonham-Carter (1994, ch.9) suggère que les valeurs <0,85 peuvent indiquer un problème, bien que cela ait été plus tard noté comme faux par Thiart et al., 2006.

4) Un nouveau test "Omnibus", connu sous le nom de " test Agterberg-Cheng (AC)" ou NOT (Agterberg et Cheng 2002). Ce test suggère que la différence entre le nombre de pointscalculés T et le nombre de points observés n (T-n) est "significativement supérieure à zéro". Ceci est un test unilatéral de l'hypothèse nulle qu'est T-n = 0. La formule utilisée pour ce test est "(T-n)/σT" (σT est écart-type de T). Les valeurs de

probabilité supérieure 95% indiquent que l'hypothèse de CI doit être rejetée, mais toute valeur supérieure à 50% indique qu'il y a une certaine dépendance conditionnelle (Agterberg et Cheng 2002). Le test AC/NOT a été suggéré comme l'approche la plus fiable pour évaluer l'indépendance conditionnelle CI des variables (Thiart et al.2006).
Arc-SDM offre un outil de calcul de l'indépendance conditionnelle "Agterberg-Cheng CI Test ". Ce test donne une valeur NOT, rééchelonnée de 0% - 100%, d'où une valeur de 95%, par exemple, indique une confiance d'environ 95% et que la probabilité a posteriori est conditionnellement indépendante. Cette valeur est présentée par des fonctions comme "CI Overall". L'outil fournit également des informations sur n, T, T-n et le rapport CI.

1.1.7 Conclusion :

Récemment, la théorie de l'évidence en utilisant les données SIG est devenue l'une des approches les plus courantes, largement utilisé dans de nombreux domaines des sciences de la terre tels que la prospection minière, l'analyse des risques géologiques et l'évaluation des impacts environnementaux. Dans cette étude, la modélisation a été appliquée pour dériver une carte de susceptibilité aux glissements de terrain au niveau de la province de Larache qui est une région à grande partie montagneuse. Dans la phase initiale de cette étude, nous avons restructuré les facteurs conditionnantsqui ont été cartographiés (la lithologie, la pente, l'exposition, l'hypsométrie et la végétation) que nous avons éstimé avoir un lien avec la distribution des glissements de terrain au niveau de la région, ceci en fonction de l'échélle adoptée dans cette approche. Par la suite, le poids positif (W^+), le poids négatif (W^-) et la valeur de contraste ont été calculé pour chaque facteur. Le test d'indépendance conditionnelle a été vérifié, de sorte que toutes les paires des facteurs sont indépendants et peuvent être combinés pour créer la carte de susceptibilité aux glissements de terrain.
Lorsque plusieurs V_P sont combinées, les secteurs ayant une pondération finale élevée ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de V_M. C'est ainsi que les résultats obtenus (estimation des probabilités) sont largement dépendants du nombre et de la qualité des V_M et de V_P introduits initialement (Bonham-Carter, 1994) :
(i) Pour les V_M: les probabilités seront basses si le site est caractérisé par un petit nombre de phénomènes. Dans ce cas, la faible certitude statistique des résultats oblige à les interpréter avec une extrême prudence (Bonham-Carter, 1994 ; van den Eeckhaut et al., 2006). A l'inverse, si le site est couvert par un nombre raisonnable de phénomènes (V_m), alors les résultats seront statistiquement stables et plus réalistes ;
(ii) Pour les V_P: un contrôle de leur qualité, en amont du processus de calcul, peut aboutir à une réduction de leur nombre (ou le nombre de classes) lorsque celui-ci est trop grand. Ce contrôle est basé sur l'utilisation de leurs pondérations, leur contraste, leur variance ou le contraste de leur variance. Cette étape permet de réduire la variance des pondérations finales et d'obtenir des résultats plus fiables de point de vue statistique (Bonham-carter, 1994 ; Thiart et al., 2003).
La carte de susceptibilité peut être utilisée pour prédire les glissements de terrain et planifier l'utilisation des terres et la construction. Toute la démarche des calculs et des tests de validation a été facilité grâce à l'outil SDM implanté sur ARCmap.

1.2. Les outils SDM :

Spatial Data Modeller, SDM, est un ensemble d'outils permettant de corréler des cartes d'indices (des paramètres conditionnants) avec la carte qui représente un phénomène donné (instabilité de terrain) ; afin de produire une carte prédictive, mettant en évidence les zones susceptibles de présenter un intérêt particulier à ce phénomène.
ArcSDM est utilisable grâce à une boîte à outils qui s'intègre à ArcToolBox. Un certain nombre d'utilitaires sont disponibles, permettent d'adapter plusieurs propriétés des rasters utilisés lors de l'analyse. Dans le cadre de cette étude, seuls les outils regroupés au sein de la rubrique "*Weights of Evidence*" seront considérés.

Nous rappelons que la méthode "*Weights of Evidence*" offre la possibilité de calculer la probabilité de trouver des glissements de terrain dans un endroit où ils ne sont jamais parvenus, en fonction de différents paramètres. Ces paramètres peuvent être liés à l'environnement naturel (faciès, pente, distance aux points d'eau...).

Le modèle prédictif est tout d'abord calibré grâce à des zones qui ont connus d'ultimes instabilités dans le passé (transects). Sur cette base, des poids associés à chaque classe d'évidence sont calculés. Ces poids servent à calculer les probabilités a posteriori au niveau de la zone d'étude. Lors de la mise en œuvre de cette méthode, quatre étapes peuvent être identifiées. La figure VII.3, montre les chemins relationnels entre ces différentes étapes.

Il est important de se rappeler que les outils WofE et Régression logistique traitent la zone en tant que nombre de cellules unitaires. Ils supposent que les données ont des unités spatiales par mètre. Alors, si les informations introduites ont d'autres unités spatiales, les outils WofE et LR risquent de ne pas fonctionner correctement.

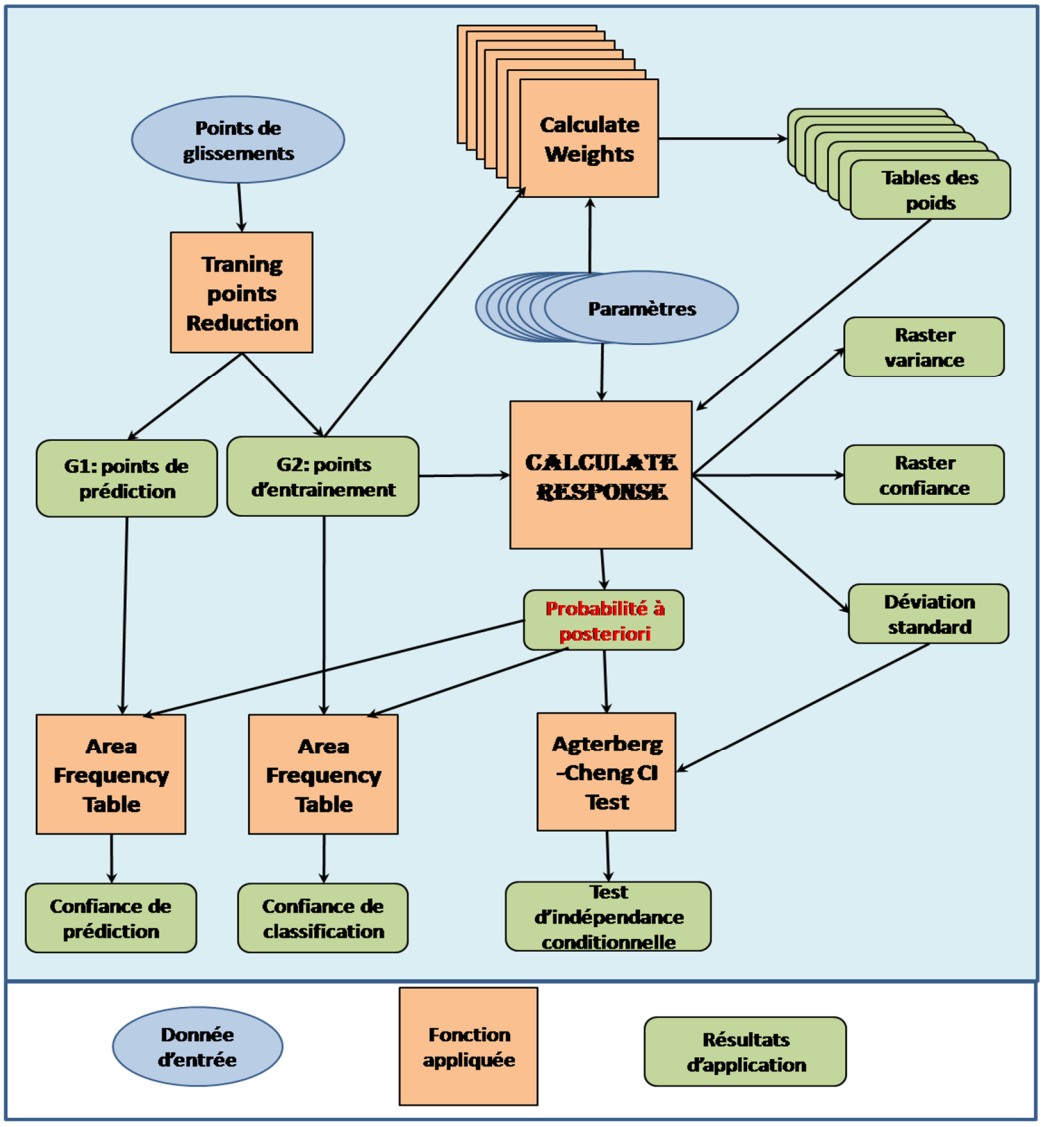
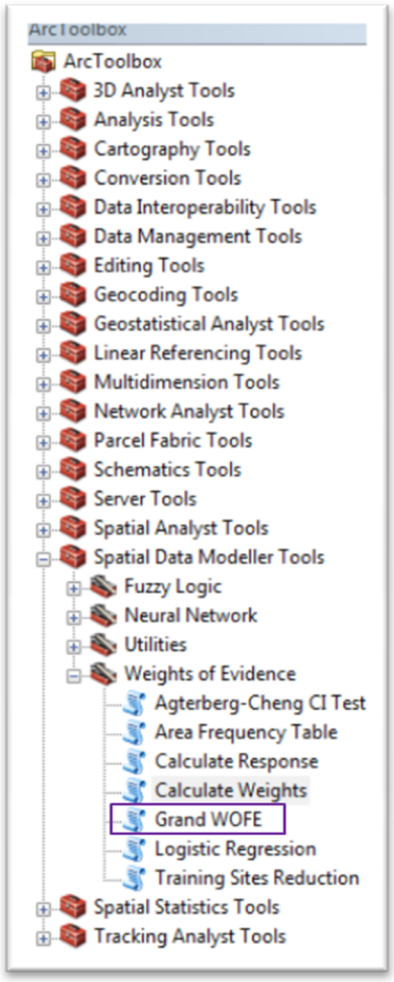


Figure VII.3: Schéma relationnel des fonctions utilisées sur le module "Spatial Data Modeller", *et leurs aboutissements (adaptée d'après Raines et al., 2009).*

Le tableau.VII.1 résume le fonctionnement de chaque étape du module SDM, qui sera utilisé dans le calcul de la probabilité à postériori et la génération d'une carte de susceptibilité. Sawatzky, D.L., Raines, G.L., Bonham-Carter, G.F., and Looney, C.G., 2009. Lors de la mise en œuvre de cette méthode, quatre étapes

peuvent être identifiées. Le schéma relationnel présenté dans la figure VII.2 montre l'enchainement des étapes suivies lors de cette modélisation.

Tableau VII. 1 : Les fonctionnalités des différents outils de la rubrique "Spatial Data Modeller tools" implantées sur ArcGis10.3

Outil	Paramètres	Effet	
Training Sites Reduction	Points d'entraînement	Réduction du nombre de points d'entraînement afin de n'en conserver qu'un seul par cellule unitaire ou d'extraire une sélection aléatoire	
Calculate Weights	Raster paramètre Points d'entraînement	Crée une table contenant les poids et les classes généralisées pour un certain paramètre	
Calculate Response	Rasters paramètres Points d'entraînement Poids	Crée un raster contenant les probabilités a posteriori calculées pour une certaine zone à partir des poids utilisés	
Logistic Regression	Rasters paramètres Points d'entraînement Poids	Calcule les probabilités par une méthode de régression logistique	
Grand WOFE			
Agterberg-Cheng CI Test	Post-probabilités Déviations standards Points d'entraînement	Test d'indépendance conditionnelle des rasters paramètres	
Area Frequency Table	Post-probabilités Points d'entraînement	Crée une table permettant de tracer divers graphes faisant intervenir les classes d'évidence ainsi que le nombre de sites, permet d'évaluer la qualité de la classification et de la prédiction.	

L'outil " Grand WOFE " a un statut spécial, d'où sa couleur différente : il permet d'effectuer les trois premières étapes en une seule fois. N'offrant pas la même flexibilité d'analyse que les outils pris séparément (et notamment la possibilité d'effectuer des reclassifications au niveau des poids avant le calcul de la réponse), il n'a pas été utilisé lors de cette étude.

2. Démarches de modélisation :

2.1 Echantillonnage des instabilités de terrain (variable à modéliser Vm) :

Afin de calculer la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, un inventaire des instabilités survenus dans le passé était nécessaire (Duman et al., 2005). De telles cartes d'inventaire de mouvements de terrain constituent la base de la plupart des techniques d'évaluation de l'aléa. Pour cela, nous avons élaboré une cartographie des différents types d'instabilités existantes au niveau de la région, en utilisant les images satellitaires, la photo-interprétation, la littérature antérieure, et les études de terrain (cf, chapitre.IV). Ces cartes ont fait la base de notre procédure d'échantillonnage.

La stratégie d'échantillonnage des glissements constitue une étape fondamentale dans la modélisation de la susceptibilité dans la mesure où celle-ci va fortement influencer les résultats finaux. Pour cela, elle a été largement discutée dans plusieurs travaux antérieurs. Sauf qu'aucune procédure n'a été dégagée comme consensus clair dans la littérature. Les discussions portaient principalement sur le nombre de points d'échantillonnage à sélectionner au sein d'un même glissement.

Plusieurs études antérieures ne considèrent dans le calcul de la susceptibilité que les zones d'ablation des glissements. Ceci était justifié par le fait que la partie "accumulation des glissements" n'est que la conséquence de la rupture amont et n'intervient en aucun cas dans la genèse du processus (Carrara et al., 1991 ; Soeters & Van Ouesten, 1996 ; Poli & Sterlacchini, 2007 ; Thiery, 2007, Fressad, 2013).

D'autres auteurs ont proposé des études comparatives de l'influence de la stratégie d'échantillonnage des cellules de glissement (Poli & Sterlacchini, 2007 ; Thiery, 2007 ; Fressad, 2013). Globalement, les résultats sont considérés comme meilleurs en utilisant plusieurs cellules par glissement (Fressad, 2013). Cependant, ce type de sélection des données de base pose deux problèmes majeurs : **(i)** la sélection de l'ensemble des cellules constituant les zones d'ablation des glissements tend à largement surestimer l'importance des glissements de grande taille (van den Eeckhaut et al., 2006) ; **(ii)** l'utilisation de multiples points par glissements introduit une forte auto-corrélation spatiale dans les modèles, biaisant l'estimation des poids par effet dit de surapprentissage "overfitting" (Atkinson & Massari, 2011; Fressad, 2013).

Des recherches récentes proposent d'utiliser le centre géométrique de la surface de rupture du glissement afin de restituer un calcul et une validation plus "juste" des phénomènes (entre autres, van den Eeckhaut et al., 2006 ; Atkinson & Massari, 2011, Mastere,2011).

Nous avons opté pour la seconde méthode qui permet de simplifier l'automatisation dans les logiciels de statistique, en plus de la possibilité de limiter l'autocorrélation spatiale. Ainsi, les cellules de glissement ont été dérivées de la base des données d'inventaire présentées dans le chapitre IV. Le centre géométrique (centroïde) des zones d'ablation a été extrait sous SIG, en utilisant l'outil "*Features to Point*" sur la rubrique "*Data Management Tools*". (Figure VII.4)

L'approche WofE suppose qu'il n'y a qu'un seul point de variable modélisable par cellule unitaire (Bonham-Carter, 1994) ; pour cela, nous avons subdivisé le nombre total des glissements de terrain " N " en deux groupes A et B, de sorte que chacun d'eux représente 50% des glissements connus. ArcSDM dispose d'un outil conçu à cet égard : c'est l'outil "*Training Sites Reduction* " qui permet de réduire au hasard le nombre de point total N en un pourcentage désiré (Sawatzky et al., 2009b). (Figure VII.4)

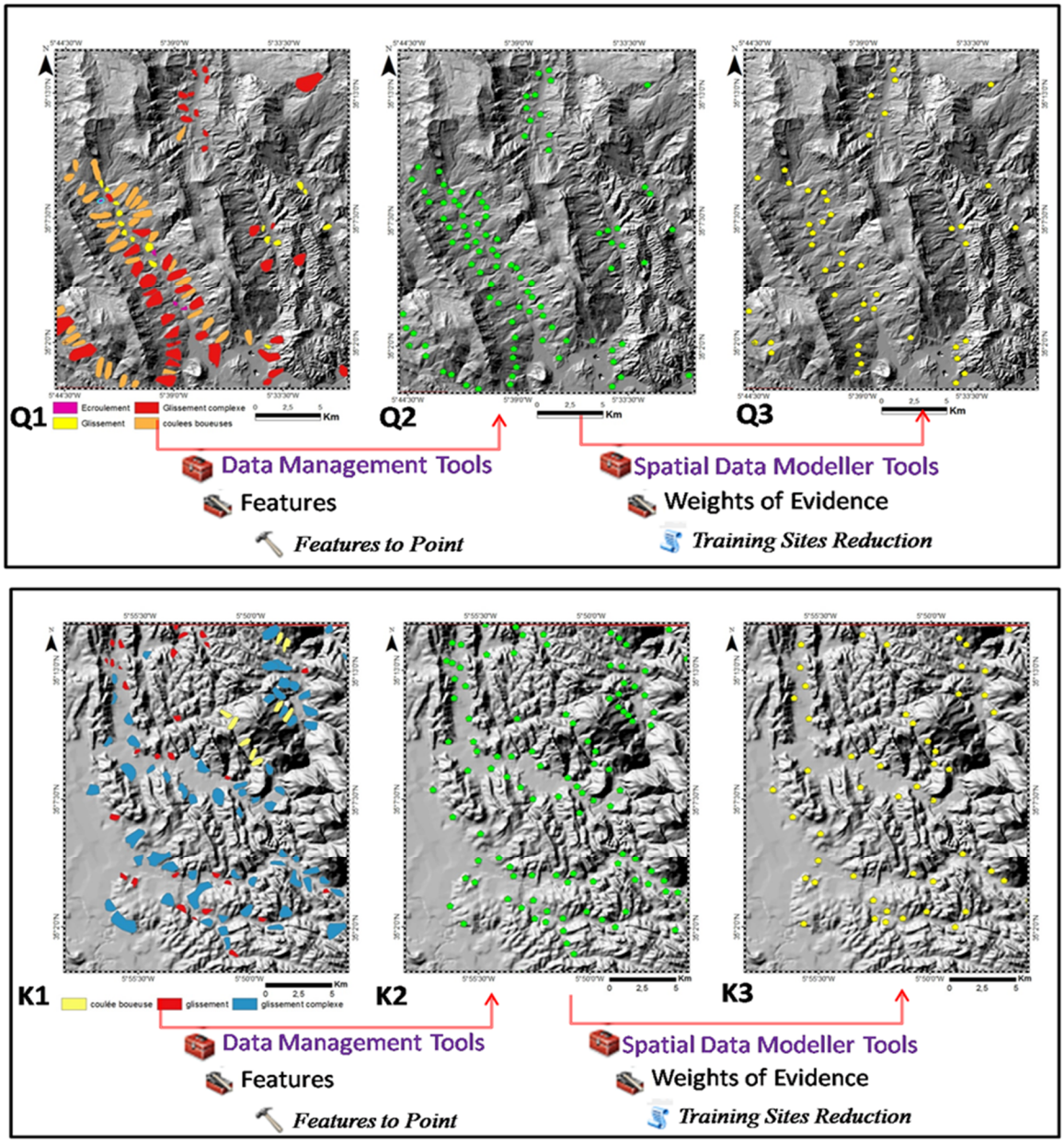


Figure VII.4 : Cartographie et préparation de la variable à modélisér *(instabilités de terrain) en utilisant les outils SDM au niveau des deux régions Ksar El Kebir (K) et Souk El Quola (Q).*

2.2. Collecte et mise en forme des facteurs prédictifs :

Cette étape est la plus longue et aussi la plus importante du fait que le résultat dépendra sûrement de notre décision lors de l'identification des facteurs les plus influents, de la précision des données et de leur structuration selon les possibilités offertes par l'outil ARC-SDM. L'importance de la précision dans la collecte et le stockage des informations a été largement décrite dans de nombreuses publications (Carrara, 1983 ; Cruden et Brown, 1992 ; Maquaire,1990). L'évolution remarquable dans les performances des systèmes d'information géographique (SIG) nous a facilité cette opération.

Deux règles fondamentales doivent être pris en considération lors de la création d'une banque de données (Leroy, 1996) : **(i)** Les informations doivent être homogènes, c'est-à-dire à la même échelle de travail et dans le même système de projection cartographique ; **(ii)** La banque de donnée doit être organisée à partir des couches monothématiques (une couche par type d'information).

2.2.1 Collecte des données :

Les données que nous avons utilisées pour l'obtention des valeurs de l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain ont été acquises à partir des matériaux cartographiques, des images satellitaires, et la littérature antérieure. La procédure de la collecte et de cartographie des variables prédictives est décrite dans le chapitre.V. Ces données d'entrées sont subdivisées en quatre principaux groupes : géomorphologiques/topographiques, géologiques/géotechnique, hydrogéologiques, et occupation du sol (Tableau VII.2). Au cours de la réalisation des cartes nous avons eu le soin d'effectuer une classification homogène la plus possible qu'elle soit, de façon à regrouper les entités qui ont des caractéristiques proches ou qui ont un comportement identique vis à vis de la variable modélisable "instabilités de terrain". Nous avons décidé de garder 5 classes au maximum pour chaque variable prédictive.

Tableau VII. 2 : Variables prédictives retenues lors de la modélisation "WofE"

Facteurs	*Type*	*Structure*	*Attributs*	*Origine*	*Echelle*
Lithologie	*Vecteur*	*Plygone*	*Surface*	*Image Landsat, carte géologique étude terrain*	*1/50000*
Fracturation	*Vecteur*	*Ligne*	*Orientation*	*Image Landsat, carte géologique terrain*	*1/50000*
Hydrogéologie	*Vecteur*	*Ligne*	*Longueur*	*Carte topographique*	*1/50000*
Occupation du sol	*Vecteur*	*Polygone*	*Surface*	*Image Landsat, étude du terrain*	*1/50000*
Hypsométrie	*Raster*	*Grid*	*Altitude*	*DEM*	*1/25000*
Pente	*Raster*	*Grid*	*Degré*	*DEM*	*1/25000*
Exposition	*Raster*	*Grid*	*Orientation En degré*	*DEM*	*1/25000*
Densité fracturation	*Raster*	*Grid*	*Distance*	*Carte de fracturation*	*1/50000*
Densité du réseau hydrographique	*Raster*	*Grid*	*Distance*	*Hydrogéologie*	*1/50000*

2.2.2 Structuration des données et préparation de l'environnement SIG :

Après avoir réalisé les cartes des facteurs prédictifs, nous avons converti toutes les données vecteurs (voir Tableau) en format raster, puis toutes les cartes ont été re-classifiées. Au niveau de ces étapes, nous avons pris en considération les résultats de la corrélation des instabilités de terrain avec les différents variables prédictives et le pourcentage du phénomène en question au niveau de chaque classe (cf chapitre V).

Afin de réussir les calculs sur l'outil SDM et pour éviter tout problème possible, nous avons organisé les données de sorte que toutes les cartes sont projetées dans le même système de projection géographique. Puis après, elles étaient converties en format "grid".

L'environnement du travail sur ARCmap est l'un des éléments qui peuvent influencer les procédures de modélisation sur ARC-SDM, c'est pourquoi il doit bien être organisé. Pour se faire, nous avons utilisé la fonction "*environment settings*" sur laquelle il fallait préciser le dossier de sortie (*Workspace*) et le dossier temporaire (*Scratch workspace*), projeté toutes les données de sortie dans le même système de projection que les données d'entrées, définir la taille des cellules pour tous les rasters, et corréler l'étendue de traitement avec l'étendue de l'affichage actuel ou avec un cadre qui a été créé pour définir l'étendue de l'analyse (cadre de la région). De nombreux autres paramètres d'environnement de géo-traitement peuvent être également définis, nous n'avons cité que les étapes essentielles.

2.2.3. Identification des variables prédictives influents:

L'approche "*weight of evidence*" (WofE) nécessite une certaine indépendance entre les facteurs introduits dans le modèle. C'est la raison pour laquelle il faut procéder pour l'identification d'un jeu de variables prédictives indépendantes et fiables. Pour se faire, trois étapes d'évaluation du modèle sont indispensables (Figure VII.5) : **(i)** la première étape (calage 1), avant le calcul de la probabilité à postériori et après avoir calculer le poids de chaque variable en utilisant l'outil "*calculate weights*" sur ARC-SDM, nous analysons le "*contrast"* calculé (W^+-W^-) et la valeur "*Studentized Contrast*" (STUD-CNT); ces deux paramètres peuvent déceler une erreur de calcul ou révèlent une ou plusieurs donné(es) aberrante(s), ce qui peut être due à la variabilité inhérente au phénomène observé. Dans ce cas, il convient de se débarrasser de ces facteurs qui posent problème; sauf que dans notre cas, le faitd'exclure certaines données peut aboutir à une perte d'informations précieuses. **(ii)** La deuxième étape (calage 2), après avoir calculer la probabilité à postériori en utilisant la fonction "*Calculate Response*", il est nécessaire de quantifier les facteurs et de verifierle degré de leur dépendance conditionnelle. Les facteurs qui montrent une certaine dépendance sont soit éliminés, dans le cas d'une faible influence sur les instabilités de terrain, ou combinés afin de créer de néo-variablesprédictives(NVP), (Thiery et al. 2007 ; Mastere, 2011 ;Bouramtane, 2021). **(iii)** La troisième étape, (calage 3) appliquation des tests de validation (validation croisé). Il est important de garder à l'esprit que dans la pratique il y a toujours un certain degré de dépendance conditionnelle entre les cartes prédictives (Bonham-Carter 1994, Porwal et al., 2003), qui se traduit par l'inflation artificielle ou de la déflation de la probabilité à posteriori.

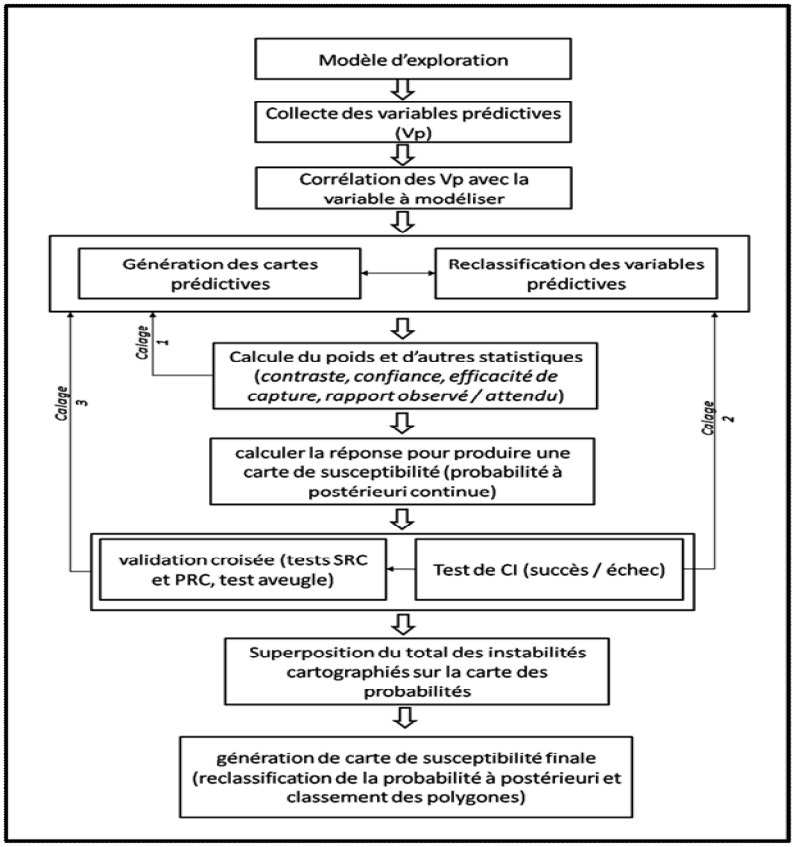


Figure VII.5 : Procédures de calage et de validation des variables prédictives (modifier d'aprés Haris & Sanborn Barrie, 2006)

Afin de tester l'indépendance conditionnelle des variables prédictives, plusieurs simulations ont été exécutées puis testées en utilisant la fonction "*Agterberg-Cheng CI Test*" sur ARC-SDM (cf, paragraphe 1.1.6). Chaque variable prédictive est ajoutée une à une pour observer son influence sur les simulations (Thiery et al. 2007 ; Erich Schmitt, 2010 ; Bouramtane.T et al., 2021).

La figureVII.5, illustre la procédure de calages effectués, lors du choix d'un jeu de facteurs d'évidence convenable.

Plusieurs tests indiquent que les meilleures simulations sont obtenues en combinant de manière hiérarchique le gradient de pente, le faciès, l'occupation du sol, la densité du réseau hydrographique, la densité de fracturation, l'hypsométrie et l'exposition des versants. Pour la validation experte, les résultats des modèles en termes de surfaces susceptibles aux glissements de terrain modélisés sont comparés à l'inventaire géomorphologique. Les résultats du test CI pour la meilleure simulation obtenue seront présentés plus tard (cf, chapitre VII).

3. Présentation des facteurs prédictifs mis en considération:

Nous tenons à rappeler que les mêmes facteurs, qui ont été considérés et testés de point de vue leur indépendance conditionnelle dans ce chapitre, seront utilisés dans la deuxième approche "Régression logistique", (chap,VIII). Dans le but de faire une comparaison, et d'estimer l'approche la plus adaptable aux secteurs tels que le nôtre.

3.1. Le jeu de variables prédictives au niveau de la région Souk El Quola:

3.1.1 Les facteurs liés à la topographie:

Les paramètres topographiques sont dérivés d'un modèle numérique de terrain issu de la digitalisation des courbes de niveau à partir des cartes topographiques à une échelle 1/25 000eme. Trois paramètres géométriques sontutilisés dans ce modèle : le gradient de pente, l'exposition et l'hypsométrie (FigureVII.6) Les cartes d'origine qui ont été générées automatiquement à partir du MNT sur Arcgis10.3, pour trois variables, contenaient plusieurs classes que nous avons réduites en cinq grandes classes après reclassification. La reclassification effectuée a été adoptée après plusieurs tests de corrélations entre la distribution spatiale des phénomènes à modéliser et les différentes classes choisies (voir Chap.IV).

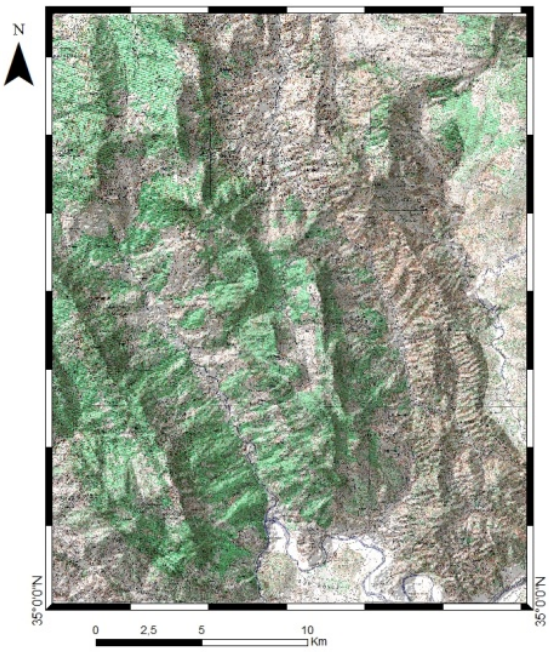
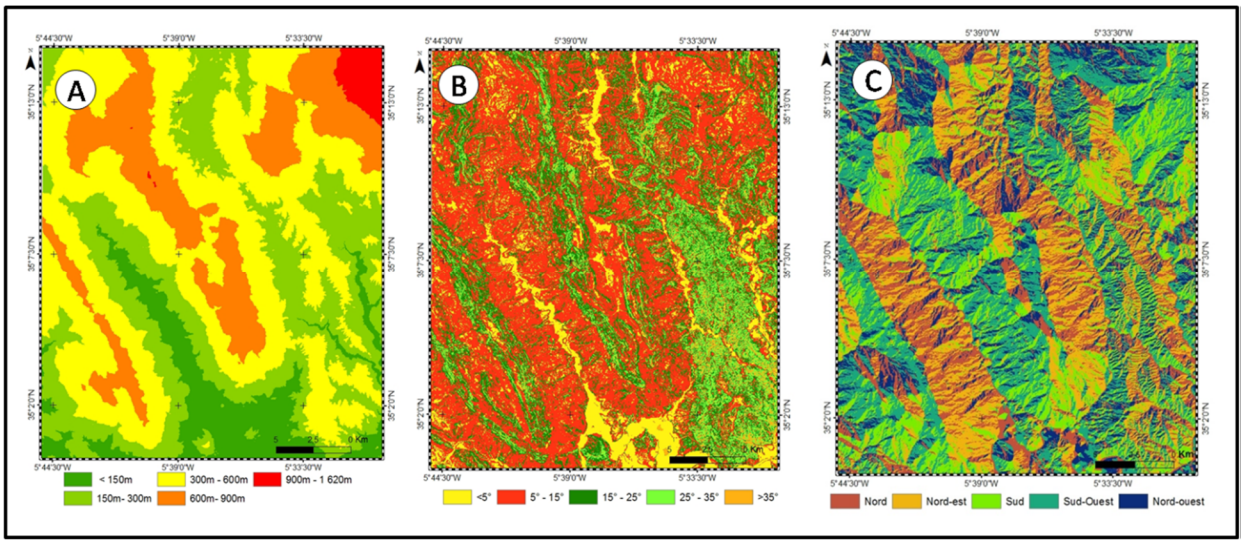


Figure VII.6(a) : Carte topographique de la région d'EL quola



FigureVII.6 (b) : Les cartes des facteurs liées à la topographie *; (A : L'hypsométrie ; B : La pente ; C: L'exposition).*

Le plus grand nombre des instabilités de terrain, qui ont été identifiées au niveau de la région, coïncident avec les classes : de pentes entre 5°et 35° ; d'hypsométrie entre 150m et 600m ; et pour l'exposition ils se concentrent au niveau des classes Nord, Nord-Est et Sud-Ouest.

3.1.2 Les facteurs géologiques :

Les variables prédictives relatives à la géologie qui ont été pris en considération sont la lithologie et la fracturation.

3.1.2.1 La lithologie:

La lithologiejoue un rôle majeur dans la stabilité desversants au niveau des régions rifaines, de partla nature desmatériaux, leur qualité géotechnique, la stratigraphie de la roche (disposition, orientation et angle d'inclinaison ou pendage), les discontinuités stratigraphiques et structurelles, et l'altération des roches. Il est d'une importance capitale de prendre en considération ce facteur dans l'occurrence et la distribution spatiale des instabilités de terrain.

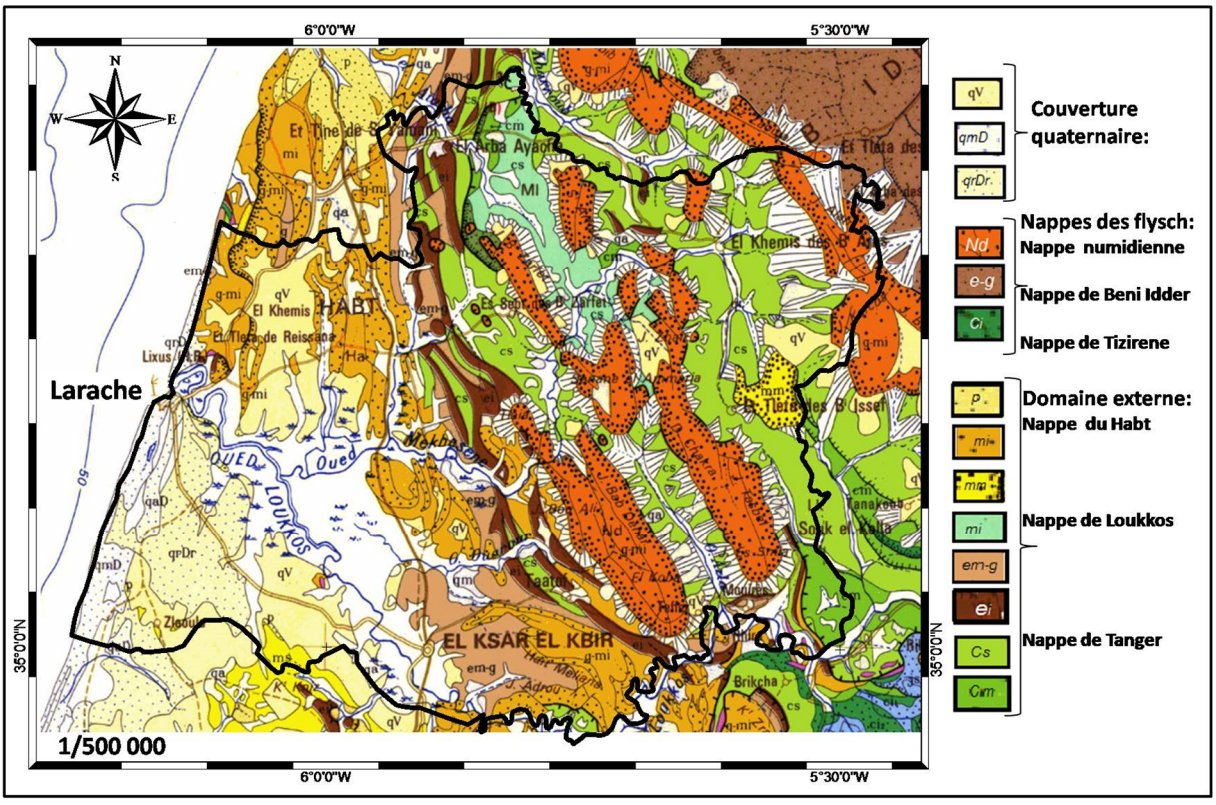


Figure VII.7(a) : La carte geologique 1/500 000 d'après Suter 1980

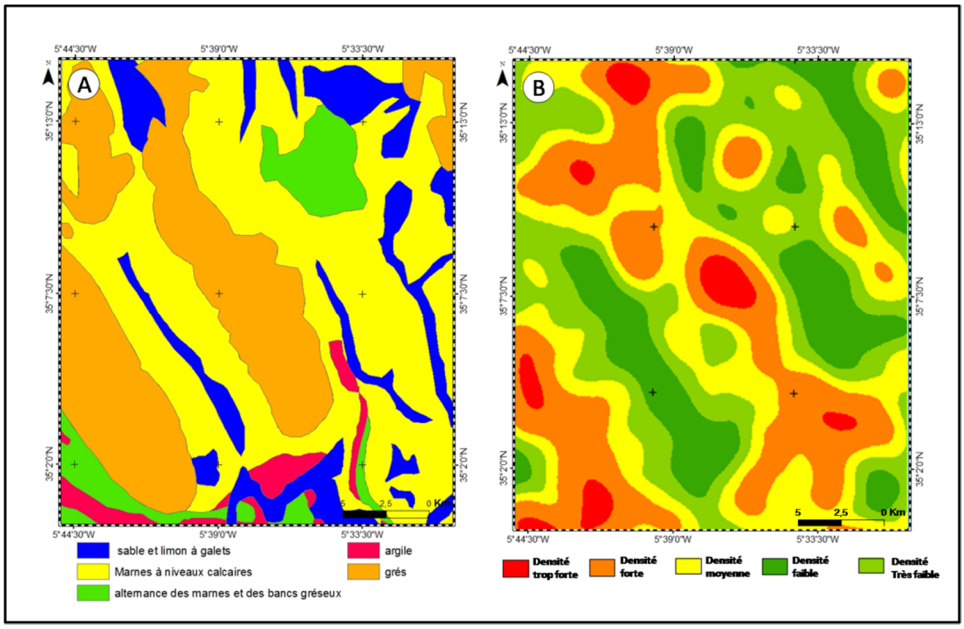
Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été reconnues sur l'image satellitaire (cf chap.IV.1.1), en se basant sur la carte géologique à l'échelle de 1/500 000ème de la chaîne Rifaine (Suter, 1980), (Figure VII.7) et des visites sur le terrain ; c'est ainsi qu'une carte de faciès a été élaborée. Nous avons procédé ensuite à une requalification postérieure des formations géologiques selon leurs affinités lithologiques et mécaniques à l'aide du module " *reclassification* " du module "*Spatial Analyst tools*" sur ARCmap10.3. Pour se faire, différents types et niveaux de découpage ont été pris en compte dans la littérature (Lacroix, 1968 ; AIGI, 1976 ; Varnes, 1984, Van Ouesten, 1993 ; Castellanos et Van Ouesten, 2008), (Figure VII.7.a).

Dans notre secteur d'étude, la plupart des instabilités inventoriés surviennent au niveau des marnes (sensibles aux variations de la teneur en eau), flyschs, pélites et argile (riches en smectite), trop imperméables et qui s'engorgent rapidement d'eau, lors des périodes pluvieuses. En plus des caractéristiques mécaniques

médiocres de ces formations, ces mêmes terrains sont surmontés par des barres massives grèseuses trop fracturées, appartenant à la nappe numidienne, facilitant l'infiltration des eaux vers ce substrat trop susceptible aux mouvements de pentes. Cette analyse est basée sur les résultats des tests géotechniques effectués au niveau de quelques cas d'étude (cf. chp.V) et sur la compilation des travaux de nos prédécesseurs ayant travaillé dans des secteurs avoisinants mais qui présente l'extension ou le prolongement des mêmes formations (Margaa, 1994 ; Margaa et Abdelgader, 1998 ; Mansour, 1998 ; El Kharrim, 2001 ; Soossey Alaoui, 2005; Mastere, 2011).

3.1.2.2 La fracturation:

L'activité tectonique héritée et récente peut intervenir sur la stabilité des versants, surtout dans des zones déjà fragilisées ; soit en conditionnant les terrains accidentés, soit en tant que déclencheur lors d'une activité sismique (Compina, 2005). Tout de même le réseau de fractures favorise l'infiltration de l'eau, entraînant ainsi une augmentation de la pression interstitielle et une réduction de la résistance au cisaillement des sols (El Khatabi, 2001). De ce fait, une carte de fracturation du secteur d'étude a été réalisée en se basant sur une cartographie multi-sources, suivant trois grandes étapes : La numérisation de toutes les failles bibliographiques, notamment celles en provenance de la carte géologique (1/500 000) de la chaîne rifaine (Suter, 1980) et des travaux d'Ait Brahim, 1991, Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003 et de Chalouan et al, 2008…etc., l'extraction de la fracturation récente qui a affecté la région basée sur l'analyse morpho-structurale de la carte hypsométrique couplée à celles des anomalies du réseau hydrographique, l'extraction (manuelle et automatique) des principaux accidents d'origine tectonique à partir d'imagerie satellitaire (Landsat7 ETM+, Landsat 8 Oli), (cf. chap.IV.1.4). Ce paramètre est intégré dans les modèles probabilistes, pour la plupart des cas, en tenant compte de la distance par rapport aux failles (Regmi et al., 2010 ; Pradhan, 2010 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Yilmaz, 2009a ; Yilmaz, 2009b Chang et al., 2007 ; Greco et al., 2007 ; Van Den Eeckhaut et al., 2006 et al., 2005 ; …etc). De ce fait, nous avons réalisé la carte de densité des failles, en utilisant la fonction "*Kernel Density*" sur le module "*Spatial Analyst Tools*" d'ArcGis10. Elle permet de calculer la densité linéairepar unité de surface (Km²).Cette carte a été élaborée selon 5 classes de densité par reéchantillonnage. (FigureVII.7.b).
En superposant les instabilités de terrain sur la carte de densité de fracturation, nous remarquons qu'elles sont fréquentes au niveau des classes à densité élevé et moyenne.



FigureVII.7(b) : Les cartes des facteurs liées à la géologie (A : carte des faciès ;B : carte des densités de fracturation.

3.1.3 Lefacteur réseau hydrographique:

Le ruissellement superficiel génère des zones d'intense ravinement (badlands) dans le cas des formations géologiques tendres ; ainsi que certains mécanismes de glissements de terrain correspondent à l'action érosive des cours d'eau (sapement de berges), Dikau et al., 1996 ; Thiery, 2007. Il en résulte le déclenchement d'un nouveau mouvement de terrain ou la réactivation d'un ancien mouvement stabilisé. Le réseau hydrographique sera incorporé dans notre étude via sa densité, ce qui a permis de reconstruire des zones tampons hydrographiques qui tiennent compte aussi bien de la longueur cumulée du réseau de drainage, que de la présence des nœuds hydrographiques (affluents et confluents). D'après l'analyse statistique de la répartition des glissements de terrain par rapport aux surfaces de densités, nous avons effectué une reclassification. Cinq classes ont été retenues dans la carte de densité obtenue. (FigureVII.8). Les mouvements de terrain se répartissent au niveau des classes à densité moyenne, élevée et trop élevée.

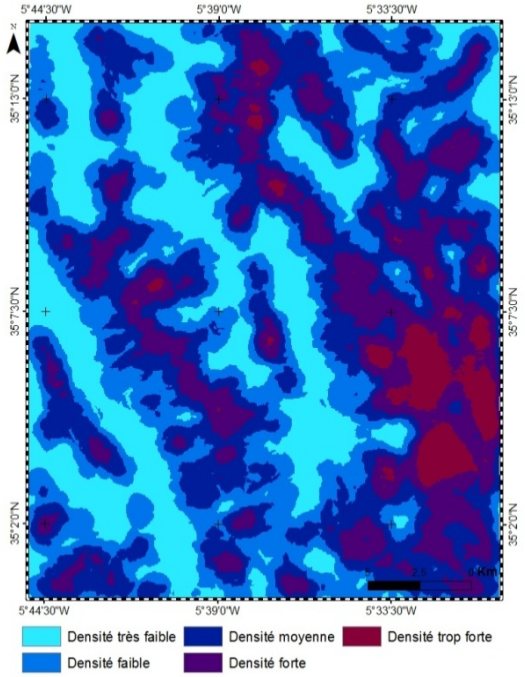


Figure VII.8 : Carte des densités du réseau hydrographique

3.1.4 Lefacteur occupation:

La relation entre les mouvements de terrain et le paramètre occupation des sols dépend : **(i)** du type d'occupation, **(ii)** type de végétation, **(iii)** et de la densité du couvert végétale. L'occupation des sols joue un rôle primordial dans l'étude de l'aléa mouvements de terrain, à travers le caractère stabilisant de la couverture végétale. Lors de son absence, ou sa rareté sur les versants, l'effet érosif par ruissellement peut être accéléré. Par conséquent, nous avons effectué une évaluation du rôle de la végétation dans la stabilité des versants, en analysant la corrélation des instabilités de terrain survenues dans le passé avec les différentes entités d'occupation des sols dans la région de Souk El Quola (cf. chap.IV.1.2.3).

Pour réaliser la carte d'occupation des sols, nous avons eu recours à la conception d'une base de données multisources, à savoir l'information concernant les essences forestières mises à notre disposition par le Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification. Ces informations ont subi une actualisation par interprétation des données satellitaires :

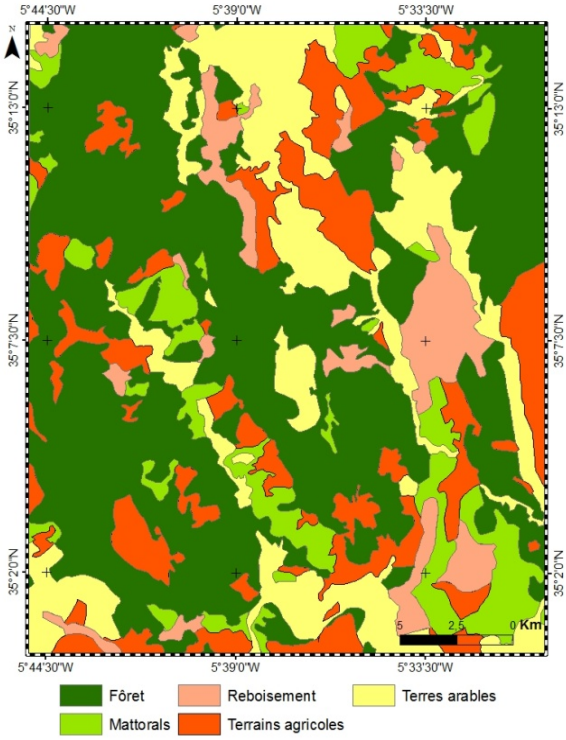


Figure VII.9: Carte des densités du réseau hydrographique

Les zones urbaines, les terrains agricoles, les terrains nus et les surfaces d'eau, qui ont été reconnus par classification multispectrale des données Landsat7 ETM^{+}. A cela s'ajoutent plusieurs informations qui ont été collectées sur le terrain. Afin de simplifier la lecture, plusieurs fusionnements et ajustements ont été faites. De ce fait, cinq classes sont retenues :

les essences forestières, les matorrals, les reboisements, les terrains agricoles et les terres arables. (FigureVII.9)

Dans la région de Souk El Quola, il y a une couverture végétale assez dense. La classe "forêt" couvre la plus grande surface de la région. Du coup, les instabilités de terrain s'amorcent au niveau des zones de déboisements, causées par les paysans de la région ou par les feux.

3.2. Le jeu de variables prédictives au niveau de la région El Ksar El Kebir:

Quoi que les deux régions soient juxtaposées, on note un passage rapide d'un secteur d'aspect montagneux à une vaste plaine limitée dans sa partie Est par des reliefs sous forme d'arcs, orientés NW-SE, à basses altitudes.

La même démarche a été suivie, dans la collecte et la structuration de la base de données, que dans la région de Souk El Quola.

3.2.1 Les facteurs liés à la topographie :

D'après un MNT issu de la numérisation des cartes topographiques à une échelle 1/25 000éme, nous avons générer la carte du gradient de pente, la carte d'exposition et la carte hypsométrique. Ces cartes ont été reclassifiées, ainsi leurs classes sont réduites en cinq entités, ceci d'après les résultats de corrélation avec les glissements de terrain. (FigureVII.10)

3.2.2 Les facteurs liés à la géologie:

De point de vue géologique, la région d'El Ksar El Kebir représente la continuation Ouest des grandes unités structurales du mésorif. Selon le type de formations géologiques et en tenant en compte de la qualité géotechnique des roches, nous avons élaboré une carte de faciès, où nous avons décelé cinq unités géotechniques : grès, pélites, marnes grèseux, marnes calcaires, limon sableux. (FigureVII.10)

La variable fracturation est aussi considérée dans le calcul de la susceptibilité aux instabilités de terrain, au niveau de cette région. Tout de même, elle a été quantifiée en termes de densité, puis reclassifiée en cinq classes : densité très élevée, densité élevée, densité moyenne, densité faible et densité très faible. (FigureVII.10)

3.2.3 Le facteur réseau hydrographique:

Le réseau hydrographique devient de plus en plus moins dense en passant de l'Est vers l'Ouest. Les confluents convergent vers les courts principaux, de forme très sinusoïdale à cause de la pente qui devient très douce, et quasiment nul, vers l'Ouest. Cette variable a été interpolée selon cinq entités de densité du réseau hydrographique : densité très élevée, densité élevée, densité moyenne, densité faible et densité très faible. (FigureVII.10)

3.2.4 Le facteur occupation du sol:

Nous avons élaboré une carte d'occupation du sol, qui contient cinq classes : forêt et reboisement, matorrals, périmètres irrigués, terrains agricoles et bâti (FigureVII.10), au niveau de la région d'El Ksar El Kebir.

D'après une analyse préliminaire de la distribution spatiale des différents types d'occupation du sol et leur corrélation avec les instabilités de terrain inventoriées au niveau de la région, nous avons constaté que ce facteur n’a pas une très grande influence sur la genèse des mouvements gravitaires, sauf dans la partie Est. Ceci du fait que la majeure partie est occupée par les terrains agricoles ; du coup dans ces mêmes conditions d'occupation de sol, certaines zones sont instables, d'autres ne le sont pas. Or le calcul du poids qui sera présenté dans le paragraphe qui suit a anéanti cette hypothèse. Ce qui nous ramène à une conviction que l'estimation basée seulement sur les approches expertes n'est pas suffisante pour décider des jeux de facteurs à intégrer dans le modèle.

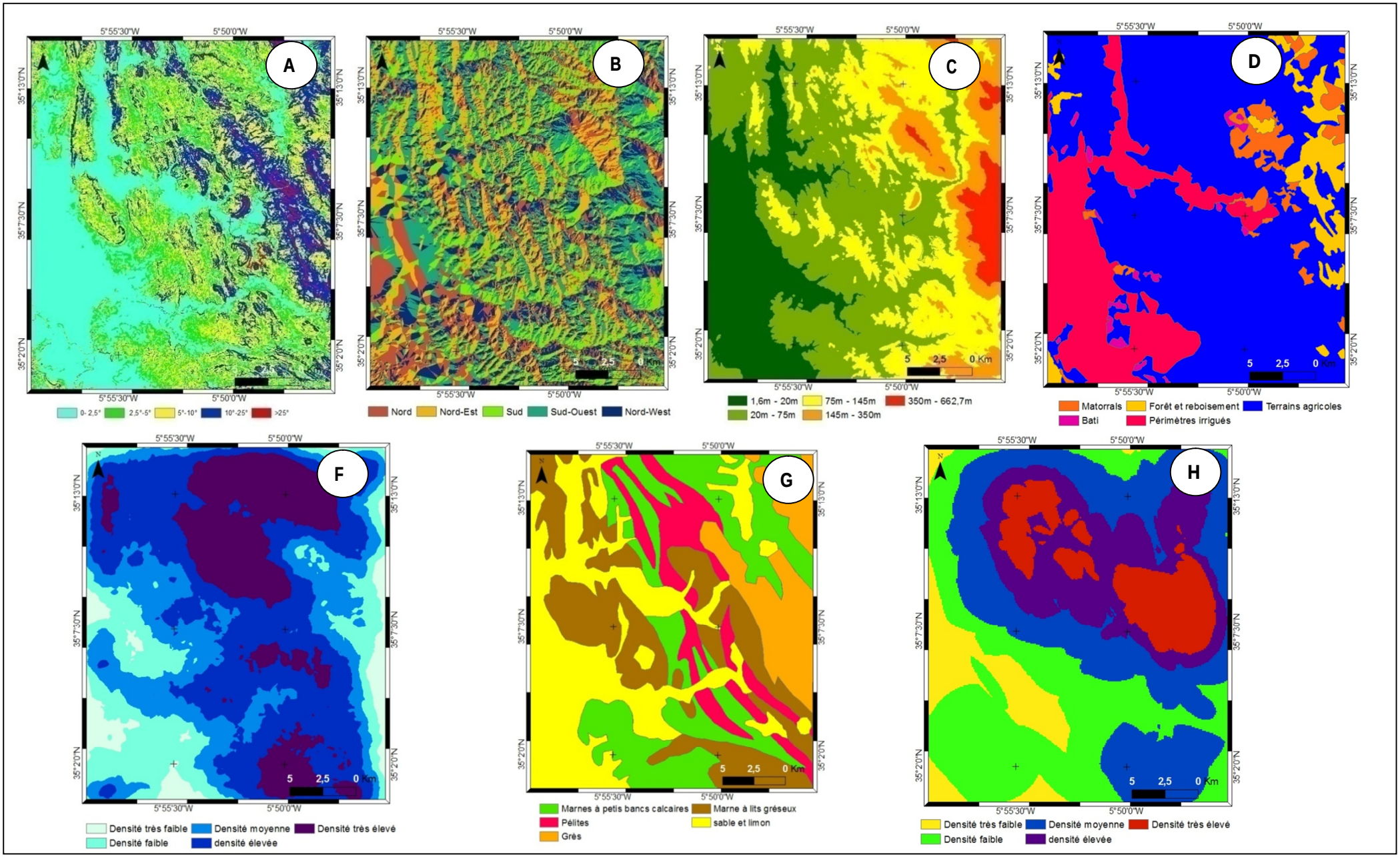


Figure VII.10 : Jeu de cartes de variables prédictives, adopté dans la modélisation WofE, au niveau de la région d'EL KsarEL Kebir*: A:degrés des pente; B:Exposition; C:Hypsométrie; D:Occupation du sol; F:Densité du réseau hydrographique; G: Faciès; H: Densité de fracturation.*

4. Quantification des facteurs prédictifs : Calcul du poids:

Afin d'estimer l'occurrence des différents facteurs prédictifs dans la genèse des instabilités de terrain, et évaluer la susceptibilité des versants (actuellement stables) aux mouvements gravitaires, il est important de calculer le poids pour chaque facteur et pour chaque classe. Deux valeurs sont calculées :**(i)** Une valeur positive du poids (W^+) indique qu'il y a plus de glissements sur cette classe (par unité de surface, pixel) que celles dû au hasard. **(ii)** Inversement, une valeur négative (W^-) indique que moins de glissement se produisent que prévu. Ce calcul ne prend en compte que la zone centrale de la surface du glissement (centroïde). Le contraste ($C = W^+ - W^-$) est une mesure globale de l'association spatiale entre les points de chaque facteur et la variable à modéliser, en combinant les effets des deux poids (W^+/W^-). En général, les valeurs du poids absolu comprises entre 0 et 0,5 sont légèrement prédictives ; des valeurs comprises entre 0,5 et 1 sont modérément prédictives ; des valeurs comprises entre 1 et 2 sont fortement prédictives, et supérieures à 2 sont extrêmement prédictive. Les coefficients de pondération pour les thèmes binaires sont calculés par le rapport des probabilités conditionnelles décrit dans le paragraphe 1.1.3; formules (6) et (7) (Lee et al., 2002, Nguyen and Bui, 2004, Bettina et al., 2007, Ranjan et al., 2008). Grâce à la fonction "*Calculate Weights*" sur le module Arc-SDM, nous avons pu effectuer les calculs pour sept variables prédictives.

4.1. Les résultats obtenus au niveau de la région de Souk El Quola :

Le Tableau VII.3, présente les résultats du calcul du poids au niveau de la région de Souk El Quola. L'analysé des poids W^+, W^- et du contraste C, attribué à chacune des classes des variables prédictives, montre que l'occupation du sol et l'hypsométrie et leréseau hydriquejouent un rôle majeur dans la susceptibilité aux instabilités de terrain. Alors que la lithologie et l'exposition des versants sont relativement moins influentes. Les variables "fracturation et pente"occupent une place intermédiaire avec une valeur absolue du contraste de 1.05 et 1.08 respectivement. En effet, la valeur absolue du contraste de poids maximum entre les cinq classes de la variable lithologie est de seulement 0.9 ; alors qu'il est de 1.96 pour le réseau hydrographique, de 1.22 pour l'occupation du sol et 1.82 pour l'hypsométrie. Nous avons remarqué aussi que pour la lithologie, les marnes et les argiles sont caractérisées par une haute susceptibilité.

4.2. Quantification des variables conditionnants dans la région D'El Ksar El Kebir:

Le Tableau VII.4, présente les résultats du calcul du poids au niveau de la région d'El Ksar El Kebir. Nous avons analysé les poids W^+, W^- et le contraste attribué à chacune des classes des variables prédictives; Ce qui a permis d'évaluer et d'interpréter le rôle respectif de chaque facteur de prédisposition dans l'occurrence spatiale des mouvements de terrain. Nous avons constaté que l'occupation des sols, la pente et la lithologie jouent un rôle majeur dans la vulnérabilité aux instabilités du terrain. Les valeurs des contrastes maximum normalisées sont respectivement (C_{Oc}=1,3913), (C_P=1,3064) et (C_{Li}=1,2111). Nous avons également remarqué que pour la lithologie, les argiles sont caractérisées par une forte susceptibilité avec un poids positif de 1,018. Alors que la densité du réseau hydrographique et l'exposition des pentes sont relativement moins influentes avec un contraste maximum de (C_{Hy}= 0,5493) et (C_{Ex}= 0,7521). La densité de fracturation et l'hypsométrie occupent une place intermédiaire avec une valeur absolue du contraste de (C_{Fr}= 0,9511) et (C_{Hp}=0,8135) respectivement.

Tableau VII. 3 : Calcul du poids des différentes variables prédictives introduites dans la modélisation, au niveau de la région de Souk El Quola.

Paramètres	Classes		Superficies (Km^2)	Nombre de glissement	W+	W-	Contraste	STUD_ CNT
Exposition	1	Nord	158.29	11	-0.02	0.0093	-0.0375	-0.1043
	2	Nord-Est	102.9275	6	-0.59	0.0378	-0.2537	-0.5608
	3	Sud	122.14	10	0.1491	-0.0388	0.1879	0.503
	4	Sud_Ouest	132.055	12	0.2632	-0.0808	0.344	0.9766
	5	Nord_Ouest	115.3675	6	-0.67	0.0636	-0.4002	-0.8871
Faciès	1	Grès	184.455	0	0	0	0	0
	2	Marnes à bancs grèseux	85.1325	12	0.762	-0.1773	0.9394	2.6131
	3	Limon à galets	21.6625	2	0.284	-0.0114	0.2954	0.3893
	4	Marnes	47.41	4	0.1852	-0.0164	0.2015	0.3683
	5	Argiles	294.035	27	0.278	-0.3105	0.5885	1.866
Fracturation	1	0_0,14	71.275	2	-0,76	0.0801	-1.0568	-1.4386
	2	0,14_0,28	169.2375	18	0.4398	-0.2129	0.6527	2.0486
	3	0,28_0,425	177.45	18	0.3869	-0.1938	0.5807	1.8255
	4	0,425_0,567	140.095	7	-0.39	0.0881	-0.465	-1.0993
	5	0,567_0,71	73.8875	0	0	0	0	0
Hypsométrie	1	0_150m	75.3125	1	-1.76	0.1166	-1.8816	-1.8467
	2	150_300m	83.595	3	-0.74	0.0828	-0.8303	-1.3622
	3	300_600m	245.78	28	0.492	-0.4947	0.9866	3.0901
	4	600_900m	80.6125	3	-0.70	0.0767	-0.7866	-1.2896
	5	900_1620m	132.1325	10	0.040	-0.0113	0.052	0.1396
Occupation du sol	1	Forêt	308.33	13	-0.55	0.3602	-0.9167	-2.7032
	2	Reboisements	43.1775	6	0.7427	-0.0776	0.8203	1.7448
	3	Matorrals	62.03	11	1.0321	-0.1892	1.2213	3.2435
	4	Terrains agricoles	103.4275	5	-0.41	0.0661	-0.4793	-0.9841
	5	Terres arables	114.0375	10	0.2245	-0.0559	0.2804	0.7486
Pente	1	0_5%	88.3275	3	-0.78	0.0884	-0.87	-1.4287
	2	5%_15%	37.935	1	-1.04	0.0427	-1.0855	-1.0586
	3	15%_25%	123.4175	12	0.3379	-0.0992	0.4371	1.2377
	4	25%_ 35%	144.4675	4	-0.99	0.1811	-1.1735	-2.2029
	5	>35%	236.63	25	0.4303	-0.3626	0.793	2.5408
Réseau Hydrogra_ Phique	1	Très faible	148.0825	2	-1.72	0.2408	-1.9636	-2.6912
	2	Faible	174.5225	10	-0.23	0.0776	-0.3099	-0.8372
	3	Moyenne	176.4075	14	0.1171	-0.0487	0.1659	0.4952
	4	Elevée	109.195	17	0.8775	-0.3036	1.1811	3.6038
	5	Trop élevée	23.6975	2	0.1842	-0.0078	0.1919	0.254

Tableau VII. 4 : Calcul du poids des différentes variables prédictives introduites dans la modélisation, au niveau de la région d'El Ksar El Kebir

Paramètres	Classes		Superficies (Km²)	Nombre de glissement	W^+	W^-	Contraste(C)	STUD_ CNT :C/δC
Exposition	1	Nord	138.96	10	-0.1451	0.0379	-0.1829	-0.5001
	2	Nord_Est	110.068	6	-0.4414	0.0751	-0.5166	-0.5608
	3	Sud	114.48	7	-0.3196	0.0604	-0.3799	0.503
	4	Sud_Ouest	109.49	6	-0.4359	0.0739	-0.5099	0.9766
	5	Nord_Ouest	159.069	23	0.6344	-0.3167	0.9511	-0.8871
Faciès	1	Grès	70.80136	0	0	0	0	0
	2	Argiles	65.452	13	1.018	-0.193	1.2111	3.4458
	3	Marnes grèseux	151.446	12	-0.0398	0.0122	-0.052	-0.1516
	4	marnes calcaires	151.717	11	-0.1359	0.0398	-0.1757	-0.4976
	5	limon sableux	193.284	16	0.0078	-0.0035	-0.1757	0.036
Densité de Fracturation	1	Très faible	116.87	7	-0.3416	0.0654	-0.407	-0.9694
	2	Faible	83.273	7	0.0235	-0.0036	0.027	0.0637
	3	Moyenne	163.408	9	-0.4305	0.1195	-0.55	-1.4535
	4	Forte	143.464	14	0.1875	-0.0611	0.2486	0.7575
	5	Trop forte	125.018	15	0.4193	-0.13	0.5493	1.6958
Hypsométrie	1	1,6 – 20m	396.029	36	0.1084	-0.2079	0.3163	1.0125
	2	20– 75m	111.714	5	-0.6497	0.1024	-0.7521	-1.558
	3	75 – 145m	98.857	10	0.2266	-0.0471	0.2738	0.7394
	4	145 – 350m	23.236	1	-0.6906	0.0197	-0.7104	-0.6879
	5	350 – 662,7m	1.741	0	0	0	0	0
Occupation du sol	1	Forêt et reboisement	43.429	1	-1.3348	0.0565	-1.3913	-1.361
	2	Bâti	8.566	1	0.3893	-0.0063	0.3956	0.3684
	3	Matorral	29.251	2	-0.1989	0.0088	-0.2078	-0.278
	4	Périmètres irrigués	130.11	9	-0.1865	0.0439	-0.2303	-0.6053
	5	Terrains agricoles	421.36	39	0.1302	-0.3121	0.4423	1.3323
Pente	1	<2,5°	218.713	20	0.1157	-0.0661	0.1818	0.6097
	2	2,5°_5°	109.96	3	-1.162	0.1444	-1.3064	-2.1617
	3	5° _10°	274.617	28	0.2362	-0.2195	0.4557	1.5684
	4	10°_ 25°	1.527	0	0	0	0	0
	5	>25°	27.228	1	-0.855	0.0269	-0.8818	-0.8567
Réseau Hydrogra_ Phique	1	Trop faible	74.159	4	-0.4307	0.0459	-0.4765	-0.8895
	2	Faible	71.19	5	-0.1493	0.0173	-0.1666	-0.3413
	3	Moyenne	140.79	6	-0.678	0.135	-0.8135	-1.8282
	4	Elevée	186.64	22	0.421	-0.225	0.6459	2.1872
	5	Trop élevée	172.075	15	0.085	-0.0325	0.1176	0.3677

5. Calcul du raster réponse : création de la carte de susceptibilité :

Lors de cette étape, nous avons combinées les sept facteurs d'évidence avec leurs poids, afin deproduire une constante échelle de probabilité à posteriori ; ceci est possible grâce à l'outil "*Calculate Reponse*" sur Arc-SDM. Les rasters des probabilités à posteriori, créés au niveau d'El Ksar El Kebir etde Souk El Quola, sont le résultat de plusieurs simulations, celles-ci consistent à intégrer les paramètres un par un ; avec des ajustements des classes, surtout quand leurs surfaces sont trop grandes. Ces simulations ont été suivies par la vérification de l'indépendance conditionnelle entre les différents paramètres.

L'application de l'outil "*Calculate Repsonse*", après une procédure de calage et de validation du modèle, a abouti à la génération de trois rasters : Raster de la probabilité à posteriori ; Raster confiance et Raster variance (déviation standard), qui peut être utilisé dans le test d'indépendance conditionnelle (FigureVII.3).

La Figure VII.11,a et b; présente les trois cartes obtenues pour chaque région.Elles contiennent cinq classes, du fait que les rasters d'entrée ont été conçus de sorte que chacun est formé de cinq classe. Le raster de la probabilité à posteriori représente la carte de susceptibilité aux instabilités de terrain. (Figure VII.11,a et b)

6. Test d'indépendance conditionnelle:

La qualité du résultat obtenu peut être estimée de différentes façons. Une toute première estimation peut être visuelle, d'après la réalité du terrain et la superposition des instabilités inventoriées sur la carte des probabilités à posteriori. Cette appréciation, quoiqu'elle ne soit fondée sur aucune méthode mathématique, a une grande importance, car la vérité terrain permet une détectionrapide s'il y a une faille dans le modèle. Celle-ci peut être due, par exemple, à une mauvaise classification d'un ou de plusieursparamètres (Raines & Bonham-Carter 2006).

L'évaluationde l'indépendance conditionnelle a été réalisée en utilisant la fonction "*Agterberg-Cheng CI Test*" sur l'outil "*Spatial Data Modeller Tools*". Elle permet de calculer trois valeurs, celles-ci permettent d'éviter toute surestimation ou sous-estimation de la probabilité (Bonham-Carter et al 1989 ; El Hamdouni.I, 2018). Le tableau VII.5, contient les meilleurs résultats ; à base desquels nous avons accepté le jeu de variables prédictives influentes.

Tableau VII. 5 : Résultat du test d'indépendance conditionnelle, des simulations retenues, au niveau des régions d'El Ksar El kebir et de Souk EL Quola

Les paramètres du test CT		**El Ksar El Kebir**	**Souk EL Quola**	**Références**
Nombre de points d'instabilité (n)		52	50	
Nombre depoints attendu (T)		53.5	49,7	
T-n		1.5	-0,3	
ΣT		4.77	3,491	
(T-n) / σT		0.32	-0,0806	
Tests d'indépendance conditionnelle	Ratio(CI)n/T	0.96	1,01	AC~1
	Test(AC)	52%	46%	<50%
	Overall CI (OT)	74.6%	93,6%	50%<OT<100%

La comparaison des résultats avec les intervalles de référence montrent que les trois valeurs calculées correspondent parfaitment aux valeurs acceptables théoriquement au niveau de la région de Souk El Quola; ce qui exclut l'existence d'une dépendance entre les différents facteurs suggérés prédictifs.

Pour la région d'El Ksar El KEbir, les deux tests : Overall CI et le Ratio (CI), sont bien dans l'intervalle, mais le test AC dépasse légèrement l'intervalle. Deux résultats sur trois sont acceptables, d'où la possibilité de garder le modèle. Ce choix est justifié par le fait que lorsqu'on cherche à réduire la dépendance des facteurs, on risque d'aboutir à une perte d'informations précieuses (Raines, 2001 ; Porwal, 2006 ; Partington, 2010 ; E.Schmitt, 2010). Cependant, trop de variables conditionnellement dépendantes peuvent provoquer un ajustement du modèle aux données liées à la variable modélisable.

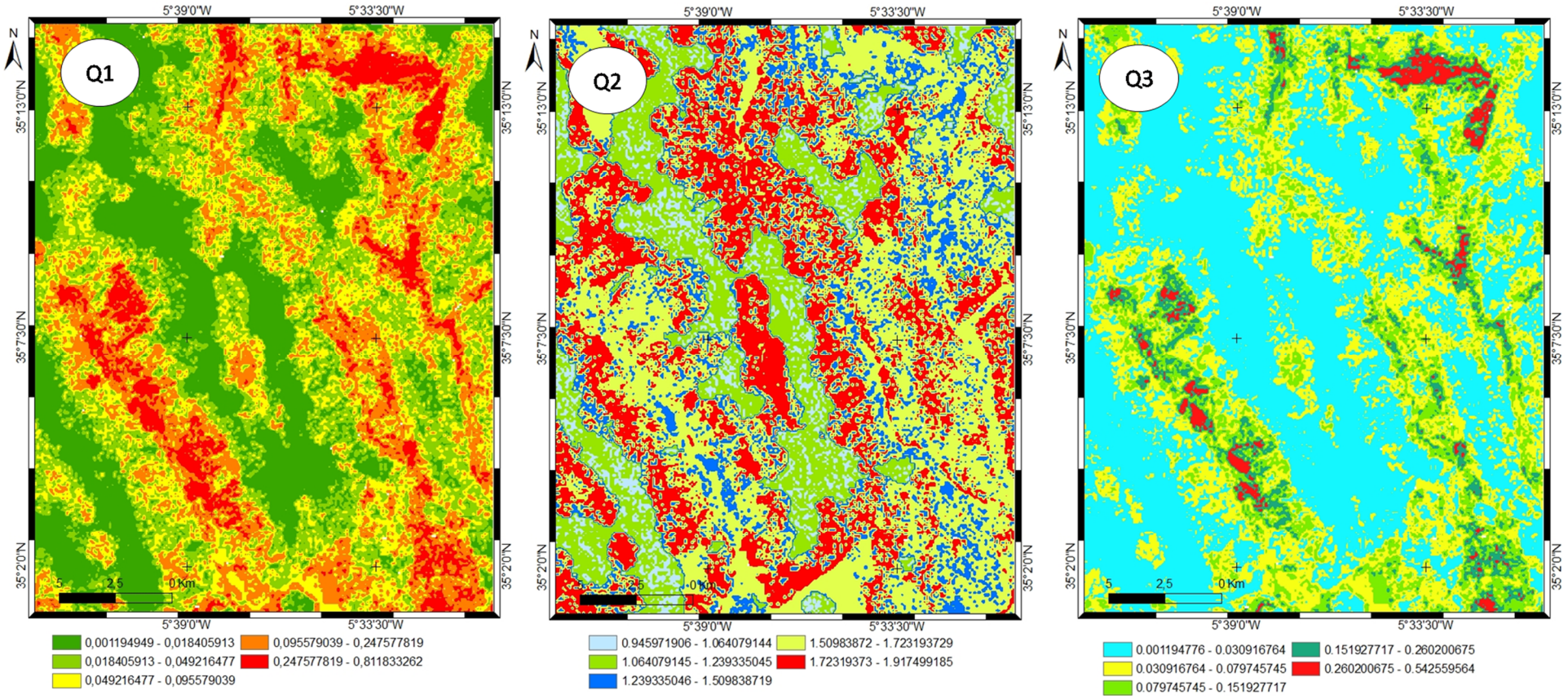


Figure VII.11.a : les rasters issus du traitement "Weight of evidence"; en appliquant la fonction "calculate response", au niveau de la région de Souk El Quola*: Q1, Raster de probabilité à postériori; Q2, Raster Confiance; Q3, Raster variance.*

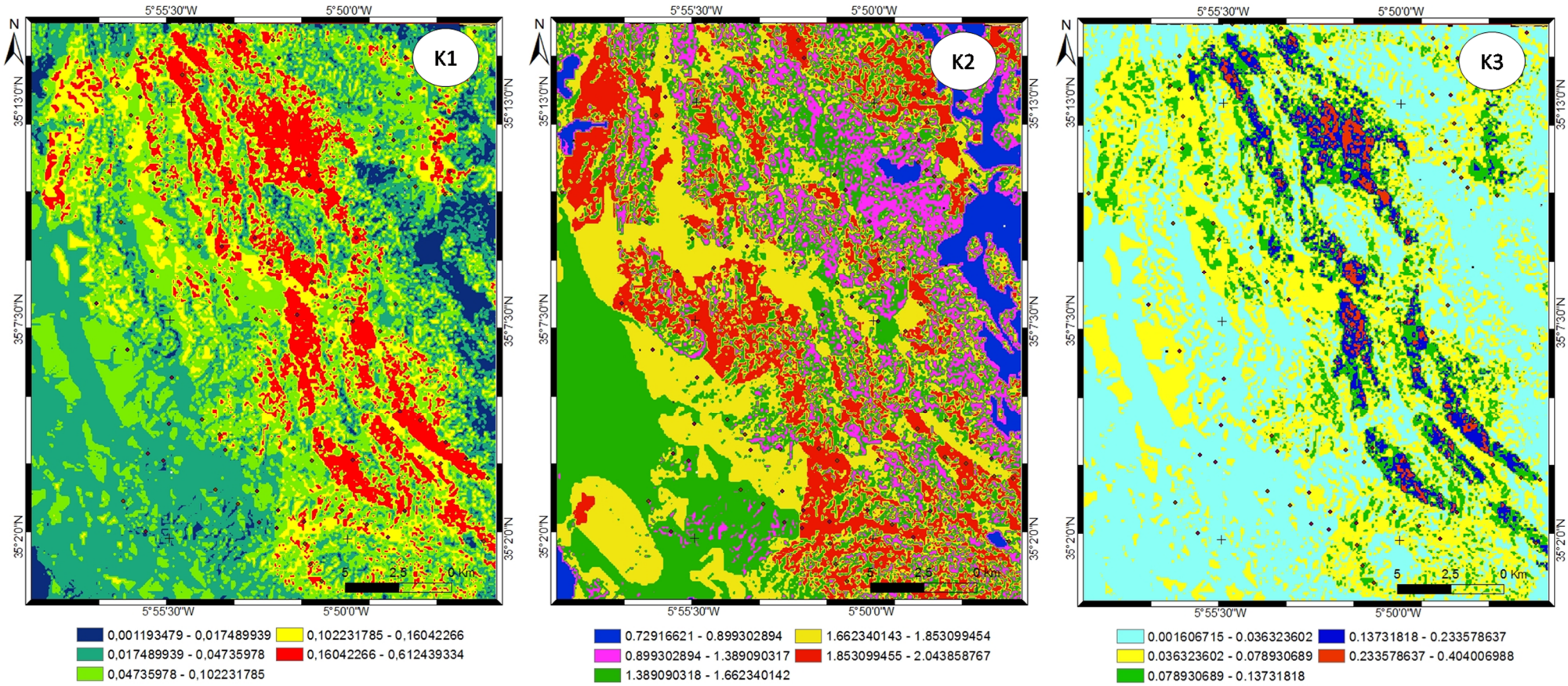


Figure VII.11.b : les rasters issus du traitement "Weight of evidence"; en appliquant la fonction "calculate response", au niveau de la région d'EL Ksar El Kebir*:*
K1, Raster de probabilité à postériori; K2, Raster Confiance; K3, Raster variance

6. Validations statistiques des résultats : "*Area Frequency Table*":

"*Dans une modélisation probabiliste, le plus important est de procéder à une validation des résultats de prédiction. Sans une éventuelle validation, le modèle de prédiction et les cartes résultantes sont totalement inutiles et n'ont guère une signification scientifique*" d'après -Chung Et Fabbri, 2003-

Il y a plusieurs façons de vérifier la performance du modèle en analysant la carte de probabilité à posteriori. Dans notre cas, nous avons utilisé deux types de validations croisées (*Cross-Validation*) : la courbe du taux de succès SRC *(success-rate curve)* et la courbe d'efficacité de la RPC, que nous avons réalisée en utilisant les tables de sortie sur l'Arc-SDM grâce à l'outil "*Area Frequency Table*".

6.1 La courbe du taux de succès(SRC):

La courbe du taux de succès (SRC) appelée courbe de réussite ou aussi courbe du taux d'adaptation : C'est un test qui permet de s'assurer que la probabilité à posteriori correspond aux points de glissements utilisés pour générer la carte de prédiction (Fabbri et Chung 2008). C'est une courbe cumulative, qui représente la variation de la probabilité à posteriori (de faible à élevée) par rapport à la superficie cumulative de la probabilité à posteriori (Figure VII.12). La probabilité à priori se trouve souvent à proximité du point d'inflexion (Sawatzky et al., 2009b). L'aire sous la courbe permet d'obtenir l'efficacité du modèle (Raines 2001 Sawatzky et al., 2009b). Ce modèlea une efficacité de 68.2%. Cette courbe reflète la façon dont le modèle classe la distribution des glissements connus, mais ne reflètent pas nécessairement la façon dont le modèle prédit les glissements inconnus, ce qui est le but de la modélisation. Pour cela, nous avons besoin d'effectuer des tests aveugles "Blind Test" (BT).

6.2 Le test aveugle (BT) et la courbe de prévision (PRC) :

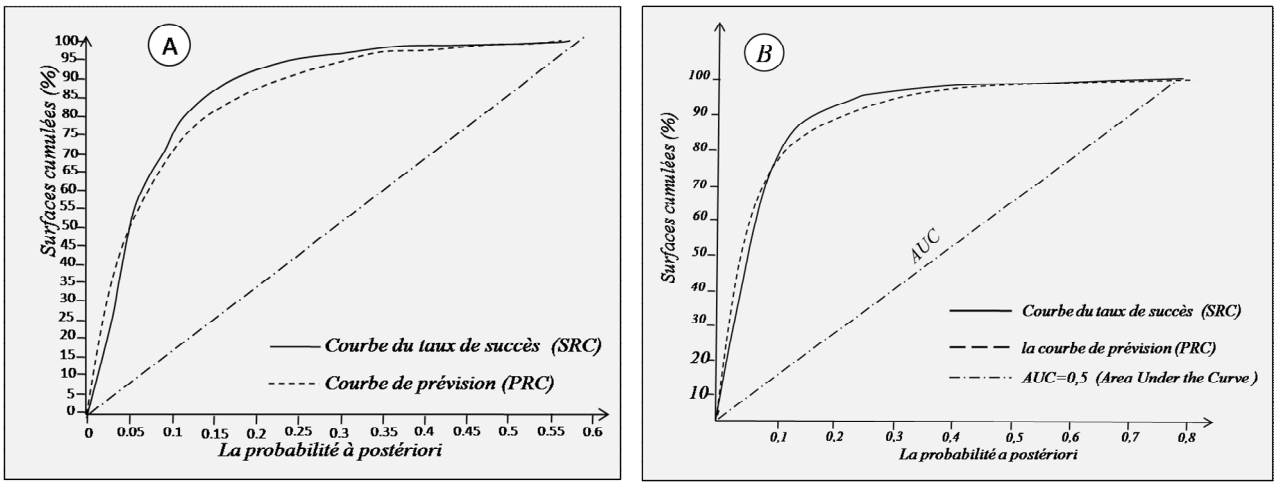
Le test aveugle (BT) est le test de validation le plus adapté aux modèles de prédiction. Ce test montre la façon dont le modèle probabiliste prédit les glissements non utiliséslors de la modélisation. De ce fait, une courbe de rendement similaire à la SRC est créée, mais en utilisant les points de glissements qui n'ont pas été utilisés dans le modèle. Cette courbe nous montre quelle est l'efficacité du modèle à prédire les glissements inconnus. Fabbri et Chung, 2008 soulignent l'importance de l'utilisation de BT dans l'évaluation de la performance prédictive des modèles prédictifs spatiales. (E.Schmitt, 2010)

Pour appliquer ce test (BT), nous avons utilisé le groupe B qui n'a pas été introduit dans le modèle. Ainsi avons-nous réalisé une courbe d'efficacité RPC, qui montre une efficacité de 67%.

Chung et Fabbri, 2003 notent que si une carte de probabilité postérieure est générée aléatoirement, la PRC serait une ligne droite avec une pente de 1, et qu' "*une image de prédiction n'a une signification que si la courbe du taux de prédiction est bien supérieure à la ligne droite*."

La figure VII.13, présente le résultat obtenu en utilisant les 50% des points de glissement non utilisés dans la modélisation N-n (soit N le nombre total de points des glissements et n le nombre de points des glissements utilisé 50%).

Les courbes de prévision PRC et les courbes de réussite SRC sont assez similaires et au dessus de la ligne droite AUC=0,5, et les valeurs de leur " aire sous la courbe " ainsi que l'efficacité sont très proches. (Figure VII.12 et 13)



FigureVII.12: résultats des tests de validation (SRC et PRC), *dans la région d'El Ksar El Kebir "A" et "Souk El Quola".*

6.3 Reclassification de la carte de probabilité postérieure à échelle:

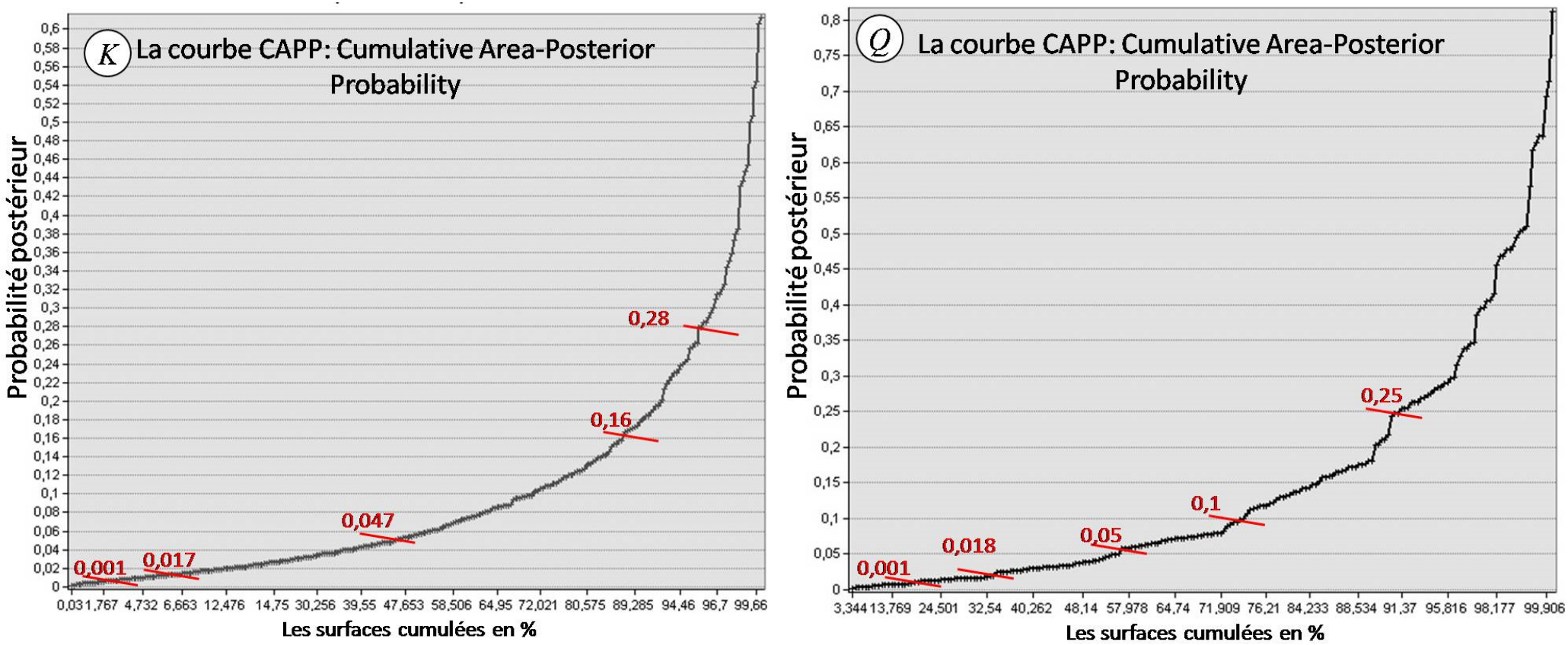
Etant donné que les valeurs de probabilité postérieure sont pratiquement toujours gonflées (Bonham-Carter 1994, Mihalasky 1999, Porwal et autres 2003, E.Schmitt, 2010), les probabilités postérieures ne doivent donc pas être considérées en termes absolus, mais comme un classement relatif du phénomène étudié (instabilités de terrain) et peuvent être remplacées par des rangs ou catégories au lieu d'utiliser des scores de probabilité postérieurs réels (Porwal et al. 2003, Fabbri et Chung 2008). La fonction "*Calculateresponse*" d'Arc-SDM génère un raster à échelle continue de 0 (min) à 1 (max). Dans le but de choisir les seuils des classes de susceptibilités et de réussir une classification qui touche la réalité, deux méthodes (dans la littérature antérieur) sont recommandées à être utilisées par le décideur : l'utilisation des courbes CAPP (Cumulative Area-Posterior Probability) ou des courbe SRC, toutes les deux pouvant être créées à partir du tableau obtenu par la fonction "*Area Frequency*" d'Arc-SDM (Sawatzky et al. 2009b). Le nombre de classes choisies varie selon la nature du phénomène étudié et le taux de précision cherchée. Par exemple, une reclassification binaire (Mihalasky 1999, Porwal 2006) permet de mettre en évidence deux grandes classes : zones susceptibles ou non susceptibles, ou une reclassification en 3 classes pourrait être interprétée comme : trop susceptibles, susceptibles et non susceptibles (Porwal et al. 2003). Aussi peut-on utiliser le pourcentage pour créer des ruptures, telles que les "5% des zones les plus susceptibles" (Raines et Bonham-Carter 2006, Harris et Sanborn-Barrie 2006, E.Schmitt, 2010).

La méthode de la courbe CAPP : La courbe CAPP est créée en traçant la probabilité à postériori sur l'axe des Y (de probabilité faible à élevée)et la surface cumulée sur l'axe des X (Figure VII.13). Les hausses de la courbe CAPP peuvent être utilisées pour définir les sauts de classe en classe, tandis que les sections rectilignes définissent les intervalles des classes mises en considération (Sawatzky et al., 2009b). Nous avons utilisé cette méthode pour définir les sauts de classes, et nous avons ainsi obtenus des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain formées de 5 classes. La Figure VII.13, montre les pauses de classe décidées en utilisant la méthode CAPP.

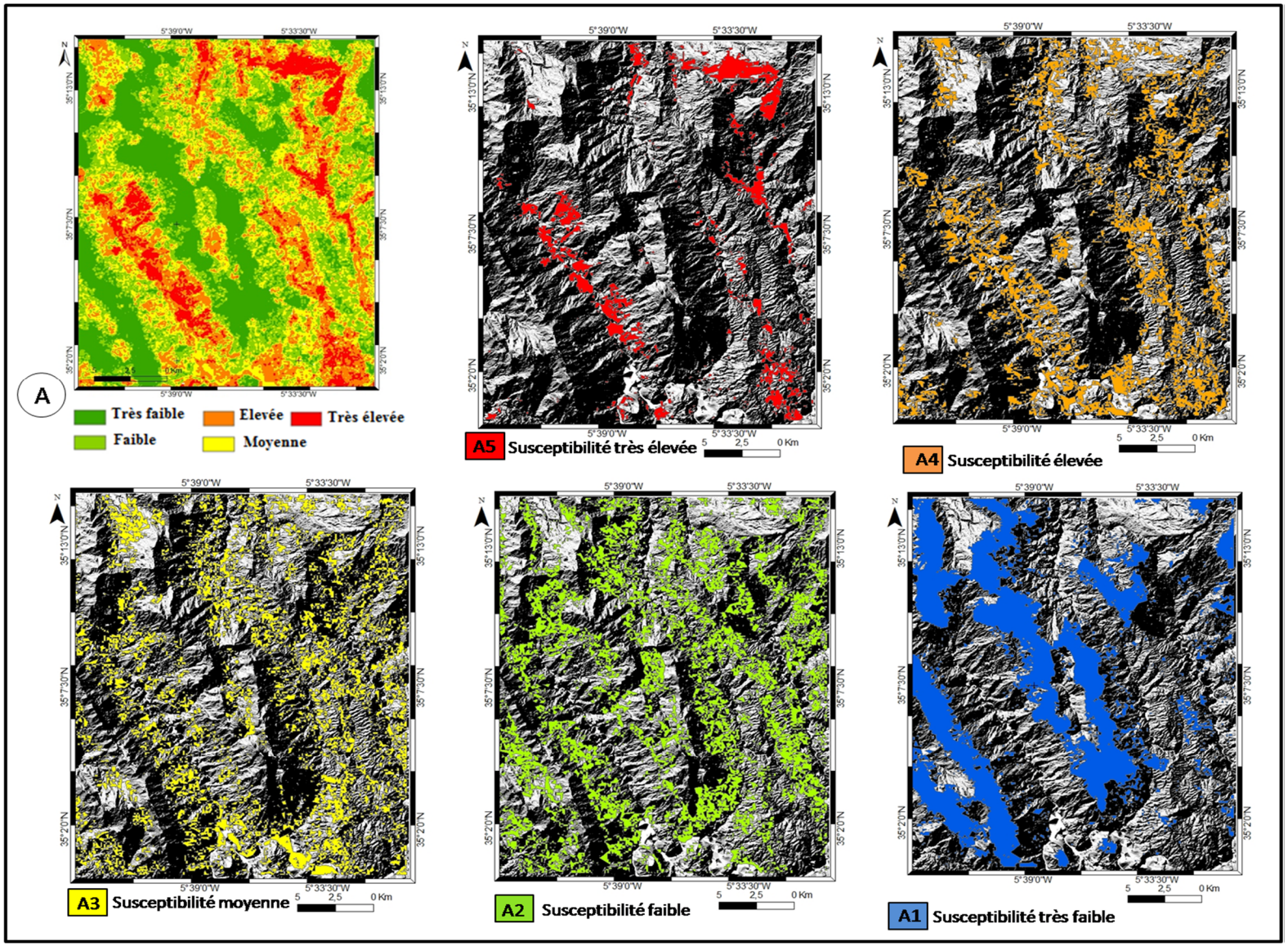
Les Figures VII.14 et 15, représentent les classes de susceptibilité aux instabilités de terrain séparées et drapées sur un MNT (Hillshade).

Les changements de pente des tracés SRC/PRC peuvent également être utilisés pour définir des points de rupture qui séparent des intervalles de classes (Sawatzky et al. 2009b, outil de fréquence par zones).

Raines, 2001 mentionne que l'utilisation de la symbolisation d'ArcGIS (propriété "symbology") par des ruptures naturelles "*Natural breaks*" donnera des points de rupture similaires aux ruptures des courbes CAPP et SRC.



FigureVII.13: Les subdivisions des classes de susceptibilité aux instabilités des versants *au niveau de la région de Souk El Quola (Q) et la région d'El Ksar El Kebir (K).*



FigureVII.14: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de Souk El Quola, issues du modèle "WofE".

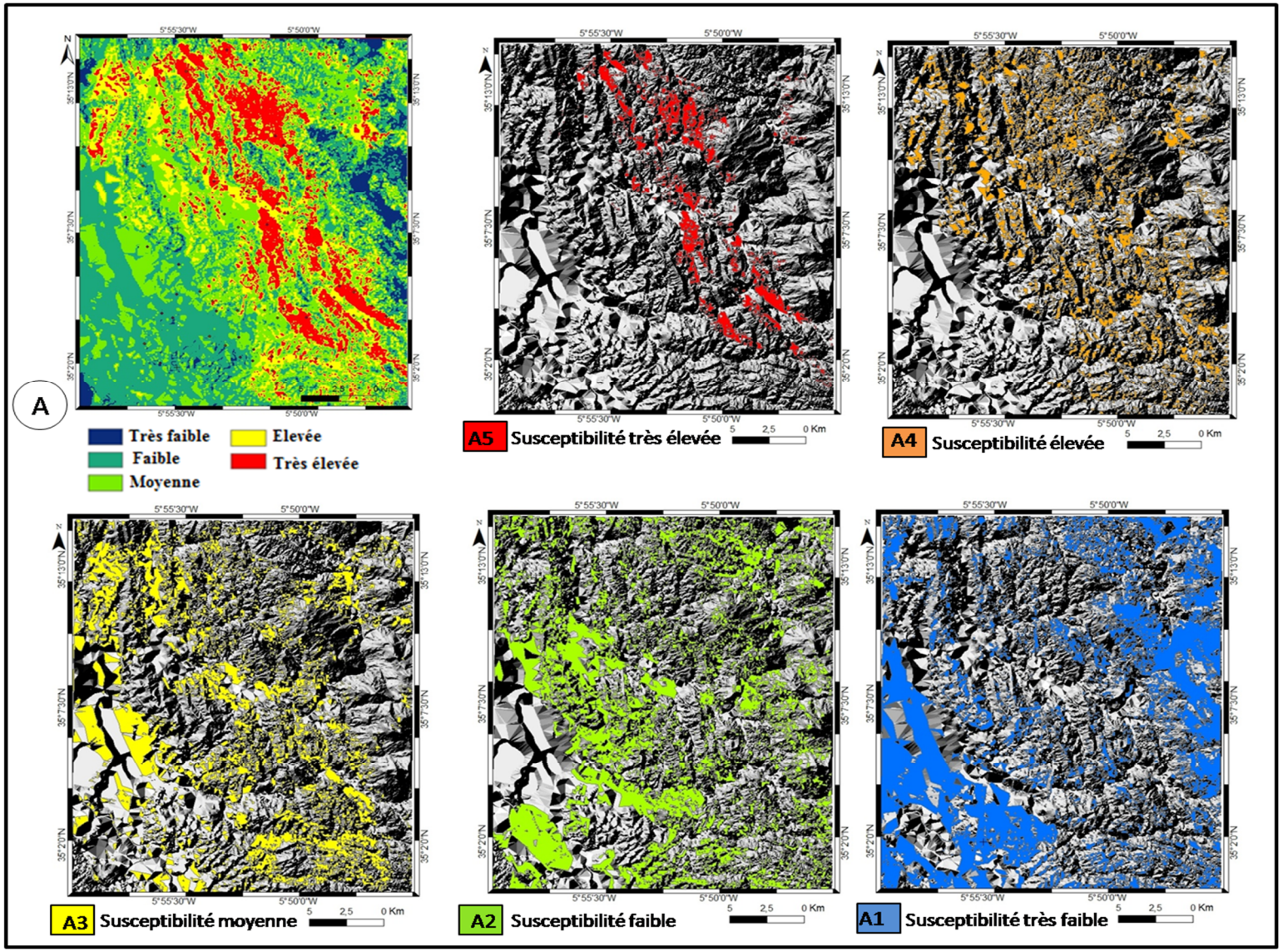


Figure VII.15:Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région d'EL Ksar El Kebir, issues du modèle "WofE".

6.4 Validatin experte :

Dans le secteurminier, Mihalasky 1999 déclare que"*de manière générale, la modélisation du potentiel minéral par la méthode WofE est estimée comme réussie, si la distribution des occurrences minérales, connues et/ou utilisées pour délimiter des régions à potentiel minéral élevé pour une exploration ultérieure, coïncident avec les classes à probabilité très élevée / élevé au niveau des cartes résultantes.*"
Dans notre cas, nous avons appliqué cette règle en effectuant une analyse statistique, dans le but de s'assurer que les instabilités de terrain recensées et ceux qui ont été utilisées dans la modélisation se localisent dans les zones à forte susceptibilité aux mouvements de pentes. Le tableau VII.6 résumeles résultats statistiques obtenus.

Tableau VII. 6 : Calculs statistiques de la densité des points d'instabilités de terrain par rapport aux classes de susceptibilité au niveau des cartes de probabilité résultantes.

	Classes	Surface (Km^2)	Pourcentage de surface %	Nombre des points d'instabilité	Densité par unité de surface (%)
Souk El Quola	Très élevée	42,014	06,83%	18	42,84%
	Élevée	106,06	17,24%	35	33,00%
	Moyenne	128,70	20,94%	18	13,98%
	Faible	163,32	26,56%	17	10,41%
	Trop faible	174,86	28,43%	6	03,43%
El Ksar EL Kebir	Très élevée	34,86	05,60%	14	40,16%
	Élevée	87,51	14,05%	26	29,71%
	Moyenne	133,25	21,38%	27	20,26%
	Faible	170,27	27,33%	21	12,33%
	Trop faible	197,13	31,64%	17	08,62%

La figure VII.16 illustre la corrélation entre les classes de susceptibilité et le pourcentage de points au niveau de chacune d'elles. Nous remarquons que la densité des points d'instabilités de terrain diminue progressivement en passant de la classe à susceptibilité très élevée vers la classe qui a une susceptibilité trop faible. Selon la déclaration ci-dessus, et d'après cette analyse statistique, il semble que notre modèle peut être considéré comme un succès.

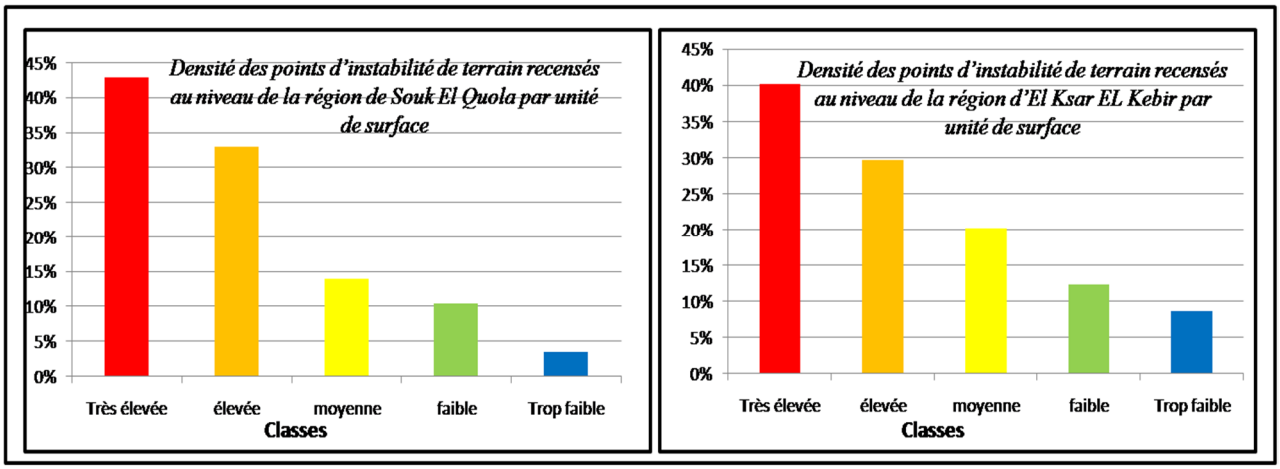


Figure VII.16: Corrélation des instabilités de terrain déjà connus.

Conclusion:

L'objectif principal de ce paragraphe était de générer des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain à l'aide de la modélisation WofE, et aussi de tester le modèlel pour une région ou les conditions naturelles varient subitement dans l'espace. Une démarchea été adoptée pour réaliser ce modèle WofE à l'aide d'ArcGIS, commençant par l'étape de la récolte des données et de la conception du modèle à la génération d'une carte de probabilité d'alèa.

Les aspects les plus chronophages de ce projet ont été : l'acquisition des données, la mise en forme de la base des données, la compréhension du logiciel, le développement d'une compréhension de la littérature.

Maintenant que cela a été fait, les recherches ultérieures peuvent consacrer plus de temps à améliorer la qualité des données et les performances de prédiction du modèle, ainsi qu'explorer les aspects de la génération des instabilités de terrain en exploitant la carte de probabilité postérieure.En d'autres termes, actuellement les recherches académiques sur les modèles de prédiction sont pour la plupart bien établies (Carranza,2009), et les progrès futurs dans ce sujet sont plus souhaitables dans :**(i)** les domaines de l'amélioration de la précision et de l'efficacité, **(ii)** de l'utilité des cartes de susceptibilité. Sur le plan statistique, Carranza,2009 note qu'il y a une pénurie d'études sur le suivi de l'influence de l'incertitude des cartes d'entrée sur les cartes de sortie, du fait que souvent certaines cartes manquent de précision dans l'information. D'autres problèmes peuvent être évoqués à savoir la qualité et la disponibilité des données (un problème courant avec le SIG en général) et aussi le fait que la nature des paramètres considérés est essentiellement un processus 3D, alors que la plupart des fonctionnalités SIG fonctionnent en 2D (Partington 2010).

Les résultats que nous avons obtenus montrent que l'approche Weight of Evidence fonctionne bien pour élaborer des cartes de susceptibilités aux instabilités de terrain au niveau de notre secteur d'étude. Sauf qu'il reste beaucoup à faire afin d'améliorer l'efficacité. Ces résultats indiquent que la combinaison des sept variables prédictives (gradient de pente, faciès, occupation du sol, densité de fracturation, l'hypsométrie, densité du réseau hydrographique, et exposition) permet de prédire la localisation spatiale (en termes de susceptibilité) de 68% des aires observées de glissements de terrain. Les résultats de ce modèle probabiliste seront comparés à ceux obtenus en utilisant l'approche par régression logistique, dans le huitième chapitre.

CHAPITRE VIII: CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN A UNE ECHELLE MOYENNE (1/50000 EME) EN APPLIQUANT L'APPROCHE PAR REGRESSION LOGISTIQUE (RL) AU NIVEAU DE DEUX REGIONS KSAR EL KEBIR ET SOUK EL QUOLA

Introduction:

La régression logistique est l'un des modèles d'analyse multivariée les plus utilisés dans plusieurs domaines (la prospection minière, la prévision des risques, l'épidémiologie...), (Ayalew et Yamagishi 2005 ; Lee et Pradhan 2007 ; Bai et al.2010; Ercanoglu et Temiz 2011; Erener et Duzgun 2012; Devkota et al.2013; Fressad 2013). Elle offre la possibilité de quantifier la relation entre la survenue d'un évènement (variable modélisable qualitative) et les facteurs prédictifs susceptibles de l'influencer (variables conditionnantes dites explicatives). Il s'agit donc d'un modèle permettant de relier la variable dépendante (Z) à des variables explicatives (X_1, X_2, X_3, ... X_n). A la différence de la regressionlinéaire (ou la variable à expliquer estunevariablequantitative), la regression logistique s'applique lorsque la variable à expliquer (Z) est qualitative. Cependant, il faut garder à l'esprit que l'identification d'une liaison entre une variable expliquée (Z) et une ou des variables explicatives (X_i) ne témoigne pas toujours d'un lien de causalité et il convient de garder une certaine prudence lors de l'interprétation des résultats.

L'utilisation de la régression logistique dans cette étude découle non seulement du fait que cette approche assouplit les hypothèses strictes requises par d'autres méthodes statistiques multivariées, mais aussi pour démontrer qu'elle peut être combinée avec des analyses statistiques bivariées (BSA) afin de simplifier l'interprétation du modèle obtenu à la fin. L'intérêt principal de l'utilisation de la régression logistique dans la cartographie de susceptibilité est de trouver la meilleure fonction d'ajustement pour décrire la relation entre la présence ou l'absence des glissements de terrain (variable modélisable) et un ensemble de paramètres prédictifs tels que l'angle de pente et la lithologie.

Dans notre étude, la carte d'inventaire des glissements de terrain qui a été utilisée pour produire la variable modélisable est la même qui a été utilisé dans le chapitre.VII (cf. paragraphe 2.1). Cette variableprend une valeur de 0 pour l'absence et de 1 pour la présence du phénomène étudié "ruptures de pente".

La lithologie, la fracturation, le gradient de pente, l'exposition, l'hypsométrie, la densité du réseau hydrographique et l'occupation du sol ont été pris comme variables prédictives indépendantes. L'effet de chaque paramètre sur la fréquence des glissements de terrain est évalué à partir du coefficient correspondant calculé par la fonction de régression logistique. Les interprétations des coefficients permettent de déterminer l'occurrence de chaque facteur dans la genèse et la répartition des glissements de terrain. La carte de probabilité prédite qui a été élaborée en appliquant l'approche par régression logistique, dans laquelle les secteurs étudiés ont été classés en cinq catégories de susceptibilité aux glissements de terrain : très faible, faible, moyenne, élevée ; et très élevée.

Le choix de la régression logistique vient des succès de cette méthode décrits dans la littérature antérieure. Ainsi, de nombreuses études ont-elles mis le point sur l'analyse comparative des différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain, faisant d'elle une des techniques de modélisation les plus employées et validées. D'autre part, le caractère pratique et relativement souple d'utilisation constitue un argument de plus pour le choix de cette méthode.

La régression logistique, permet de prédire les facteurs de prédisposition sur la présence/absence de glissement de terrain. Elle permet de modéliser la probabilité pour qu'un mouvement de terrain survient pour différentes valeurs d'un ensemble de variables descriptives quantitatives et/ou qualitatives (Dai et al. 2001 ; Süzen et Doyuran, 2004). La probabilité (P) d'occurrence des glissements de terrain, calculée pour chaque unité élémentaire de surface, peut prendre des valeurs entre 0 et 1. Cette technique est facilement implantée dans un SIG; et ne suppose pas obligatoirement une hypothèse d'indépendance conditionnelle (Agterberg et al., 1989); aussi, le calcul des probabilités à posteriori se fait-il pour chaque variable prédictive.

Cependant, la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain repose sur une connaissance assez complexe des instabilités de terrain et des facteurs qui les contrôlent. La fiabilité des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain dépend principalement de : (**i**) la quantité et la qualité des données disponibles, (**ii**) de l'échelle de travail, et (**iii**) du choix de la méthodologie d'analyse appropriée à la modélisation.

1. Principes de calcul mathématique du modèle régression logistique:

La régression logistique est une méthode multivariée couramment employée en statistiques visant à prédire la probabilité d'occurrence d'un événement dont la distribution est binaire (0 ou 1) (Ayalew & Yamagishi, 2005 ; Yesilnacar & Topal, 2005 ; Falaschi et al., 2009 ; Mathew et al., 2009 ; Yilmaz, 2010 ; Bai et al., 2011. Fressad, 2013). Or la régressionlinéaire permet de caractériser les liens entre une variable à expliquer (Y) quantitative et des variables explicatives(X_1,X_2,X_3,...X_n), *(Equation VIII.1)*:

$$Z=b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 +.....+ b_nX_n+ \varepsilon \text{(Equation VIII.1)}$$

Equation.VIII.1 : Modèle de régression linéaire multiple : la variable à expliquer (Z) est exprimée en fonction d'un intercepte (ou ordonné) à l'origine b0; des variables explicatives (Xi) associées à leurs coefficients bi et à un terme de bruit ε.

A l'évidence, ce modèle ne s'applique pas aux variables qualitatives et notamment binaires ou Z s'exprime en termes de oui/non. Il est donc nécessaire d'utiliser un modèle adapté permettant de relier les variables explicatives à la variable qualitative (*Z*) à prédire. L'astuce de la régression logistique ne consiste pas à modéliser la variable qualitative *Z* mais à estimer la probabilité que celle-ci se réalise. Le modèle régression logistique *(Equation VIII.2)* permet une expression non linéaire, variant de façon monotone entre 0 et 1, de cette probabilité en fonction des variables explicatives (X_i), lesquelles peuvent être continues ou discrètes et ne nécessitant pas une distribution normale (Hosmer & Lemeshow, 1989). L'intérêt majeur de cette technique est de quantifier la force de l'association entre chaque variable indépendante (variables prédictives) et la variable dépendante (variable modélisable), en tenant compte de l'effet des autres variables intégrées dans le modèle "mesure ajustée" (Hosmer & Lemeshow, 1989).

Fondamentalement, l'analyse LR relie la probabilité d'occurrence de glissement de terrain (ayant des valeurs de 0 à 1) au *Z* "logit" (où $-1<Z<0$ pour une plus forte probabilité de non-occurrence et $0<Z<1$ pour une plus grande probabilité d'occurrence). La fonction logistique peut être écrite telle que (Allison, 2001) *(Equation VIII.2)*:

$$P=e^z/1+e^z =1/1+e^{-z} \quad \text{(Equation VIII.2)}$$

$$d'ouZ=Logit(p)=ln(p/(1-p))$$

Equation.VIII.2: Modèle de régression logistique multiple: la variable à expliquer (Z) est exprimée en fonction d'un intercepte (ou ordonnée) à l'origine b_0; des variables explicatives (X_i) associées à leurs coefficients bi.

Où p est la probabilité que la variable dépendante (*Z*) soit 1; *p / (1-p)* est le rapport de probabilité ou de vraisemblance.

On suppose que le logit *Z* contient les variables indépendantes dont l'occurrence de glissement de terrain peut dépendre. L'analyse LR suppose que le terme *Z* est une combinaison de l'ensemble indépendant de variables géographiques X_i *(i = 1,2, ..., n)* agissant comme facteurs causaux potentiels des phénomènes de glissement de terrain. Le terme *Z* est exprimé par la formule linéaire, (Atkinson et Massari, 1998) :

$$Z = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + ... + b_nX_n$$

b_0 étant l'ordonnée à l'origine, et b_1, b_2,....., b_n sont des coefficients qui mesurent la contribution des facteurs indépendants (X_1, X_2, ..., X_n) aux variations de *Z*. Le résultat représente la probabilité qu'un événement se produit divisé par la probabilité qu'il ne le fasse pas. Si un coefficient est positif, sa valeur logarithmique transformée sera supérieure à un, ce qui signifie que l'événement est plus susceptible de se produire (L.Ayalew, H.Yamagishi, 2005). Si un coefficient est négatif, ce dernier sera inférieur à un et la probabilité que l'événement se produit diminue. Pour un coefficient positif, la probabilité tracée par rapport aux valeurs des variables indépendantes (X_i) suit une courbe avecune allure sigmoïde et varie de façon monotone entre 0 et 1. Une image miroir sera obtenue pour un coefficient négatif (Menard, 1995).

L'avantage de cette théorie réside dans un calcul des probabilités à posteriori pour chaque vp, c'est une estimation directe qui ne suggère pas nécessairement une indépendance des variables prédictives (Agterberg et al., 1989).

Cependant, cette approche présente intrinsèquement certaines limites telles que la généralisation et la simplification des facteurs de causalité. De plus, cette méthode ne prend pas en compte les aspects temporels des glissements de terrain et n'est pas en mesure de prédire l'impact des changements des conditions de contrôle.

2. Outils et méthodes:

Dans cette approche, nous avons aussi utilisé des outils SIG, notamment l'outil "*Logistic Regression*" sur "*Spatial data Modeller*"pour la cartographie de la susceptibilité aux instabilités de terrain (Landslides Susceptibility Maps). L'outil "*Logistic Regression*" implanté sur Arc SDM, permet de calculer les probabilités par la méthode de régression logistique.Cet outil ne nécessite pas une indépendance conditionnelle entre les variables prédictives, et permet l'obtention des probabilités justes (Raines et al. 2009).

Pour atteindre l'objectif de l'étude, une géodatabase comprenant tous les facteurs étudiés a été générée. A cette étape, le choix des variables explicatives X_i est nécessaire du fait qu'ils ont une grande influence sur la qualité des résultats finaux. Le modèle logistique doit être basé sur des hypothèses et des connaissances du "réseau de causalité" entre les variables explicatives et la variable à expliquer (Preux et al., 2005 ; Allison, 2012 ; Fressad, 2013), ce qui a été analysé dans le chapitre.IV. En effet, un niveau de significativité minimal est requis entre les variables sous peine d'approximations dans les coefficients à cause des effets de "concurrence" entre les variables et l'estimation du logit (Preux et al., 2005 ; Fressad, 2013).

La stratégie de modélisation appliquée pour cette recherche suit cinq étapes successives, qui sont dépendantes et réalisées selon une procédure linéaire: (**i**) Elaboration d'un inventaire des instabilité de terrain, (**ii**) Collection et structuration des variables explicatives, (**iii**) Evaluation de l'occurrence spatiale de chaque facteur prédictif (calcul des poids)et la sélection des paramètres les plus significatives, (**iv**) calcul des scores logistiques (**v**) Validation des résultats et reclassification des cartes. La figureVIII.1, présente un diagramme synthétique des différentes étapes de la procédure de modélisation.

Quoi-que l'approche par régression logistique, qui est considérée comme objective, soit l'un des modèles statistiques quantitatifsl'opinion de la personne en charge de l'étude (ou bien de l'expert) reste nécessaire régulièrement le long des étapes du processus de la modélisation, et en particulier lors du choix des paramètres explicatifs, dans la mesure où cette opinion permet de ne sélectionner que des variables vraisemblables. Certaines données jugées non significatives ne sont ainsi pas testées et permettent un gain de temps important.

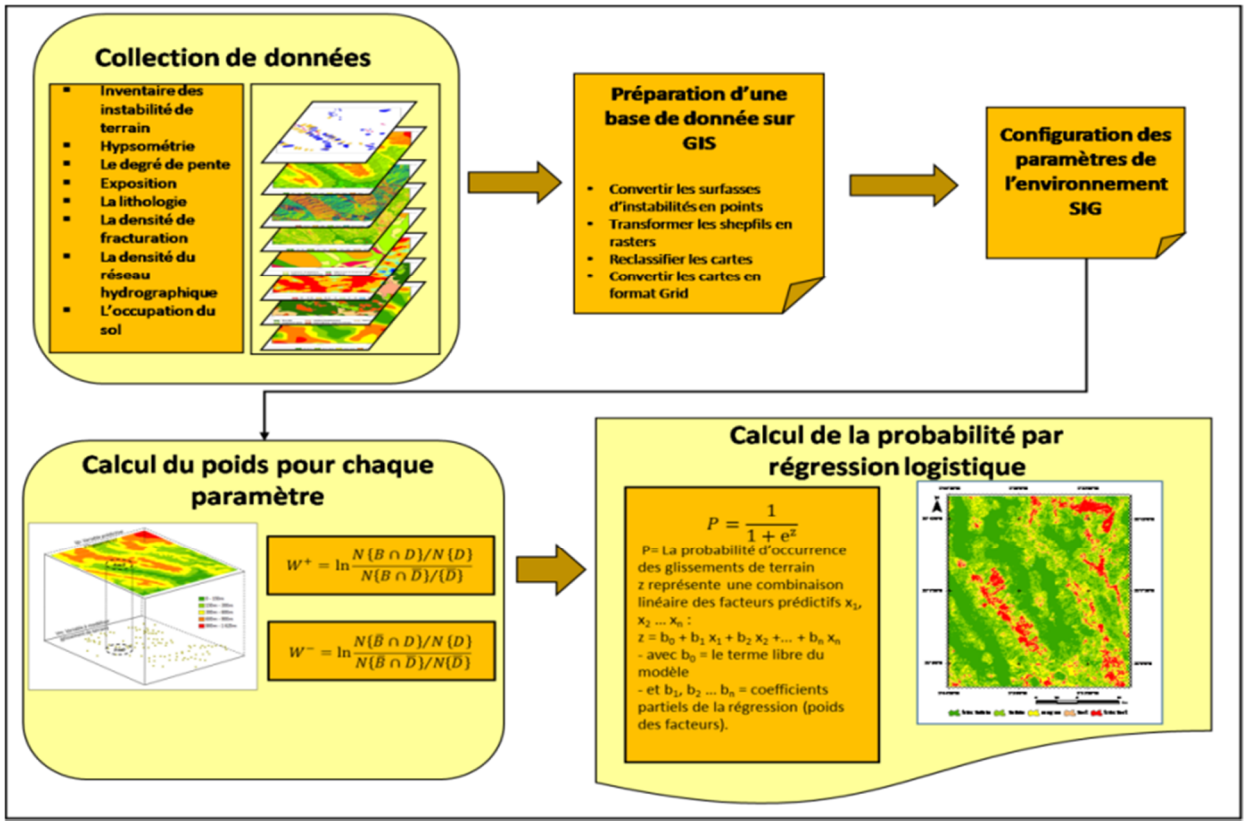


Figure VIII.1 : Organigramme de l'approche adoptée dans l'étude.

2.1. Echantillonnage du facteur modélisable :

Avant de procéder à l'étape du calcul de la probabilité à postériori par régression logistique, un échantillonnage des centroïdes représentant les surfaces instables est effectué. Cet échantillonnage est réalisé en vue de préserver un sous-ensemble de points de glissements non utilisés dans la modélisation, celui-ci va être utilisé dans la phase de validation du modèle. La ségrégation des deux sous-ensembles a été réalisée d'une façon arbitraire grâce à l'outil "*Training Sites Reduction* " sur ArcSDM. Cette étape a été décrite dans le chapitre.VII (cf paragraphe 2.1).

2.2. La relation entre les mouvements de terrain et les facteurs du terrain:

Dans le but d'effectuer une comparaison entre les résultats obtenus en appliquant la méthode WofE (chapitre VII), avec celles issus de la modélisation par régression logistique, nous avons opté pour l'utilisation des mêmes paramètres prédictifs ; tout en respectant la sensibilité de la méthode au nombre et à la qualité des données introduites (surtout du poids de la corrélation entre les instabilités de terrain et la variable prédictive).

Cependant, la phase de la sélection des paramètres causatifs est une tâche difficile car il n'y a pas de critères ni de normes universelles. Le consensus général est que toute variable prédictive doit avoir un certain degré d'affinité avec la variable dépendante, être représentée équiTablement dans toute la zone d'étude), non uniforme (varie spatialement), mesurable (peut être exprimée par l'un des différents types d'échelles de mesure) et non redondante (son effet ne devrait pas expliquer les conséquences doubles dans le résultat final). Dans la zone d'étude, le facteur principal déclenchant des glissements de terrain est la forte quantité de précipitations. Cependant, l'analyse de régression n'inclut pas les précipitations parce qu'ils sont relativement uniformes dans toute la zone d'étude. La même chose peut être dite de la sismicité.

Les données nécessaires pour l'obtention des valeurs de l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain ont été acquises à partir : des documents cartographiques, des images satellitaires, des visites de terrain et des études antérieures. Ces données sont subdivisées en cinq principaux groupes : géomorphologiques, topographiques, géologiques et géotechnique, hydrogéologiques, et occupation du sol. Les facteurs cartographiés ont été inclus dans une base de données SIG, ce qui a permis la spatialisation de ces paramètres déclencheurs au niveau ponctuel et spatial en utilisant des techniques d'interpolation. La technologie SIG permet également la reclassification de chaque facteur inclus dans la modélisation à l'aide de fonctions de reclassification, ce qui permet d'obtenir des coefficients de probabilité pour chaque classe des facteurs de prédisposition.

L'association entre les variables indépendantes (Vp) et la variable dépendante Vm, permet de calculer un poids positif W^+ et un poids négatif W^- (la formule utilisée est la même qui a été décrite dans le chapitre.VII) pour chaque classe des variables prédictives, ces poids correspondent respectivement à une plus grande ou à une plus faible probabilité d'occurrence de Vm (Bonham-Carter, 1994), la fonction $C=W^+-W$ représente le contraste. L'ensemble des calculs a été effectué avec l'outil "*Calculate Weights*" sur l'extention ArcSDM® (Sawatzky & al. 2004). Sur cette base, nous avons décidé pour l'ensemble des facteurs prédictifs introduits dans le modèle logistique.

La relation entre les facteurs causaux et l'occurrence des mouvements gravitaires (MG) a montré deux types de comportements : pour les facteurs morphologiques, environnementaux et lithologiques, la corrélation entre ces facteurs causaux et la variable à expliquer indique que la probabilité de rencontrer une rupture augmente quand la valeur de l'indice des classes de ces facteurs (appropriée par l'expert selon l'affinité aux mouvements gravitaires) augmente. Pour les paramètres à caractère linéaire (telles que la fracturation et le réseau hydrographique), la corrélation entre ces facteurs et l'occurrence des glissements de terrain est inverse, de sorte que la probabilité d'un glissement de terrain augmentait à mesure que la valeur (distance ou densité) du facteur prédictif diminuait.

La superposition de la distribution des mouvements gravitaires (MG) avec la carte de l'aspect de la pente a indiqué que la plupart du MG se produisait vers le Nord-Ouest, l'Ouest et le Sud-Ouest. Cela est dû principalement à l'abondancedes pluies et à l'effet érosif des vents du Nord-Ouest hivernaux. La relation entre l'occurrence des mouvements de terrain et le gradient de pente a montré que les pentes les plus raides ont une plus grande occurrence aux MG. De plus, leur distribution avec les données hypsométriques a indiqué que la plupart des SM se sont produites sur 100–400m de hauteur en raison des formations molles (les marnes) et des précipitations intenses. Au-delà de cette ceinture d'élévation se trouvent des sommets montagneux, surtout au niveau de la région d'El Quola à l'Est, qui se composent progressivement des barres rocheuses nues de nature grèseuses. À faible altitude, les pentes douces étaient constituées de composants faiblement consolidés des alluvions meubles.

L'analyse de l'activité des mouvements gravitaires par rapport aux formations géologiques a montré que trois principaux types de faciès sont les plus sujets aux glissements de terrain : les formations marneuses, les formations argileuses et les dépôts alluviaux. Les MG les plus complexes se situent à proximité des accidents à caractère régional et aux fronts des nappes de charriage ; le caractère sismique de ces discontinuités peut avoir une influence. L'abondance de MG aux alentours des cours d'eau est probablement due aux modifications de pente par ravinement et aux sapements des berges. L'analyse de l'occurrence du MG sur la base du type d'occupation des sols a montré que les terrains agricoles et jachères ainsi que les champs de céréales étaient les terrains les plus exposés aux MG. Cependant, les terrains à végétation naturelle dense et terrains reboisé arbres semble plus sTables. Lors des visites de terrain, nous avons remarqué aussi que ces MG étaient étroitement liés aux routes. C'est que l'activité anthropique jouait un rôle important dans le déclenchement du mouvement de pente.

3. Résultats de la méthode "Régression Logistique" (LR):

3.1 Les calculs de la probabilité à postériori:

Comme nous l'avons indiqué précédemment, la régression logistique est utile pour prédire la présence ou l'absence d'un événement en fonction du poids attribué à chaque classe d'une variable prédictive donnée (Lee et Sambath, 2006).

Dans la présente étude, la variable dépendante est une variable binaire représentant la présence (1) ou l'absence (0) d'un glissement de terrain, où la variable dépendante est binaire et le lien logistique peut être applicable. Le modèle de régression logistique est exprimé sous la forme d'une équation linéaire (Atkinson et Massari 1998),(Equation VIII. 1) :

$$Z = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + ... + b_nX_n \quad \textit{(Equation VIII. 2)}$$

À l'aide du modèle de régression logistique, la relation spatiale entre la fréquence des glissements de terrain et les facteurs conditionnants les glissements de terrain a pu être évaluée. À cette fin, une carte montrant la zone affectée par des glissements de terrain et leur relation avec les cartes factorielles (lithologie, pente, exposition, hypsométrie, occupation du sol, fracturation et réseau hydrographique). Ensuite, la corrélation entre l'événement de glissement de terrain et les facteurs affectant le glissement de terrain a été estimé, voir tableauVIII.1.

Tableau VIII. 1 : Coefficients de régression (RL) et la standard déviationdes sept facteurs prédictifs qui ont été corrélés avec les glissements de terrain *au niveau de deux régions : El Ksar El Kebir et Souk El Quola.*

			El Ksar El Kebir (K)		***Souk El Quola (Q)***	
Variables		***La surface de la cellule en (m)***	***Coefficient***	***Standard déviation***	***Coefficient***	***Standard déviation***
1	***Constant valeur***	_	-3,530654	0,437252	-2.363473	0.416941
2	***Exposition (Exp)***	5	-1,338222	0,751691	-0.043685	0.245045
3	***Lithologie (Lt)***	5	0,583722	0,382585	0.523418	0.300952
4	***Densité de fracturation (Fr)***	5	0,129417	0,347985	0.771805	0.248545
5	***L'hypsométrie (Hy)***	5	0,551747	0,32212	-0.819562	0.478846
6	***L'occupation du sol (Os)***	5	0,680273	0,43556	0.24683	0.274511
7	***La pente (Pt)***	5	0,83336	0,374342	-0.221826	0.353862
8	***Le réseau hydrographique (Rh)***	5	0,81494	0,348071	0.079691	0.239823

Selon les coefficients obtenus, nous constatons pour la région d'El Ksar El Kebir queles coefficients de la lithologie, la pente, l'hypsométrie, l'occupation du sol, la densité du réseau hydrographique et la fracturation sont positifs et le coefficient d'aspect (exposition) estnégatif. Pour la région de Souk El Quola, les coefficients de la lithologie, l'occupation du sol, la densité du réseau hydrographique et la fracturation sont positifs et le coefficient de la pente, l'exposition, et l'hypsométrie sontnégatifs. Cela signifie que les paramètres dont les coefficients positifs sont positivement liés à l'occurrence des glissements de terrain, tandis que les paramètres dont les coefficients sont négatifs indiquent une relation négative avec l'occurrence

des glissements de terrain dans les secteurs d'étude. De plus, le coefficient de lithologie montre que parmi les paramètres efficaces de l'occurrence des glissements de terrain, le paramètre "lithologie" a un effet particulier au niveau, des deux régions, nous remarquons que les coefficients de la lithologie au niveau des deux région sont très proche, tandis que dans la région d'El Ksar El Kebir, les paramètres les plus influents sont le réseau hydrographique et la pente du fait que la région est couverte par d'épaisses formations meubles à cause du caractère érosif de la région. Au niveau de la région de Souk El Quola, le paramètre qui a une occurrence élevée au mouvement gravitaire est la fracturation, ce qui est expliqué par le fait que la plupart des glissements de terrain se localisent au niveau des francs de nappes de charriage toujours en activité.
Les équations logistiques de l'occurrence des versants aux instabilités de terrain, au niveau des deux régions ont été obtenues comme suit :

Z(K)=-3,530654+*(*-1,338222*exp)+*(*0,583722*Lt)+*(*0,129417*Fr)+*(*0,551747*Hy)+ 0,680273*Os+(0,83336*Pt)+(0,81494*Rh) [formule appliquée pour la région d'EL Ksar El kebir]

Z(Q)= -2.363473+(-0.043685*Exp)+(0.523418*Lt)+(0.771805*Fr)+(-0.819562*Hy)+(0.24683*Os)+(-0.221826*Pt)+(0.079691*Rh) [formule appliquée pour la région de Souk El Quola]

Afin de prédire l'occurrence des glissements de terrain en associant tous les paramètres explicatifs, la probabilité (p) a été calculée en utilisant l'équation.2 : $P = 1/1+e^{-z}$. Cette opération est réalisée grâce à l'outil *"Logistic Regression"* sur Arc SDM. Après plusieurs tests de calage et de validation de notre modèle logistique, l'application a permis de générer trois rasters dont : un raster de la probabilité à posteriori ; un raster de confiance et un raster de variance (déviation standard). (FigureVIII.2 et 3).

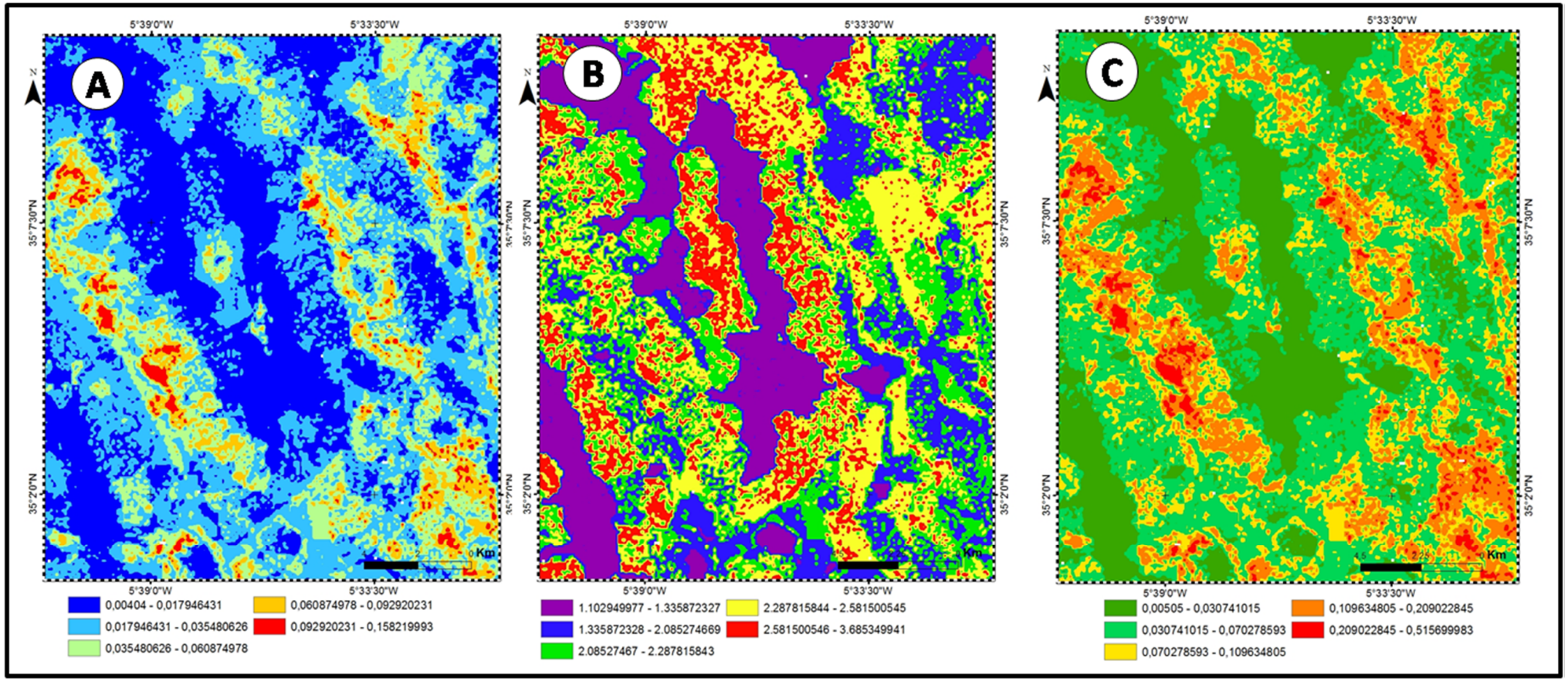


Figure.VIII.2 : les rasters issus du traitement "Régression Logistique"; en appliquant la fonction "Logistic Regression", au niveau de la région de Souk El Quola*: A, Raster Confiance; B, Raster variance; C, Raster de probabilité à postériori;*

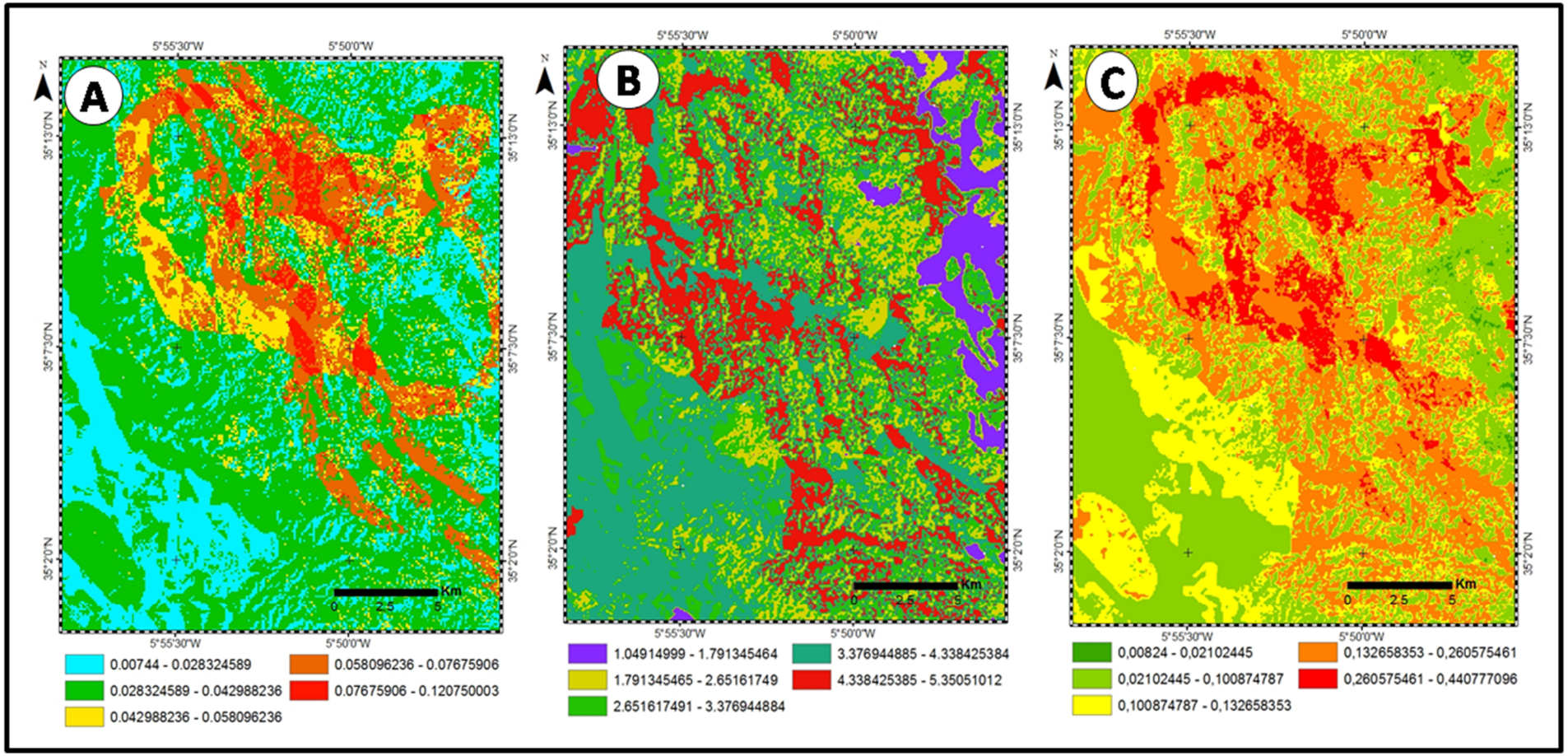
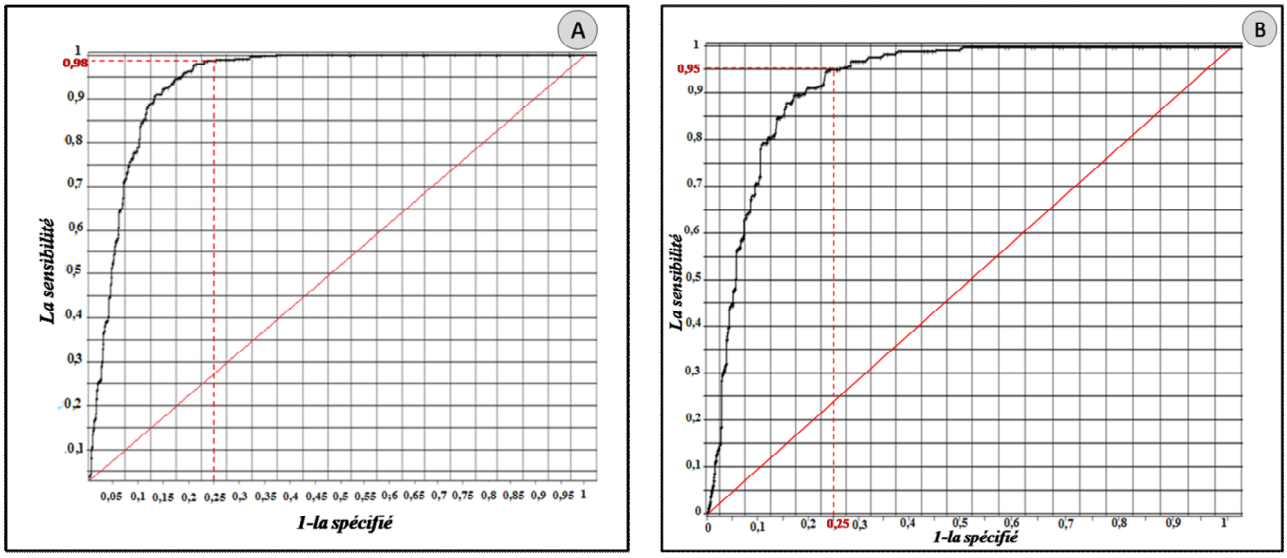


Figure.VIII.3 : les rasters issus du traitement "Régression Logistique"; en appliquant la fonction "Logistic Regression", au niveau de la région de El Ksar El Kbir*: A, Raster Confiance; B, Raster variance; C, Raster de probabilité à postériori;*

3.2. Validations statistiques du modèle logistique : "*Area Frequency Table*":

La validité du modèle de prédiction a été vérifiée à l'aide de la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Il s'agit d'une représentation graphique définissant la relation existante entre la sensibilité et la spécificité d'un modèle pour toutes les valeurs seuils possibles (Swets, 1988 ; Chung et Fabbri, 1999). Les courbes ROC tracent alorsla "*sensibilité*" (ordonnés) contre 1- "*spécificité*" (abscisses), où la "sensibilité" représente la proportion de glissements correctement associés à des cellules classées comme instables. La "spécificité" représente, quant à elle, la proportion de cellules non-affectées par des glissements et classés comme sTables (Metz, 1978 ; Swets, 1988). Plus la courbe est au dessus d'une ligne diagonale (forte croissance, puis tend vers l'asymptote), plus le modèle est considéré comme performant. L'aire sous la courbe *ROC* définit la qualité d'un système prédictif en caractérisant sa capacité à prédire le plus correctement possible l'apparition ou non d'un événement précis. Pour un modèle performant, signifie:$0.5<AUC \leq 1$. $AUC=1$, étant la courbe *ROC* du modèle idéal pour une prédiction parfait, et $AUC = 0.5$ étant la courbe *ROC* d'un modèle prédictif complètement aléatoire. L'AUC (**Area Under the Curve**) constitue un indicateur chiffré synthétique de cette courbe, mesurant la surface située sous celle-ci. Plus la valeur de l'*AUC* est proche de 1, plus le modèle est considéré comme performant. Swets (1988) considère que l'AUC> 0,90 est typique des modèles de classification très précis. Les courbes *ROC* peuvent être préparées :**(i)** en utilisant les mêmes informations sur les glissements de terrain utilisées pour construire le modèle de classification (dans ce cas, la courbe ROC mesure le degré d'ajustement du modèle de prédiction), et **(ii)** pour les informations indépendantes, elles mesurent la compétence de prédiction et de classification. Cette technique a l'avantage d'être totalement indépendante de la classification et donne ainsi une évaluation plus objective des performances de la carte simulée.

Le modèle qui a servi à l'élaboration de la carte de susceptibilité a été construit à partir desglissements recensés au niveau des deux régions d'étude (107 pour la région d'El Ksar El Kebir ; et 95 pour Souk El Quola). Les courbes ROC ont été élaborés aussi en utilisant ces glissements, afin de valider la robustesse de ce modèle (Figure VIII. 4)



FigureVIII.4: les courbes ROC (RL): A : carte de Souk El Quola B: carte d' El Ksar El Kebir.

Pour la région d'El quola la valeur de l'AUC(RL)=0,95; et pour la région d'El Ksar El Kebir la valeur l'AUC(RL)=0,92; ce qui signifie que notre modèle est parfait.

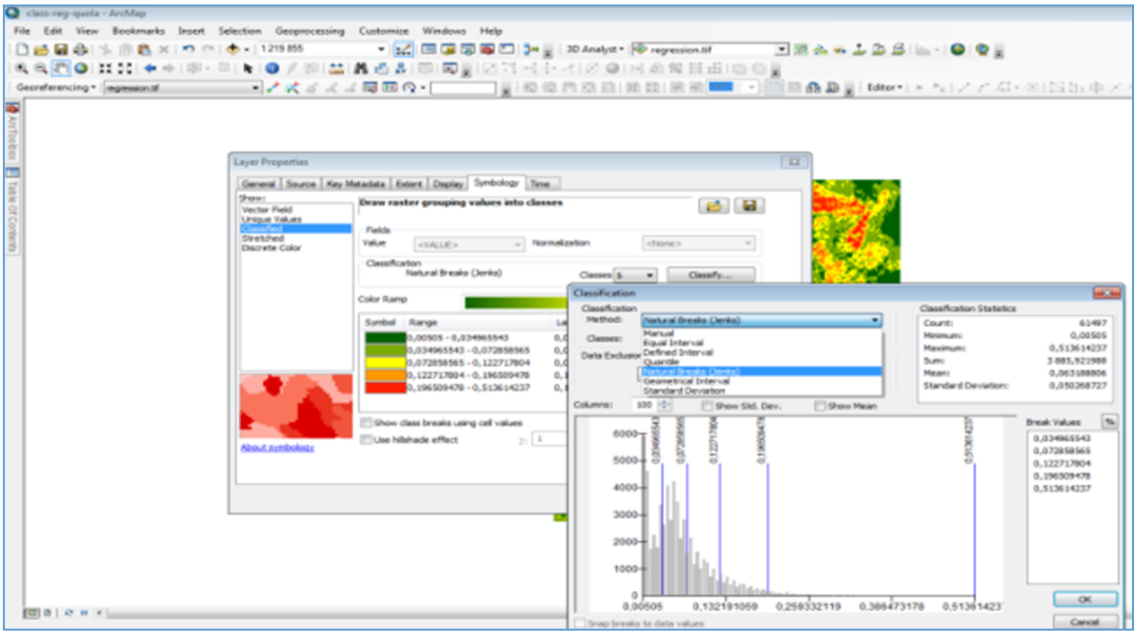
La lecture de la courbe permet de voir que la valeur 0,1 en abscisse correspond à la valeur 0,80 en ordonnée pour la région d'El Quola et à 0,75 pour la région d'El Ksar El Kebir. Ceci peut être interprété de la manière suivante : les 10% des surfaces estimées par le modèle comme les plus susceptibles aux mouvements de

pentes continent 80% des instabilités de terrain cartographiées (ITC) pour la région de Souk El Quola et 75%des ITC dans la région d'El ksar El Kebir. On peut aussi affirmer que plus de 95% des instabilités présumées se situent dans les 25% des terrains les plus susceptibles pour les deux régions étudiées. Le modèle RL semble très robuste, les surfaces jugées comme étant les plus susceptibles par la méthode RL sont celles qui regroupent le plus d'instabilités de terrain. Selon l'hypothèse de la régression logistique, le modèle afm firme que plus de 95% desprochaînes instabilités de terrain auront plus de chance d'avoir lieu dans les mêmes conditions que les précédentes, ainsi les mêmes zones estimées aujourd'hui comme fortement susceptibles feront l'objet de plus de 95% des mouvements gravitaires qui auront lieu dans le futur.

3.3. Reclassification de la carte résultante par RL :

Afin de classer les cartes de probabilité résultante en appliquant le modèle "régression logistique", nous avons utilisé la méthode des seuils naturels (*méthode Jenks*), en utilisant la symbolisation d'ArcGIS (propriété "symbology"), en mentionnant la rubrique des ruptures naturelles "*Natural breaks*" ; étant donné que cette méthode donnera des points de rupture similaires aux ruptures des courbes CAPP et SRC (Raines, 2001).

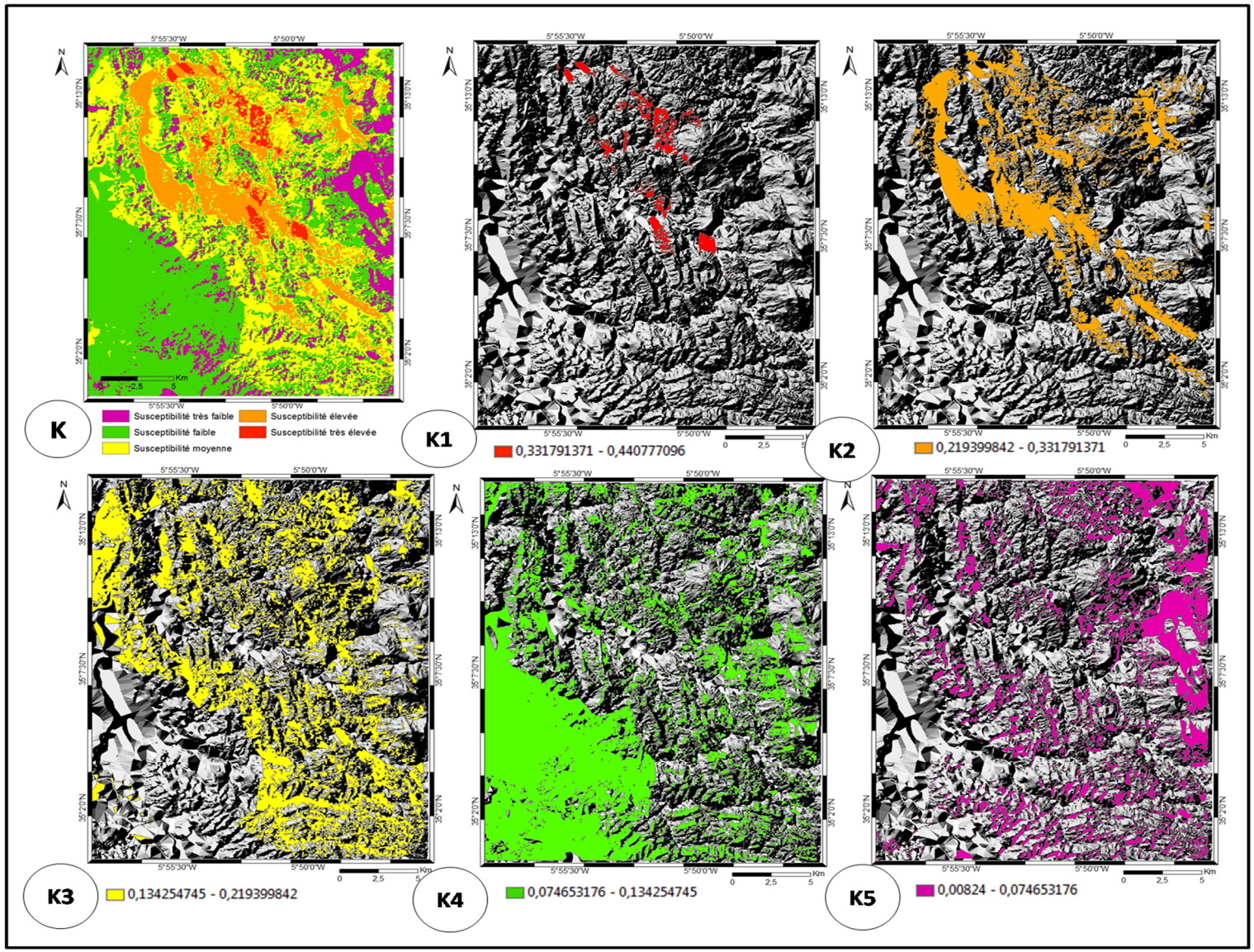
Les classes de seuils naturels s'appuient sur des regroupements naturels inhérents aux données. Les bornes de classes sont identifiées parmi celles qui regroupent le mieux des valeurs similaires et optimisent les différences entre les classes. Les entités sont réparties en classes dont les limites sont définies aux endroits où se trouvent de grandes différences dans les valeurs de données.



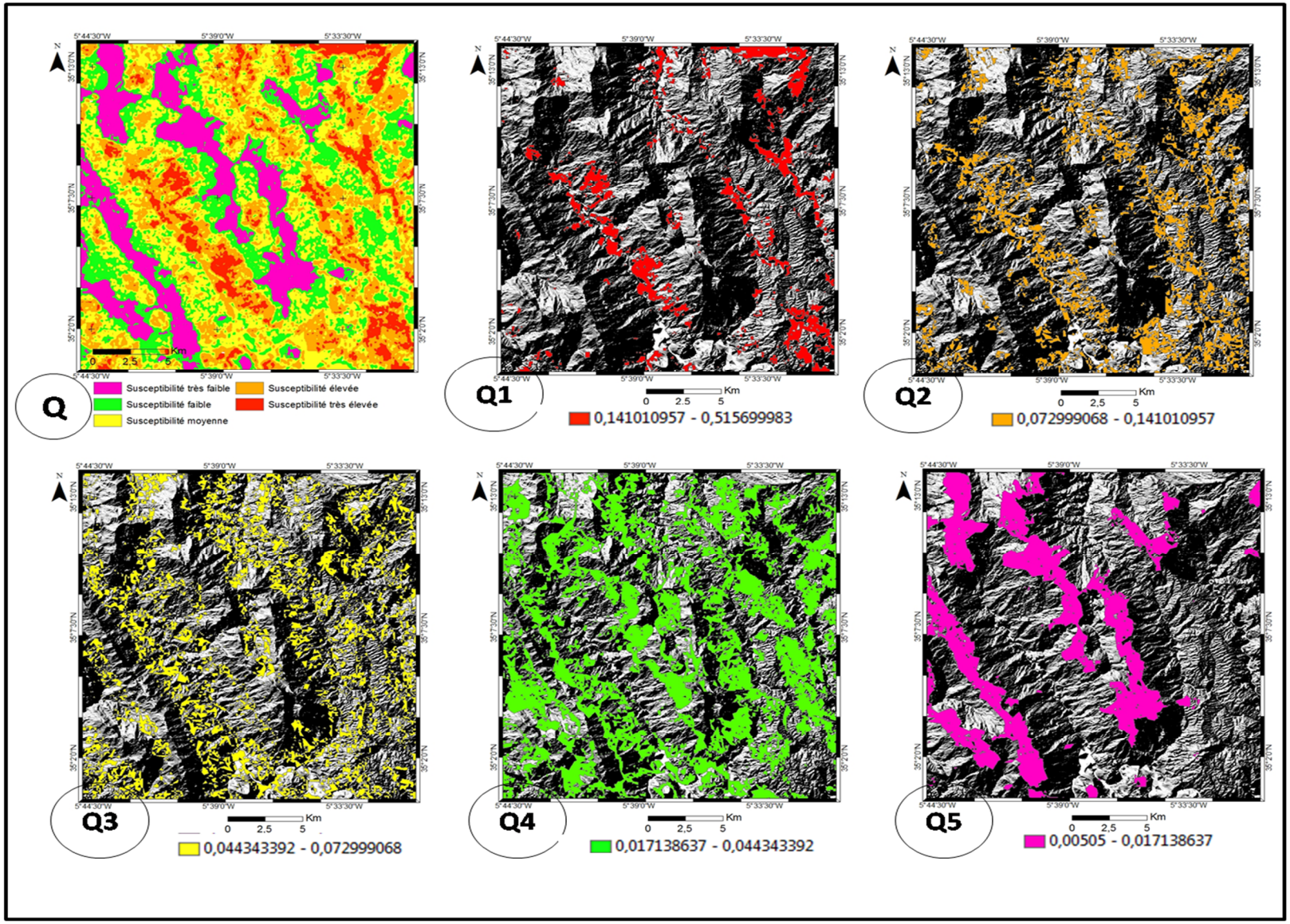
FigureVIII.5: Classification par la méthode des seuils naturels "Natural breaks".

Cette classification repose sur l'algorithme des seuils naturels de Jenks. Pour configurer une classification par seuils naturels (Jenks), nous définissons la méthode de classification sur Natural Breaks (Jenks) (Seuils naturels (Jenks)) sur la boîte à outil "*Layer proprieties*"→"Classify" et indiquons le nombre de classes. https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm

LesFiguresVIII.6 et 7, représentent les classes de susceptibilité aux instabilités de terrain séparées et drapées sur un MNT (Hillshade).



FigureVIII.6: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de la région d'El Ksar El Kebir, issues du modèle "Régression Logistique".



FigureVIII.7: Cartes des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain au niveau de la région de Souk El Quola, issues du modèle "Régression Logistique".

3.4. Validation experte:

Afin de valider les résultats de notre modèle et aussi la classification choisie, nous avons contribué à une corrélation entre les classes de susceptibilité et la densité des instabilités de terrainrecensés lors de nos visites sur le terrain. Le Tableau suivant résume les résultats obtenus de la corrélation :

Tableau VIII. 2: Calculs statistiques de la densité des points d'instabilités de terrain par rapport aux classes de susceptibilité au niveau des cartes de probabilité résultantes par régression logistique.

	Classes	Indice	Surface (Km^2)	Pourcentage de surface %	Nombre des points d'instabilité	Densité (GT) par unité de surface (%)
Souk El Quola	Très élevée	5	55,13	8,96%	31	32,63%
	Élevée	4	100,29	16,31%	22	25,26%
	Moyenne	3	132,01	21,47%	24	23,16%
	Faible	2	220,26	35,81%	17	17,89%
	Trop faible	1	107,30	17,45%	1	1,05%
El Ksar EL Kebir	Très élevée	5	10,56	12,78%	7	6,54%
	Élevée	4	82,63	36,93%	31	28,97%
	Moyenne	3	163,04	27,96%	33	30,84%
	Faible	2	223,74	38,37%	26	24,30%
	Trop faible	1	103,15	17,69%	10	9,35%

Nous constatons qu'au niveau de la région deSouk El Quola, la densité des instabilités de terrain est trop élevée au niveau des classes à susceptibilité trop forte, et elle diminue respectivement avec la diminution de l'occurrence des glissements de terrain, et au niveau de la région d'El Ksar El Kebir la densité des instabilités de terrain est élevée au niveau de la classe à susceptibilité moyenne et élevé (FigureVIII.8). Tout de même, au niveau de la région d'El Ksar El Kebir, nous remarquons que la surface des classes à susceptibilité forte à très forte (en termes de pourcentage) est assez grande en comparaison avec la région de Souk El Quola; par contre, la réalité du terrain révèle que la région de Souk El Quola est la plus touchée par les glissements de terrain.

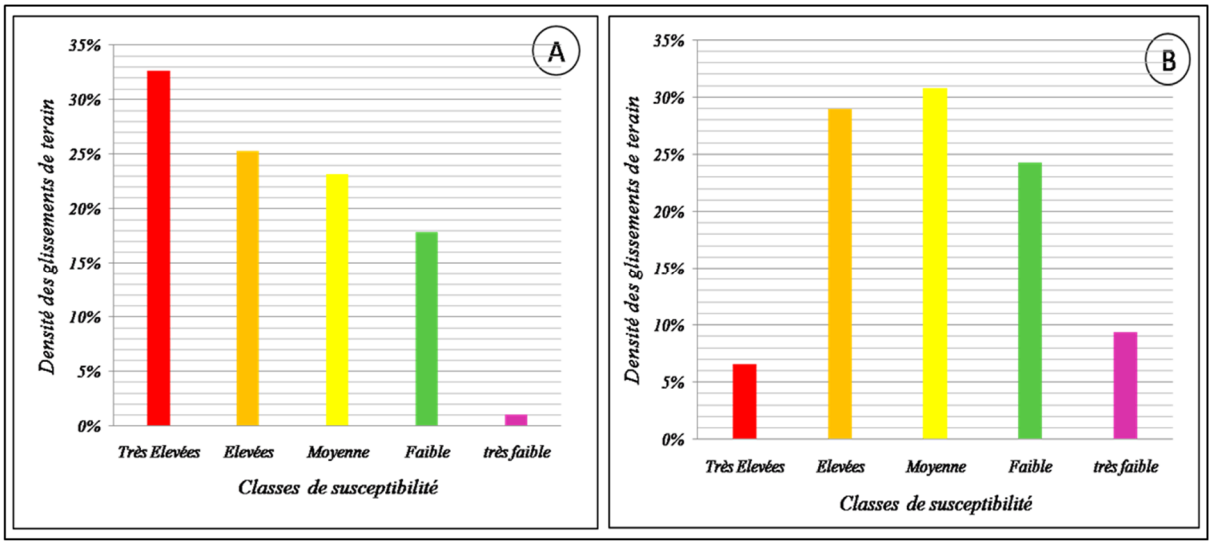


Figure VIII.8: la distribution du total des instabilités de terrain cartographiées au niveau des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain. *(A) au niveau de Souk El Quola, (B) au niveau d'El Ksar El Kebir.*

4. Comparaison des résultats obtenus par la méthode WofE et celles obtenus par Régression Logistique:

Même si elle montre des résultats satisfaisants, la régression logistique fait face à deux problèmes d'application majeurs qu'il convient de préciser (Ferssad, 2013) :

Premièrement, comme toutes les méthodes dites "dirigées par les données", la régression logistique est caractérisée par un manque de confiance statistique dans l'estimation des probabilités faibles et intermédiaires (Guzzetti, 2006 ; Thiery, 2007, Rossi et al., 2010 ; Poiraud, 2012). Quand la relation entre les facteurs de prédisposition et la localisation des glissements est évidente, les résultats peuvent être considérés comme robustes. Lorsque la relation devient plus subtile et discrète, le modèle manque généralement de points de calage et sa fiabilité peut être remise en question (Bonham-Carter, 1994 ; Thiery et al., 2007).

Deuxièmement, la régression logistique est un modèle qui définit uniquement des relations de covariance linéaires entre les variables prédictives et les variables à modéliser (Hosmer & Lemeshow, 1989). Cet aspect ne pose pas de problème pour les données catégorielles, mais constitue un problème fondamental pour les données continues comme par exemple les facteurs topographiques et géologiques. Ce problème de linéarité dans la mise en relation des instabilités de terrain avec les facteurs de prédisposition constitue une limite théorique majeure de la régression logistique.

Les deux méthodes probabilistes "WofE" et "Régression Logistique" permettent d'identifier les secteurs les plus susceptibles qui sont les plus sujets aux phénomènes d'instabilité de terrain.

Les histogrammes de la FigureVIII.9, montre une comparaison entre les résultats obtenus par l'approche Weight of Evidence etl'approche par Régression Logistique. D'après cette comparaison, on constate que les résultats obtenus par le modèle de la théorie de l'évidence sont plus cohérents et sont aussi en parfait accort avec la réalité terrain pour les deux cas étudiés (la région d'EL Ksar El Kebir et la région de Souk El Quola). Tandis que, l'approche par régression logistique, appliquée au niveau de la région de Souk El Quola, a donné des résultats presque identiques à ceux obtenus par l'approche WofE, mais pour la région d'EL Ksar El Kebir les résultats sont largement différentes. Il semble que l'approche par régression logistique est mieux adaptée aux régions montagneuses plus tôt que les zones les moins accidentées. Ainsi l'approche WofE semble plus

logique et plus précise et applicableau niveau des régions montagneuses comme dans les zones moins accidentées, en comparaison avec l'approche par régression logistique.

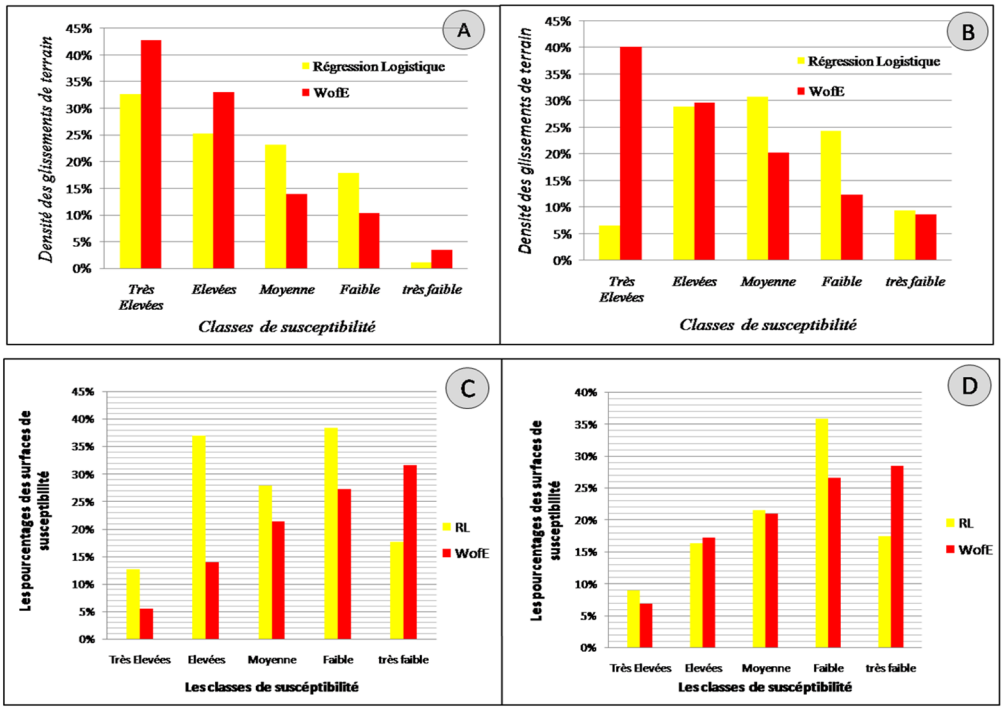


Figure VIII.9: A et B la distribution du total des instabilités de terrain cartographiés au niveau des classes de susceptibilité aux mouvements de pentes.*(A) au niveau de Souk El Quola, (B) au niveau d'El Ksar El Kebir. C et D Le pourcentage des surfaces d'occurrence en fonction des classes de susceptibilité ; (C) au niveau de Souk El Quola, (D) au niveau d'El Ksar El Kebir).*

Conclusion :

Affrontées à la complexité de la réalité, l'utilisation des lois statistiques et probabilistes dans la littérature scientifique augmente, car elle permet la résolution des problèmes impliquant plus de deux variables à caractère hétérogène. Pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain, l'application des modèles quantitatifs offrent la possibilité d'obtenir un degré élevé d'exactitude, en dépit de certains désavantages comme la difficulté d'acquisition et le traitement des données (Yilmaz, 2010), le nombre limité des facteurs prédictifs utilisés (Coe et al., 2004), la fonctionnalité du modèle et les limites de variation des données existantes. L'application de l'approche régression logistique pour l'étude d'une zone caractérisée par le développement des processus d'instabilité de terrain, ou les facteurs pente, occupation du sol, hydrogéologie sont les paramètres les plus importantsdans l'occurrence des mouvements gravitaires.

CHAPITRE IX : APPORT DES CARTES PREVISIONNELLES DU RISQUELIE AUX INSTABILITES DU TERRAIN DANS L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

1. Introduction :

L'aménagement du territoire désigne à la fois l'« Action d'une collectivité sur sonterritoire, et le résultat de cette action. C'est "*l'action volontaire et réfléchie d'une collectivité sur son territoire, soit au niveau local (aménagement rural, urbain, local), soit au niveau régional (grands aménagement régionaux, irrigations), soit au niveau national (aménagement du territoire)*". C'est aussi le "*résultat de cette action*" (Brunet R et al 1995,29).

Dés janvier 2015, le Maroc se dirige vers la régionalisation et depuit il compte 12 régions. L'objectif principal de ce découpage est de bâtir des pôlesrégionaux plus autonomes, cohérents et compétitifs. Cette décentralisation permet aux autorités régionales de prendre en charge les projets d'aménagement régionaux. Ce qui leur offre une liberté de prendre des discisions et de concevoir des stratégies de recherches et développement en phase avec les spécificités des ressourceset des enjeux locaux. Grâce à leurconnaissance du terrain, leur proximité avec les parties prenantes, les régions sont en effet les mieux placéespour décliné à leur niveau les grandes orientations nationales.

Aujourd'hui, le Maroc se trouve à la croisée des chemins dans la mesure où la mondialisation et la globalisation des échanges lui impose de mettre de l'ordre dans son territoire en renforçant la compétitivité de ses villes et de ses régions. Néanmoins, l'aménagement et le développement durable du territoire national reste tributaire du dépassement des contraintes structurelles liées à la géographie et à l'histoire d'une part, et de la nécessité de mettre en place un modèle adéquat de bonne gouvernance territoriale, d'autre part.

La prise en compte du risque des mouvements de terrain dans l'aménagement n'est pas toujours facile. Les réparations sont généralement couteuses. C'est pourquoi, la gestion des risques naturels, notament les instabilités de terrain, doit être prise en compte lors de la planification de l'aménagement. Cette planification doit reposer sur des études préventivesdel'aléa. Le zonage de l'aléa est un outil par excellence de la gestion des risques.

La préventionest l'un des moyens les plus efficaces, et les plus économiques, pour réduire les dommages en cas de glissement de terrain (Fell et al., 2008a ; Dai et al., 2002). Cette planification s'opère notamment à l'aide d'outils cartographiques permettant de réglementer, renseigner et informer les différents acteurs sur les caractéristiques des risques (intensité, extension spatiale et occurrence temporelle) (Garry et al., 2004).

2. Risques des instabilités de terrain au niveau des grandes œuvres d'art dans la province de Larache : les barrages comme exemple.

2.1. Risque de rupture des Barrages :

Le risque majeur induit par la rupture de grands barrages, suite aux mouvements de terrain, est d'une occurrence faible. Or, les conséquences de l'exaucement d'un risque sont catastrophiques en raison de l'étendue du territoire affecté et des enjeux humains, matériels et environnementaux en cause.

L'interaction entre un ou plusieurs aléa (s), se produisant consécutivement sur une dimension spatiale et temporelle, est caractérisée par un lien de causalité directe. Deforte averses ou un séisme peuvent tous déclencher des glissementsde terrain. Ces glissements de terrain, selon le contexte, peuvent déclencher à leurs tours des ruptures des digues barrages. Ces ruptures causent des inondations. Alors qu'on se focalise, souvent, sur les conditions météorologiques ou sur les ruptures des digues comme élément déclencheur des inondations. Or le problème réside dans la susceptibilité des versants aux mouvements de pente.

Au niveau de la province de Larache deux barrages sont construits au niveau des principaux cours d'eau : Barrage Oued El Makhazine sur Oued Loukkos au sud de la région et Barrage El Khroufa sur Oued El Makhazine au nord.

La nature lithologique au niveau des deux sites est très fragile et favorable aux instabilités de terrain. Nous avons cartographié un certain nombre de mouvements gravitaires. L'image Google Earth sur la figure IX.1 représente deux exemples sur les deux flancs du barrage près de la digue du Barrage EL Khroufa.

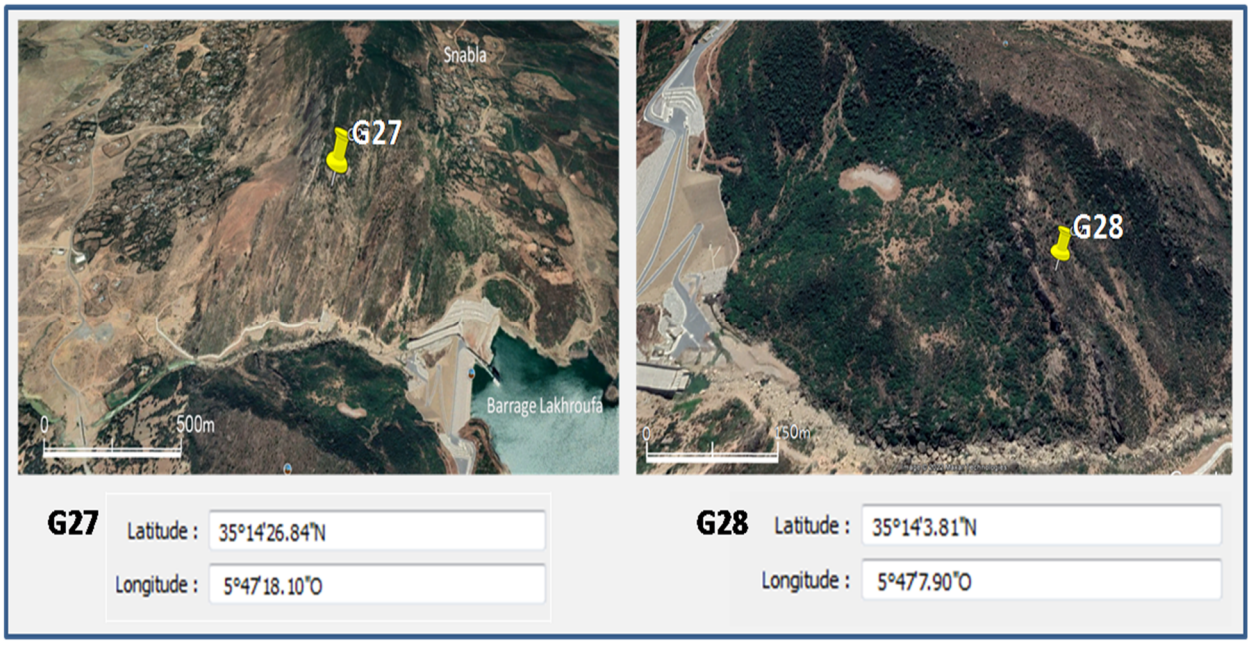


Figure IX.1 : Cas des glissements (G27;G28) qui affectent le barrage El Khroufa près de la digue.

2.2. Risque d'envasement des Barrages :



Les instabilités de terrain aux alentours desréservoirs des barrages sont très répondues. Ellessont la source principale d'envasement par les apports détritiques et terrigènes accrusetl'accumulation de sédiments fins. L'envasement à comme conséquencesla diminution de la capacité de rétention de l'eau dans les réservoirs et la modification des caractéristiques physiques et chimiquesde l'eau, qui a un impact négatif sur la biodiversitéet ses effets se font sentir sur l'ensemble de la chaîne trophique. Les finesparticules inorganiques sont les sédiments qui causent le plus de problèmes puisqu'ellesentraînent une augmentation de la turbidité et se déposent au fond du lac causant une perte d'habitat pour plusieurs espèces aquatiques. L'image de la figureIX.2 montre un exemple de glissement au niveau du Barrage Oued El Maghazine.

Figure IX.2 : Cas des glissements (G30;G31) qui affectent le barrage Oued El Makhazine au niveau du réservoir

3. Risques des instabilités de terrain sur le réseau routier.

Les désordres subits par les mouvements de terrain sur le réseau routier sont très diverses, on peut les classer en trois catégories : **(i)** dégradation partielle ou totale du tracé routier **(ii)** dépôts des matériaux sur la chaussée sous forme de remblais ou d'éboulis **(iii)** détérioration des ouvrages hydrauliques et de soutènement.

Les instabilités de terrain qui touchent la plate forme routière a des incidences sur la circulation routière. Chaque période pluvieuse la région connaît des coupures ou des perturbations de circulation au niveau de plusieurs points. Par conséquence, plusieurs villages et douars se retrouvent enclavés pendant un temps important. Ces perturbations nécessitent l'intervention des équipes de la DPET (Directeur Provincial de l'Equipement et des Transports) pour les rétablissements provisoires, la gestion alternée de la circulation et même la définition et l'aménagement d'itinéraires de rechange. La multitude des points de glissement et des désordres rend la tache relative à la gestion de la circulation plus difficile.

Face à ces difficultés, la consultation des cartes de susceptibilités aux mouvements de terrain devient une nécessité lors de conception d'un nouveau tracé routier ou dans le cas de changement d'itinéraire. La figure IX.3 montre certains glissements qui touchent le réseau routier sur la totalité de la province.

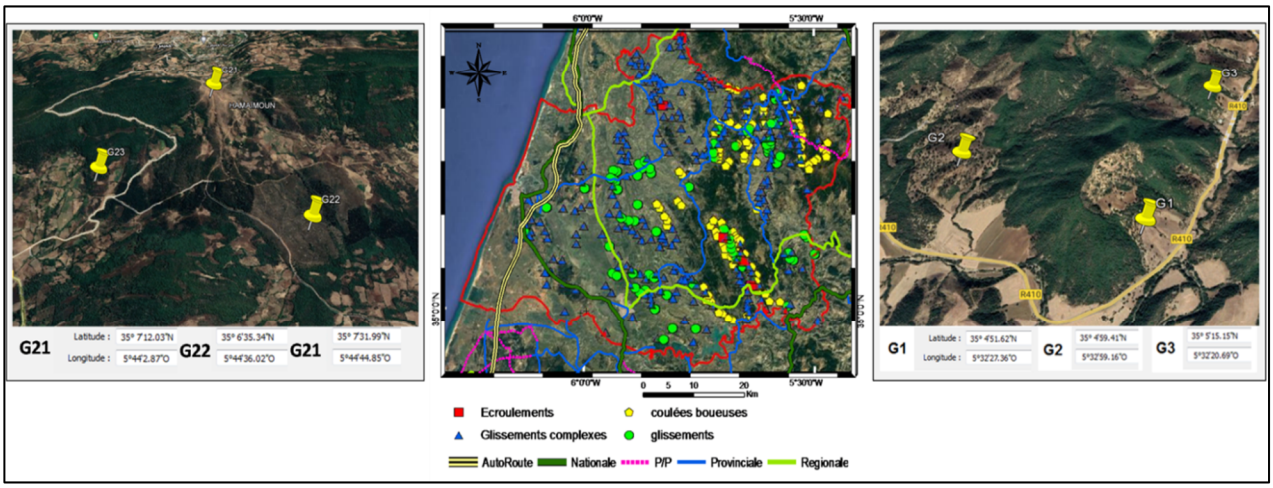


Figure IX.3 : Glissements qui affectent les routes : cas de la localité "Ouarzeine" (G1, G2, G3) et cas de la localité "Hmaimoun".

4. Utilité des cartes de susceptibilités aux instabilités de terrain.

La cartographie de la susceptibilité semble comme un préalable nécessairepour la prévention et l'estimation du risque "mouvement de terrain", Dans une perspective d'aide à la décision lors des projets d'aménagement territoriales. Ces documents peuvent participer à une meilleure gestion du risque et à l'élaboration des futurs plans prévisionnels.

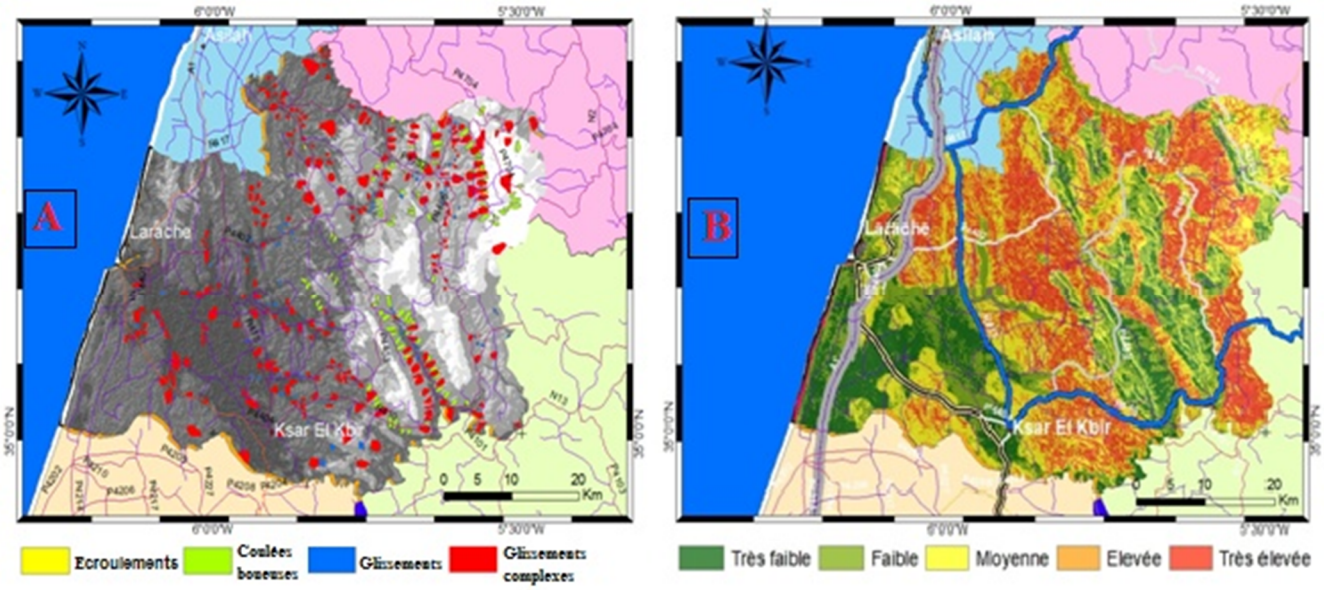


Figure IX.4 : Superposition du réseau routier actuel sur la carte d'inventaire des instabilités de terrain (A) et sur la carte de susceptibilité à l'échelle régionale

D'après l'interpolation du réseau routier sur la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain à échelle régionale, nous constatons que plus de 65% du réseau routier desserrent les zones à occurrences élevées et très élevées.

Les classes de susceptibilité sont ensuite transformées enzones de contraintes. Les classes de susceptibiliténécessitant les mêmes contraintes à l'aménagement sontregroupées en une seule zone de contraintes afin de faciliter le contrôle de l'utilisation du sol. Ce volet peut faire l'objet d'un sujet de recherche future.

Conclusion générale

Les cartes de susceptibilité sont des outils efface et d'une importance éminente pour la gestion des risques naturels et particulièrement les instabilités de terrain, ceci du fait qu'elles servent dans tous les travaux d'aménagement. Plusieurs recherches ont été sujettes d'approches qui ont été utilisées afin d'élaborer des cartes de susceptibilité aux mouvements de pente les plus réalistes possibles et qui reposent sur des formules mathématiques loin des jugements subjectifs. De nombreuses techniques qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives ont été essayées pour analyser la relation entre les instabilités de terrain et leurs paramètres d'influence.

Ce travail de recherche a été consacré pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires à différentes échelles spatiales dans la province de Larache, et en utilisant différentes approches. Ce sujet de recherche est unique dans son genre au niveau de la région. En l'occurrence, les recherches antérieures s'intéressaient plutôt à la classification des instabilités par typologie ou à un zonage à échelle régionale par approche experte (Millies-Lacroix, 1968 ; A.El Gharbaoui, 1980; F.Sossi Alaoui, 2005). La particularité de ce sujet de recherche vient du fait que le travail effectué visait, d'une part, la diminution de la subjectivité des intervenants dans le zonage de la susceptibilité aux instabilité de terrain d'autre part cette étude multidisciplinaires, multisources, et à multi-approches, permettait une bonne compréhension de la relation de ces phénomènes locaux "mouvements gravitaires" avec les facteurs conditionnants, ainsi que l'utilisation des méthodes expertes, semi-quantitatives et quantitatives dans la cartographie préventive à différentes échelles, et permet une comparaison entre l'efficacité de ces méthodes et aussi les avantages et les limites de chacune.

La difficulté de ce travail de recherche vient du fait que peu de données ont été disponibles sur les phénomènes et leurs facteurs de prédisposition au niveau de la région d'étude. Ce travail discute les différentes stratégies d'acquisition et de cartographie géomorphologiquedes différents types de mouvements de pentes, et aussi les données relatives aux paramètres conditionnants : la cartographie des formations lithologiques superficielles, la fracturation, les données liées à la topographie, l'hydrogéologie, l'occupation du sol, la sismicité, et les données climatiques.

En premier lieu, nous nous sommes investis dans l'élaboration d'une base de données qui soit le plus structurée possible. Dans cette première étape, une démarche géomorphologique a été adoptée afin de disposer d'un inventaire des instabilités de terrain en termes de typologie. Cette approche nous a permis aussi de comprendre l'influence de chaque paramètre sur la genèse des mouvements de versants. Dans cette partie du travail, nous avons pu dresser une approche experte de la cartographie préventive des phénomènes.

Par la suite, notre recherche a été engagée sur des approches statistiques semiquantitative et quantitative, afin d'estimer la part d'influence de chaque paramètre conditionnant sur la genèse des instabilités de terrain. La deuxième étape du travail s'est focalisée sur l'élaboration d'une cartographie de la susceptibilité aux instabilités de terrain à une échelle régionale, en utilisant l'approche heuristique. La troisième étape a été orientée vers des approches probabilistes beaucoup plus objectives. Ces méthodes établissent des liens entre les facteurs de prédisposition et la présence des mouvements de terrain. Sur la base de ces liens, des lois sont établies puis interpolées demanière systématique sur le reste du secteur d'étude, et c'est ainsi qu'elles sont générées les cartes de susceptibilité aux instabilités de terrain à une moyenne échelle.

Les principaux résultats de ce travail de recherche sont détaillés dans la **deuxième partie** :

Un temps considérable a été consacré au **chapitre IV**, dans lequel nous avons élaboré : l'inventaire, la cartographie, la classification, et l'identification des mouvements de terrain en termes de typologie. C'est cette partie qui a servi comme base de toutes les études qui suivent. Dans ce chapitre, nous avons mis le point sur l'apport des outils géo-spatiales dans l'identification des mouvements de terrain. Plusieurs

inventaires des mouvements de pente ont été réalisés par différentes techniques (géospatiales, experte, déterministe...) dans le but d'acquérir un jeu de données de base pour le zonage de la susceptibilité.
Cette étape de thèse a permis de :

- ✓ Reconnaitre quatre grandes familles d'instabilités de versants : Il s'agit, des glissements de terrain au sens strict, des écroulements, des coulées boueuses (badlands), et des glissements complexes. Elles sont le résultat aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques.
- ✓ Nous avons cartographié 420 mouvements de terrain, sur une superficie de 2729,14Km².

Une étude experte basée sur les vérités du terrain et sur l'étude géotechnique de certains cas de glissements de terrain (cas du glissement de Taria et cas du glissement de Souk El Quola). Cette étude a été conclue par l'élaboration d'une carte de zonage de susceptibilité aux mouvements gravitaires par approche experte basée sur les enquêtes et l'exploration du terrain.
Dans le **chapitre V**, nous avons élaboré une base de données multi-sources et multi-échelles, permettant la superposition des variables prédictives avec la variable modélisable (Instabilités de terrain), ceci pour une décision logique lors de la classification et la pondération des différents facteurs qui seront introduites dans des modèles de prédiction de la susceptibilité, que ce soit qualitatif, quantitatifs ou semi-quantitatifs. En effet, nous avons procédé à l'acquisition, la description, la hiérarchisation et la cartographie des différents facteurs (prédictifs et déclencheurs), ainsi que leur analyse, leur spatialisation, leur numérisation et leur intégration dans un environnement SIG. Par la suite, nous avons mené une étude statistique, afin d'évaluer la relation de chaque facteur explicatif avec les mouvements de terrains inventoriés. Dans ce chapitre, plusieurs conclusions ont été constatées et sur lesquelles on s'est basé pour le choix des facteurs et aussi pour l'évaluation de leurs parts de causabilité.

- ✓ **Le faciès** : il est cartographié en termes de nature lithologique, géomorphologiques et géotechniques. Quatre grandes unités ont été distinguées: Les marnes ou les marno-calcaires avec une superficie de 1406,98Km^2 (cette classe contient 59,05% des instabilités de terrain); les terrasses alluviales argilo-sableuses d'une superficie de 595,73Km^2 (cette classe contient 19,05% des instabilités de terrain); les grès numidiennes avec une superficie de 559,46Km^2 (cette classe contient 13,57%des instabilités de terrain) et les pélites grèseux d'une superficie de 203,03Km^2 (cette classe contient 8,33% des instabilités de terrain).
- ✓ **L'occupation des sols** : La région connaît un taux d'érosion assez important à cause des conditions naturelles et aussi à cause des activités anthropiques notamment la déforestation. Cinq classes distinctes sont différenciées: Les terrains agricoles avec une superficie de 1783,089Km^2 (avec 63% des mouvements de terrain); forêt et reboisements dont la surface est de 778,52Km^2 (avec 23% des instabilité de terrain); les matorrals et végétations naturelles qui s'étendent sur 133,68Km^2 de surface(avec 23% des instabilité de terrain); Habitations et terres nues de 46,57 Km^2 de surface (avec 2% des mouvements de terrain); et Lacs et marécages avec une superficie de 18,69 Km^2 (avec 1% des glissements de terrain).
- ✓ **La variable hydrogéologie** : la région est caractérisée par la dominance des faciès imperméables ou peu perméables (les marnes, les marno-calcaires, argiles, schistes ou flyschs) ; uneexception est à noterau niveaudes plaines et vallées alluviales et quelques rares petits bassins isolés vers l'Ouest de la région. Ceci fait que la région est traversée par un réseau hydrographique très dense. Ces caractéristiques hydrogéologiques font de la région l'une des zones les plus susceptibles aux instabilités de terrains. Cette variable a été considérée dans le modèleen termes de densité.
- ✓ **La fracturation** : ce paramètre a été intégré en considérant sa densité. Selon l'étudestatistique qui a été menée au cours de ce chapitre, l'occurrence des mouvements de pentes augmente au fur et à mesure que la densité de fracturation, nous remarquons aussi que cette occurrence est accentuée au niveau des fronts des nappes de charriage et à proximité des résurgences d'eau (sources d'eau). L'analyse azimutale des alignements qui ont été relevés au cours de cette étude, permet de déceler trois grandes familles qui, selon leur ordre d'importance, sont de directions : NW-SE à ENE -

WSW, NE-SW, N-S. Ces alignements représentent en majorité des failles à occurrence régionale, ainsi que des alignements à expression locale.

- ✓ **Le gradient de pente** : la distribution des mouvements de terrain par rapport aux classes des pentes montre que la plupart des instabilités de terrain se situent au niveau des classes dont l'angle varie entre 2,5° et 20°, surtout les coulées boueuses et les glissements de terrain au sens strict.Quant aux écroulements, ils sont plutôt distribués au niveau des pentes à pendage supérieur à 20°; ils sont liés à l'existence des massifs rocheux des grès numidiens.
- ✓ **Exposition des versants** : les versants orientés vers le Nord-Ouest, le Nord abritent les plus grandes fréquences des instabilités de terrain avec unemoyennede 36,52%.Enfait, cesversants sont lesplusexposés aux précipitations et aussi les moins ensoleillés. Les versants Est et Sud, et Sud-Ouest connaissent aussi des mouvements de pentes mais avec des fréquences moins importantes ; ceci peut être expliqué par la présence de pentes plus accentuées et aussi par la faible densité du couvert végétal au niveau de ces versants.
- ✓ **L'hypsométrie :** Les altitudes sont contrôlées par plusieurs processus géologiques et géomorphologiques, d'où l'importance de considérer ce facteur dans les modèles de prédiction des instabilités de terrain. L'analyse statistique de la corrélation des altitudes avec les mouvements de pente montre que ces derniers sont plus fréquents au niveau de la classe entre 150m et 550m avec un pourcentage de 48,13%.
- ✓ **Les précipitations**: ont été cartographiées par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles calculées sur les dernières 50 années. L'étude statistique montre que les instabilités de terrain sont trop abondantes dans la partie Est de la région d'étude, celle-ci reçoit de fortes averses lors de la période pluvieuse. Cette variable est considérée comme étant facteur déclencheur. Il a été considéré lors des approches experte et déterministe.
- ✓ **Le facteur sismicité** : la fréquence des événements sismiques au niveau de la région est faible. Ils sont liés aux activations de certaines failles surtout celles à occurrence régionale telle que la faille de Jebha au Sud de la région. Cette variable a été intégrée en tenant compte des isoprofondeurs de séismes et elle a été considérée comme facteur déclencheur.

Dans le **sixième chapitre** nous avons effectué une cartographie de l'aléa à échelle régionale 1/100.000ème (provinciale) pour l'ensemble de la province de Larache, en utilisant l'approche heuristique, par combinaison de cartes d'index. En revanche, les approches heuristiques sont des méthodes semi-quantitatives basée sur l'avisdu décideur quimène l'étude et l'analyse de l'aléa, ce qui fait que le résultat est influencé par la subjectivité du décideur dans l'attribution des poids des différents paramètres. Afin de limiter cette subjectivité, nous avons utilisé la méthode d'analyse AHP, dans un environnement SIG, qui est une application d'aide à la décision dans le cas où il y a plusieurs critères à considérer.

Les cartes résultantes montrent que les classes à susceptibilité forte et très forte représentent environ 39% de la surface totale étudiée, avec une densité des instabilités de terrain d'environ 42%.

Les résultats ont révélé que les instabilités de terrain dans la province de Larache sont fortement influencées par la lithologie, le degré de pente et l'occupation du sol. Les zones les plus susceptibles aux instabilités de terrain sont situées dans les parties appartenant à l'unité de Tanger et l'unité Loukkos. La carte réalisée servira comme document de base afin de planifier des mesures d'atténuation de risque appropriées et des stratégies de développement futures basées sur l'identification des zones sujettes de mouvement de pente dans la région.

Le **septième chapitre** a été consacré à la cartographie de la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain à méso-échelle sur deux feuilles de cartes (1/50 000), celle de Ksar El Kebir et celle de Souk El Quola, par approche bi-variée fondée sur le théorème de Bayes (Théorie de l'Evidence ou Weight of Evidence), en utilisant l'outil SDM sur Arcmap10.X. Cette approche nécessite une indépendance

conditionnelle entre les différents paramètres prédictifs, ceci a été vérifié par des tests d'indépendance conditionnelle CI.
Les aspects les plus chronophages de cette étudeont été: l'acquisition des données, la mise en forme de la base des données, la compréhension du logiciel, le développement d'une compréhension de la littérature antérieure, et la vérification de l'indépendance des paramètres.
Les résultats obtenus montrent que les aires à aléa élevé et trop élevé sont de 24% avec une densité des mouvements de pente de 75,84% au niveau de la région de Souk EL Quola; et au niveau de la région d'El Ksar EL Kebir, les zones à susceptibilité élevée et trop élevée sont de 19,65% avec une densité des mouvements de pente de 69,87%. Ces résultats ont été validés par la méthode experte en superposant la totalité des mouvements de terrain inventoriés sur les cartes obtenues, et aussi en utilisant la courbe du taux de succès(SRC) qui montre une efficacité de modèle de l'ordre de 68.2% et le test aveugle (BT) dont l'efficacité est de 67%, ce qui peut être considéré comme un succès.
Dans le **huitième chapitre**, nous avons appliqué uneapproche multivariée fondée sur les régressionslogistiques (WeightedLogisticRegression), pour la cartographie de la susceptibilité des versants aux mouvements gravitaires au niveau des deux feuilles des cartes au 1/50.000 (Ksar El Kebir et Souk El Quola). Par la suite, nous avons éffectué une comparaison est présentée pour évaluerles résultats et les performancesdes approches bi-variée et multi-variée.
La validité du modèle de prédiction a été vérifiée à l'aide de la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic). L'AUC (Area Under the Curve) qui constitue un indicateur synthétique de cette courbe, mesurant la surface située sous la courbe, a été estimé pour la région de Souk El quola à une valeur de 0,95, et pour la région d'El Ksar El Kebir une valeur AUC(RL)=0,92, ce qui signifie que notre modèle est parfait.
Les résultats obtenus montrent que les surfaces d'aléa élevé à trop élevé sont de 25,27% avec une densité des mouvements de pente de 57,89% au niveau de la région de Souk EL Quola; et au niveau de la région d'El Ksar EL Kebir, les zones à susceptibilité élevé et trop élevé sont de 49,71% avec une densité des mouvements de pente de 35,61%.
Le coefficient RL du paramètre lithologie montre que parmi les paramètres efficaces sur l'occurrence des glissements de terrain, le paramètre "lithologie" a un effet particulier au niveau des deux régions, nous remarquons que les coefficients de la lithologie au niveau des deux régions sont très proches, tandis que pour la région d'El Ksar El Kebir les paramètres les plus influents sont le réseau hydrographique et la pente du fait que la région est couverte par d'épaisses formations meubles à cause du caractère érosif de la région.
L'analyse de l'activité des mouvements gravitaires par rapport aux formations géologiques a montré que trois principaux types de faciès sont les plus sujets aux glissements de terrain: les formations marneuses, la formation argileuse et les dépôts alluviaux. Les MG les plus complexes se situent à proximité des accidents à caractère régional et aux fronts des nappes de charriage; le caractère sismique de ces discontinuités peut avoir une influence.
D'après la comparaison des résultats obtenus par les deux approches, WofE et RL, nous avons constaté que les résultats obtenus par le modèle de la théorie de l'évidence (WofE) sont plus cohérents et aussi sont en parfait accord avec la réalité terrain pour les deux cas étudiés (la région d'EL Ksar El Kebir et la région de Souk El Quola). Tandis que l'approche par régression logistique, appliquée au niveau de la région de Souk El Quola, a donné des résultats presque identiques à ceux obtenus par l'approche WofE, mais pour la région d'EL Ksar El Kebir, les résultats sont largement différents. Il semble que l'approche par régression logistique est mieux adaptée aux régions montagneuses plutôt que les zones les moins accidentées. Ainsi l'approche WofE semble plus logique et plus précise et applicableau niveau des régions montagneuses comme dans les zones moins accidentées, en comparaison avec l'approche par régression logistique (RL).

L'intérêt international croissant pour l'aléa instabilités de terrain révèle une conscience de leur importance socio-économique, suite à la pression anthropique qui ne cesse d'augmenter sur l'environnement parl'urbanisation, l'aménagement routier et des grandes œuvres ainsi que le développement des sociétés (Alexander, 1993 ; Finlay et Fell, 1997 ; Ferssad, 2013).

Sur ce constat, l'Organisation des Nations Unies a lancé la Décennie Internationale pour la Prévention des Catastrophes Naturelles pour la période 1990-1999. Les objectifs de la création de cette organisation étaient de sensibiliser les populations et les autorités à la prévention des risques naturels par l'éducation et la formation, d'intensifierles systèmes d'alerte et les connaissanceset d'encourager les transferts desavoir-faire vers les pays en développement (Ferssad, 2013). En même temps, la Commission Européenne identifiait, en 1991, les risques hydro-météorologiques (inondations, mouvementsde terrains, avalanches) comme un axe de recherche majeur des programmes-cadre, et l'UNESCO lançait le programme "*Natural HazardProgram*"pour la période 1990-1995. Au cours des deux dernières décennies, les pays sud méditerranéens ont aussi exprimé un grand intérêt à cet égard. Notre travail vient dans le cadre d'un ensemble de travaux de recherches qui ont été développés et qui traitent la problématique des instabilités de terrain dans les régions du Rif. L'impact de telle étude touche plusieurs secteurs sur le plan économique, sociétal, et scientifique :

- **Impact sur l'aménagement et l'urbanisme :**

Les différentes cartes d'aléa réalisées dans le cadre de ce travail de recherche constituent un bon moyen de sensibilisation des autorités responsables de l'aménagement territorial, ainsi que l'ensemble des populations concernées sur les zones susceptibles de mouvements gravitaires. Ces documents serviront comme outils de base trop précieux dans tous les travaux éventuels d'aménagement et lors des prises de décisions dans la planification de construction des grandesœuvres telles qu'une autoroute ou tracés routiers, barrages, sites touristiques ou autres, ce qui permettra d'éviter ou d'atténuer (en ca échéant) les impacts socio-économiques graves, et aussi de diminuer le coût de réhabilitation en cas du déclenchement des mouvements de pentes.

- **Impact sur les terrains agricoles et la foresterie :**

Les instabilités des versants causent d'importantes modifications du terrain et du paysage avec l'apparition de grandes surfaces d'érosion, entrainant une perte énorme du sol. Celui-ci devient non productif. Tout de même, les déplacements des surfaces agricoles suite à un glissement de terrain provoquent des conflits entre les agriculteurs du voisinage.

L'existence des cartes de susceptibilité peut être d'une utilité majeure dans le cas où les agriculteurs peuvent orienter leur activité agricole vers l'implantation des arbres tels que les oliviers ou des arbres fruitiers comme les Figuiers ou autres, dans le but de stabiliser les sols s'ils sont trop susceptibles, où encore travailler la terre en banquettes au niveau des zones à susceptibilité moyenne ou élevée.

Aujourd'hui, plusieurs actions de reboisements sont entreprises par le Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification sur tout le territoire national, notamment dans la région de Larache. Ces opérations de reboisement visent la protection des versants contre les mouvements gravitaires et l'érosion. Le reboisement se fait en général avec l'eucalyptus, le chêne liège et le pin d'Alep, en raison de leur adaptation avec les conditions bioclimatiques de la région, leur croissance assez rapide, en plus de leur importante capacité de fixation des sols instables par leurs racines robustes.Nos travaux de recherche serviront donc à orienter l'opération du reboisement.

Recommandations et perspectives:

Ce présent travail de recherche constitue une initiative d'investiguer un volet d'étude des mouvements de versants très peu abordé. La plupart des études antérieures au niveau de la région ont été orientées vers la cartographie des instabilités actives ou anciennes en termes de typologie. Les approches cartographiques préventives au niveau de la région sont pratiquement inexistantes, ainsi que les bases de données concernant les facteurs prédictifs nécessaires à toute étude probabiliste sont ou bien insuffisantes ou totalement absentes. Un grand effort a été fourni afin de mener une nouvelle perspective dans le domaine du zonage d'aléa.

Malgré ces efforts, de nombreuses recommandations sont souhaitables, on note par exemple :

- Appliquer ces approches sur d'autres régions et au niveau de l'ensemble du territoire Marocain, et rassembler une base de données événementielle dans le but de constituer une banque de données nationales sur la susceptibilité des versants aux instabilités de terrain "Moroccan Landslide Database", ainsi que des banques de données multi- paramètres, multi échelles. Ces informations peuvent être mises à la disposition du public sur un site Internet approprié (édition de documents et cartes thématiques, intégration fluide des mises à jour ultérieures).
- Le volet de recherche spatio-temporelle n'étant pas développé dans notre travail peut être entamé prochainement. Ceci nécessite plus d'investigation et du suivi dans une dimension temporelle en relation avec la cinétique des mouvements gravitaires, les déplacements des masses glissées... ; ce qui implique d'autres facteurs tel que la circulation des eaux dans le sol, les variations des caractéristiques géotechniques des sols, les changements des conditions climatiques, l'effet des cours d'eau et la force des sapements de berges etc.... Ces recherches doivent être engagées sur la datation et l'évaluation des conditions de déclenchement des instabilités anciennes. Ce genre de recherches nécessite l'implantation des instruments de mesures et de surveillance au niveau des sites susceptibles aux mouvements de terrain. Des recherches de ce genre sont quasiment absentes au Maroc. Ceci est dû au manque d'informations sur les processus impliqués dans l'évolution des versants, expliqué sûrement par l'absence des mesures adéquates, et du suivi régulier sur de longues durées.

  L'existence de tels recherches est indispensable pour les futurs grands projets d'aménagement territorial surtout si on prend en considération les changements climatiques globaux.Plusieurs chantiers peuvent être développés dans ce cadre, nous citons à titre d'exemple :
  - ✓ Des recherches sur les rythmes et volumes de production de sédiments au niveau des versants instables, surtout ceux qui sont couverts par des bad-lands et souvent trop ravinés.
  - ✓ La compréhension des liens entre les changements climatiques et l'instabilité des versants, ainsi on peut prédire le déclenchement des mouvements de terrain de différents typesdans des conditions variées.
  - ✓ Mise en œuvre d'un système de suivi, de détection et de prédiction précoce, afin de minimiser le risque.
- Nous souhaitons dans l'avenir proche orienter nos travaux de recherche vers l'aléa. De ce fait, il faut proposer des modèles de cartographie de l'aléa basés sur des règles mathématiques objectives, combinant la cartographie de la susceptibilité avec une analyse de la fréquence et de la magnitude des instabilités de terrain et une valorisation des facteurs de déclenchement appropriés à chaque type de mouvements gravitaire.
- Une des perspectives de ce travail de thèse réside dans le développement des recherches sur les approches de prédiction du risque lié aux mouvements de terrain, en introduisant le volet vulnérabilité socio-économique. Ces approches pourront être qualitatives ou quantitatives (Leroi, 1996), et à différentes échelles. Cela dépendra du type d'instabilité, de sa complexité, du cumul d'informations acquises sur le phénomène, ainsi que des outils de travail et leur disponibilité sans oublier le degré de leur d'efficacité.

Références bibliographique

A

Abdelkhaliki.L, (1997); "Evolution tectono-sédimentaire des dépôts gravitaires dans le Prérif interne et l'unité du Habt (Rif externe occidental, Maroc) : mise en place dans les bassins néogènes d'avant-fosse". *Thèse 3ème cycle ; Univ. Md V, Rabat* ; 176 p.

Abdelouafi.A, (2007); "Approche multisource pour l'élaboration d'un outil d'aide à la décision dans le cadre du développement durable du Maroc oriental. (Géologie, télédétection, géophysique, hydrogéologique, couvert végétal et substances utiles)". *Thèse de doctorat d'état, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat*.283p.

Agterberg.F-P and Bonham-Carter.G-F, (1999);"Logistic regression and weights of evidence in mineral exploration". *Proceedings APCOM Symposium.*

Agterberg.F-P and Bonham-Carter.G-F,and Wright.D-F, (1990);"Statistical pattern integration for mineral exploration". In *Computer Applications in Resource Exploration and Assessment for Minerals and Petroleum (eds G.Gaal and D.F.Merriam)*. Pergamon, Oxford.

Agterberg.F-P et Cheng, (2002); "Conditional Independence Test for Weights-of-Evidence Modeling". *Natural Resources Research 11*, 249–255. https://doi.org/10.1023/A:1021193827501.

Agterberg.F-P, Bonham-Carter.G-F, Cheng.Q, Wright.D-F, (1993);"Weights of evidence modelling and weighted logistic regression for mineral potential mapping". In: *Davis JC, Herzfeld UC (eds) Computer in geology*, 25 years of progress. Oxford University Press, Oxford, pp 13–32

Aït Brahim., Chotin.P, Hinajc.S, Abdelouafia.A, El Adraouia, Nakcha.C, Dhont.D, Charroud.M, Sossey Alaoui.F, Amrhar.M, Bouaza.A, Tabyaoui.H, Chaouni.A (2002); "Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present". *Tectonophysics 357*, 187–205.

Aït brahim.L et Chotin.P, (1989); "Genèse et déformation des bassins néogènes du Rif central (Maroc) au cours du rapprochement Europe-Afrique", *Geodinamica Acta 3*, 295-304.

Aït Brahim.L, (1991);"Tectonique cassante récente au Nord du Maroc. Contribution à l'étude du risque sismotectonique", *Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Rabat,* 223 p, 1991.

Aït Brahim.L, Bousta.M, Jemmah.I-A, El Hamdouni.I, ElMahsani.A, Abdelouafi.A,. Sossey alaoui.F. and Lallout.I, (2018); "Landslide susceptibility mapping using AHP method and GIS in thepeninsula of Tangier (Rif-northern morocco)", *MATEC Web of Conferences 149, 02084* (2018), CMSS-2017. https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902084

Aït Brahim.L, Chotin.P, Tadili.B., Ramdani.M, (1990); "Failles actives dans le Rif central et oriental". *C. R. Acad. Sci. Paris 310*, 1123–1129.

Aït Brahim.L, et Sossey Alaoui.F, (2002);"Utilisation de la télédétection pour l'analyse de la fracturation du domaine interne rifain (Maroc) : relation avec la répartition des sources". *Revue canadienne : Télédétection n22*, pp 123-135 (2002).

Aït Brahim.L, Jemmah.A-I, Bousta.M, El Hamdouni.I, Abdelouafi.A, El Mahsani.A, Lallout.I Labraimi.A, et Merouni.F-Z, (2018);"Spatial correlation between the predictor variables and the weighting values calculated during the mapping of the environmental factors of mass movements in the Beni Idder region (northern Rif)", MATEC Web of Conferences 149(2):02074, DOI: 10.1051/matecconf/201814902074, LicenseCC BY 4.0.

Aït Brahim.L, Mansour.M, Sossey Alaoui.F et El Hamdouni.I, (2003);"Rôle de la fracturation dans la désagrégation mécanique des calcaires et la mise en mouvement de la coulée de pierres d'Amtrasse (Rif, Maroc)". *Edition ISBN 9954-8407-0-2 (L'implication de la géotechnique dans le développement des infrastructures en Afrique)*, pp 69-79.

Aït Brahim.L, Tadili.B, Nakhcha.C, Mouayn.I, Ramdani.M, Limouri.M, El Qadi.A, Soussey Alaoui.F, et Benhalima.M, (2004);"Using active faults and seismicity for the strong motion modeling in the Eastern Rif (Northen Morocco)". Pure appl. Geophys. 161 (2004) 1081 1091, 0033-4553/04/061081-11, DOI 10.1007/s00024-003-2487-9.

Aït Brahim.L, and El Hamdouni.I, (2018); "the application of logistic regression for mapping the susceptibility of versants to landslides in the region of el quola, southern rif" International Journal *of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume* , Issue , Jul , pp. -, Article Available online at http://www. ISSN Print: 0976-6308 and ISSN Online: 0976-6316.

Akcali.E, Arman.H, Firat.S, Saltabas. L, Gunduz.Z, (2010), "rainfall thresholds for the initiation of landslides in trabzon province of turkey", *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS) Vol.2, Issue 4*, 14-26.

Aleotti.P, (2004);"A warning system for rainfall-induced shallow failures". *Eng Geol 73*:247–265. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.01.007.

Aleotti.P, and Chowdhury.R,(1999);"Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives". *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 58(1), 21-44.

Alexander.D, (1993);"Natural Disasters", *University College Press, London*, 632p.

Allison.P.D, (2001);"Logistic regression using SAS System: Theory and application", *Wiley Interscience*, New York.

Ammar.A and El Moumni.B, (2014); "Inversión tectónica reciente de la zona central de Alborán". *In Una Alboran Sea. Marine Geology*, 378

Anbalagan.R et Singh.B, (1996); "Landslide hazard and risk assessment mapping of mountainous terrains, a case study from Kumaun Himalaya, India"; *in Engineering Geology, volume 43, Issue 4*, P 237-246. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00033-6.

Andrieux.J, Frizon de Lamotte.D, Braud.J-A, (1989);"Structural scheme for the Ouestern Mediterranean area in Jurassic and Early Cretaceous times", *Geodinamica Acta 3,* 5±15.

Antoine.P,(1977);"Reflexions sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours", *Bulletin Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2) III*, 1/2, 9–20.

Antoine.P, Giraud.A,(1992);"Typologie des mouvements de versant dans un contexte opérationnel". *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, 51*, 57-62.

Ardizzone.F, Cardinali.M, Carrara.A, Guzzetti.F, Reichenbach.P, (2002); "Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. Natural Hazards and Earth System Science", *Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2 (1/2)*, pp.3-14. ffhal-00301543.

Arnaud.F, (2012); "Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne)"; *Thèse doctorat de l'Université Lumière Lyon 2*.

Astrade.L, Bravard.J-P, Landon.N, (1998); "Mouvements de masse et dynamique d'un géosystème alpestre : étude dendrogeomorphologique de deux sites de la de la vallée de Boulc (Diois, France)". *Géographie Physique et Quaternaire, 52 (2),* 153-165.

Atkinson.P.M. & Massari.R, (2011); "Autologistic modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy"; *Geomorphology 130(1-2)*:55-6.

Atkinson.P-M, Massari.R, (1998);"Generalized linear modelling of landslide susceptibility in the central Apennines, Italy". *Computers & Geosciences 24,* 373 – 385. https://doi.org/10.1016/S0098-3004(97)00117-9.

Avenard.J-M, (1965);"La cartographie de l'érosion actuelle dans le bassin du Sebou (Maroc)". *INRA, 29 p, multigr*, Rabat.http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-09/28496.

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

Azzouz.O, El fellah.B, & Chalouan.A, (2002); "Processus de glissement dans le Massif de Bokoya (Rif interne, Maroc) : exemple de Cala Bonita"; *Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2002,* n° 24, 33-40.

B

Baeza.C, and Corominas.J, (2001);"Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques". *Earth Surface Processes and Landforms, 26,* pp. 1251–1263.

Bahda.F,(1997); "Etude du comportement du sable à l'appareil triaxial : expérience et modélisation". *Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Français. fftel-00523153f

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

Baldelli.P, Aleotti.P, Polloni.G, (1996); "Landslide-susceptibility numerical mapping at the Messina Straits crossing site, Italy" *Proc. 7th Int. Symp. on landslides, Trondheim, Norway*.

Baum.R, Godt.J, and Savage.W,(2010); "Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration", J. *Geophys. Res., 115,* F03013, doi:10.1029/2009JF001321.

Baum.R, Savage.W, and Godt.J,(2008);"TRIGRS a fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slopestability analysis", *version 2.0, US Geological Survey* Open-file; Report, Vol. 1159, 75 pp.

Baum.R-L., McKenna.J-P, Godt. J-W, Harp.E-L, McMullen.S-R, (2005);"Hydrologic monitoring of landslide-prone coastal bluffs near Edmonds and Everett, Washington". *U.S. Geological Survey* Open-File Report, 42p.

Bayes.T, (1763); "An essay towards solving a problem in the doctrine of chances". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 53*, 370-418.

Ben Hassen.M, Deffontaines.B,(2014); "Semi-automated extraction of drainage anomalies. Application to the center of the southern Atlas of Tunisia"; *Géomorphologie relief processus environnement (1)*:3-14.

Benmakhlouf.M., Galindo-Zaldívar.J, Chalouan.A, Sanz de Galdeano.C, Ahmamou.M, López-Garrido.A.C., (2012); "Inversion of transfer faults: the Jebha-Chrafate fault (Rif, Morocco)". *J. African Earth Sci.* 73-74, 33–43.

Bensalem.H, Aadjour.M, El Hadi.H, Saber.N, El Ouazzani.A, Mouttaqi.A, (2014); "Evaluation de la qualité industrielle des argiles fibreuses de Bled Rmel, bassin du Gharb, Maroc". *Eur. Sci. J. 10(18)*,57–7881 (2014)

Berger.F, et al., (2000);"La gestion du milieu naturel dans une optique de lutte contre les risques naturels", in *IDNDR (Ed.), Actes de la Conférence de Paris sur la prévention des catastrophes naturelles*, gestion des territoires et développement durable du 17 au 19 juin 1999.

Berger.F, Rey.F,(2001);"Mountain protection forests against natural hazards and risks: from research to management", *Actes de la conférence internationale "Forest research: a challenge for an integrated European approach"* ; Thessaloniki (Greece), 27 août-1er septembre 2001, volume I, p. 275-280.

Bettian.N, Birgit.T, (2007);"Landslide susceptibility assessment using "weights-of-evidence" applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany)". *Geomorphology 86*, 12-24.

Beven et Kirkby, (1979); "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology". *Hydrol. Sci. Bull., 24(1)*, 43-69.

Bievre.G, Jongmans.D, Winiarski.T, Zumbo.V, (2012); "Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trièves area, French Alps)", in *Hydrological Processes*; DOI: 10.1002/hyp.7986 Source: OAI; https://www.researchgate.net/publication/47280230

Bombard.J-P, (1968);"Une approche des problèmes posés par l'étude des mouvements de terrain. Essai méthodologique". *Thèse, Grenoble*, 272 p.

Bonham-Carter.G-F, (1994); "Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS. Computer methods", in *the geosciences; vol. 13. Pergamon, Elsevier Science, New York*, 398pp.

Bonham-Carter.G-F, Agterberg.F-P, and Wright.D-F, (1988);"Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia". *Photogrammetry and Remote Sensing 54*, 1585-1592.

Bonham-Carter.G-F, Agterberg.F-P, and Wright.D-F, (1989);"Weights of evidence modelling: A new approach to mapping mineral potential". *Statistical Applications in Earth Sciences 89(9)*, 171-183.

Bonham-Carter.G-F, Agterberg.F-P, Wright.D-F,(1990);"Statistical pattern integration for mineral exploration". In: *Gaal, G., Merriam, D.F.* (Eds.), Computer Applications in Resource Estimation: Prediction and Assessment for Metals and Petroleum. Pergamon Press, Oxford, 1–21.

Borga.M, Fontana.G-D, Gregoretti.C, and Marchi.L, (2002) ; "Assessment of shallow landsliding by using a physically based model of hillslope stability"; *Hydrol. Process. 16, 2833–2851, Published online 19 June 2002 in Wiley InterScience* (www.interscience.wiley.com). DOI: 10.1002/hyp.1074

Boroumandi.M, Khamehchiyan.M, Reza Nikudel.M, (2014); "Using of Analytic Hierarchy Process for Landslide Hazard Zonation in Zanjan Province, Iran, September 2014, In book: *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2Chapter: Part XIIIPublisher: Springer International PublishingEditors: Giorgio Lollino, Daniele Giordan, Rafig Azzam*, DOI: 10.1007/978-3-319-09057-3_165

Bourdeau.C, (2018); "Pourquoi les séismes déclenchent-ils des glissements de terrain catastrophiques?", dans *l'encyclopédie de l'envirenement, IDEX Université Grenoble Alpe*. www.univ-grenoble-alpes.fr.

Bouramtane.T and al., (2021); "Multivariate Analysis and Machine Learning Approach forMapping the Variability and Vulnerability of Urban Flooding:The Case of Tangier City, Morocco". *Hydrology 2021, 8, 182. https://doi.org/10.3390/hydrology8040182*

Braam.R-R, Weiss.E.E-J, Burrough.A, (1987); "Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology ", CATENA Braunschweig, vol. 14, p.573-584.

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

Brand.E-W, (1988); "Special lecture: landslide risk assessment in Hong Kong". *Proc 5th Int Symp Landslides, Lausanne, 2*: 1059–1074.

Brardinoni.F, Slaymaker.O, A Hassan.M, (2003); "Landslide inventory in a rugged forested watershed: A comparison between air-photo and field survey data", *Geomorphology 54(3)*:179-196, DOI: 10.1016/S0169-555X(02)00355-0.

C

Caine.N, (1980);"The rainfall intensity duration control of shallow landslides and debris flows". *Geografiska Annaler, 62,* 1-2, 23-27

Calvello.M, d'Orsi.R-N, Piciullo.L, Paes.N, Magalhaes.M, and Lacerda.W-A, (2013); "The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: analysis of performance for the years 2010–2013", *Int. J. Disast. Risk Reduc., 12,* 3–15.

Cannon.S-H, Gartner.J-E, (2005);"Wildfire-related debris flow from a hazards perspective". In *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, pages 363–385. Springer.

Canuti.P, Casagli.N, Ermini.L, Farina.P, (2003); "Landslide activity as a geoindicator in Italy: Significance and new perspectives from remote sensing", *Environmental Geology 45(7)*:907-909, Doi: 10.1007/s00254-003-0952-5.

Cardinali.M, Galli.M, Guzzetti.F, Ardizzone.F, Reichenbach.P, Bartoccini.P, (2006);"Rainfall induced landslides in December 2004 in South-Ouestern Umbria, Central Italy". *Nat Hazard Earth Sys Sci 6*: 237–260.

Carranza.E.J-M, (2009);"Geochemical Anomaly and Mineral Prospectivity Mapping in GIS". *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry; Vol 11*. Elsevier, UK, 351.

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

Carrara.A, Cardinali.M, Guzzetti.V, Reichenbach.P, (1999); "Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard". In *Carrara.A and Guzetti.F (Eds), Technique and tools for assessing and mapping natural hazard, Vatural Hazards, 20*, 117-135.

Carrara.A, Catalano.E, Sorriso-Valvo.M, Reali.C, and Orso.I, (1978);"Digital terrain analysis for land evaluation". *Geologia Applicata ed Idrogeologia, 13*: 69-117p.

Casadei.M, Dietrich.W-E, Miller.N-L, (2003); "Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide in soil-mantled landscapes", *Earth Surface Processes and Landforms 28(9)*:925 - 950; DOI: 10.1002/esp.470.

Castellanos.E, Van Ouesten.C-J, (2008); "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis; a case study from San Antonio del Sur, Guant'anamo, Cuba". *Geomorphology 94* (3–4), 453–466.

Castellanos.E-A, et Van Ouesten.C-J, (2007); "Generation of a landslide risk index map for Cubaspatial multi-criteria evaluation", December 2007, *Landslides 4*(4):311-325, DOI: 10.1007/s10346-007-0087-y, SourceOAI.

Chabrillat.S, Goetz.A.F-H, Krosley.L, and Olsen.H-W, (2002); "Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution", *Remote Sensing of Environment,* Volume 82, Issues 2-3, Pages 431-445.

Chacon.J, Irigaray.C, Del Castillo.T.F, El Hamdouni.R, (2006); "Engineering geology maps: Landslides and geographical information systems", *Bulletin of Engineering Geology and the*

Environment 65(4):341-411, DOI: 10.1007/s10064-006-0064-z, Project: RNM 121 Group of Environmental Researches: Geological Hazards and Terrain Engineering.

Chalouan.A, Saji.R, Michard.A, Bally.A-W, (1997); "Neogene tectonic evolution of the south-Ouestern Alboran Basin as inferred from seismic data off Morocco". *AAPG Bulletin 81,* 1161–1184.

Champtier.G-R, (1987);"La cartographie des mouvements de terrain. Des cartes ZERMOS aux PER". *Bulletin de liaison des labo des ponts et chaussées*, 150/151, 9-19p.

Chand.D, (2008);"Landslide monitoring in space and time using optical satellite imagery and DEM derived parameters: case study from Garhwal Himalaya, Uttarakhand, India". *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands and Indian Institute of Remote Sensing, National Remote Sensing Agency (NRSA), Department of Space, Dehradun, India.*

Chang.K, Chiang.S, (2009);"An integrated model for predicting rainfall induced Landslides". *Geophys J Roy Astron Soc 105*:366–373.

Chang.K, Chiang.S, Hsu.M, (2007);"Modelling typhoon- and earthquake-induced landslide in a mountainous watershed using logistic regression". *Geophys J.Roy Astron Soc 89*:335–347

Chaouni.A, (1999);"Apport des données Landsat M.S.S., Radar ERS1-SAR ; Modèles Numériques de Terrain et morphométrie structurale de Terrain à la compréhension de la cinématique des principales failles de la Péninsule de Tanger depuis l'Oligocène supérieur à l'actuel". *Thèse de doctorat, Université Mohamed V, Rabat,* 284 p.

Chau.K-T, Sze.Y-L, Chan.L.C-P, (2004); "Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS", *Computers & Geosciences 30* (4): 429-443 F, DOI: 10.1016/j.cageo.2003.08.013

Che.X, (2005); "Extraction et reconstruction du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain". *Thèse de doctorat en informatique, université Aix-Marseille 2,* 129 p.

Chen.Z et Wang.J, (2007); "Landslide hazard mapping using logistic regression model in Mackenzie Valley, Canada", *Natural Hazards 42(1)*:75-89, DOI: 10.1007/s11069-006-9061-6.

Cherkaoui.T-E, (2012); "Seismicity and Seismic Hazard in Morocco 1901-2010", *in Bulletin de l'Institut Scientifique, Project 1. Recent tectonics in Morocco and associated natural hazards* (earthquakes and tsunamis).

Chleborad.A-F,(2003); "Preliminary Evaluation of a Precipitation Threshold for Anticipating the Occurrence of Landslides in the Seattle, Washington, Area", *US Geological Survey Open-File Report* 03-463

Chotin.P, Ait Brahim.L, Deffontaines.B, Rudant.J-P, Chaouni.A, (1995);"Nouvelles données ERS1-SAR sur la reconnaissance du réseau de failles dans la péninsule de Tanger Maroc", *Télédétection- photo interprétation, n°1995/2,* p. p129-152, Editions ESKA,France (1995).

Chung.C.J-F, , (2006); "Using likelihood ratio functions for modeling the conditional probability of occurrence of future landslides for risk assessment", *Computers & Geosciences, Volume 32*, Issue 8, October 2006, Pages 1052-1068. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2006.02.003.

Chung.C-F, and Fabbri.A-G, (1999);"Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping";*Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 65-12*, 1389–1399.

Chung.C-F, and Fabbri.A-G, (2002);"Modeling the conditional probability of the occurrence of future landslides in a study area characterized by spatial data", *Proceedings of 2002 ISPRS (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) Meeting, Ottawa, Canada, July*, 2002, in press.

Chung.C-F, and Fabbri.A-G, (2003); "Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping", *Natural Hazards 30(3)*:451-472, DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.

Coe.J-A, Michael.J-A, Crovelli.R-A., et Savage.W-Z, (2000);"Preliminary map showing landslide densities, mean recurrence intervals, and exceedance probabilities as determined from historic records, صضنقSeattle, Washington. U.S";*Geological Survey Open-File Report*, 00-303.

Compina.M-B, (2005); "Le rôle des facteurs géologiques et mécaniques dans le déclenchement des instabilités gravitaires : exemple de deux glissements de terrain des Pyrénées Atlantiques (Vallée d'Ossau et Vallée d'Aspe)". *Planète et Univers [physics]. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I. Français.* fftel-00324072f.

Corominas.J, Copons.R, Vilaplana.J-M, Altimir.J, Amigo´.J, (2003); "Integrated landslide susceptibility analysis and hazard assessment in the principality of Andorra",*Nat Hazards 30:*421–435

Corominas.J, van Ouesten.C, Frattini.P, et al.,(2014); "Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk". **Bull Eng Geol Environ 73**, 209–263. https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8.

Costain.J-K, Bollinger.G-A, Speer.J-A, (1987);"Hydroseismicity: a hypothesis for the roleof water in the generation of intraplate seismicity". *Seismological Reserach Letters58,* 41–64

Creighton.R, Doyle.A and al., (2006); "Landslides in Ireland", Publisher: *Geological Survey of Ireland, Editor: Ronnie Creighton, ISBN*: 1899702539.

Crosta.G et Frattini.P, (2008); "Rainfall-induced landslides and debris flows Hydrological Processes": *An International Journal* 22 (4), 473-477.

Crosta.G, Dal Negro.P and Frattini.P, (2003); "Natural Hazards and Earth System Sciences", ©*European Geosciences Union*(2003) 3: 31–42.

Crovelli.R-A, (2000); "Probability models for estimation of number and costs of landslides". *U.S. Geological Survey Open File Report* 00-249, 23 p.http://greenwood.cr.usgs.gov/pub/open-filereports/ofr-00–0249/

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

Cruden.D, and Fell.R,(Editors), (1997); "Landslide risk assessment" - *Proceedings of the Workshop on Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21, February 1997. A.A. Balkema, Rotterdam & Brookfield,* 384 Pages.

Curran.P-J, (2001); "Imaging spectrometry for ecological applications", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Volume 3,* Issue 4, 2001, Pages 305-312.

D

D'Acremont.E, Gutscher.M-A, Rabaute.A, Mercier de Lépinay.B, Lafosse.M, Poort.J, Ammar.A, Tahayt.A, Le Roy.P, Smit.J, (2014); "High-resolution imagery of active faulting offshore Al Hoceima, Northern Morocco". *Tectonophysics*.

D'Ercole.R, Metzger.P, (2000); "La vulnérabilité de Quito (Équateur) face à l'activité du Guagua Pichincha. Les premières leçons d'une crise volcanique durable"; *Cahiers Savoisiens de Géographie, no 1*, p. 39-52.

Dai.F-C, et Lee.C-F, (2002); "Landslides on Natural Terrain", *Mountain Research and Development, 22(1)*:40-47 . https://doi.org/10.1659/0276-4741(2002)022[0040:LONT]2.0.CO;2.

Dai.F-C, Lee.C-F, et Xu.Z-W,(2001);"Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong". *Environmental Geology, 40*:3 381-391p.

Das.I, Sahoo.S, Van Ouesten.C-J, Stein.A, et 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 Himalayas (India)". *Geomorphology 114* (2010) 627±637p.

Dauphiné.A, (2001); "Risques et Catastrophes. Observer – Spa-tialiser – Comprendre – Gérer". *Paris: Armand Colin.*

De Graff.J-V, Canuti.P, (1988);"Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices",*Bulletin of the Association of Engineering Geology 38*:61–71.

De La Ville.N, Diaz.A-C, Ramirez.D, (2002); "Remote sensing and GIS technologies as tools to support sustainable management of areas devastated by landslides". *Environ Dev Sustainability 4(2)*:221–229.

Deffontaines.B, (1990); "Développement d'une méthodologie morpho-néotectonique et morphostructurale; Analyse des surfaces enveloppes, du réseau hydrographique et des modèles numériques de terrain: Applications au Nord-Est de la France". *Thèse de Doctorat de troisième, cycle. Université Paris VI*, 230p.

Deffontaines.B, Ait Brahim.L, Chotin.P, et Rosanov.M,(1992); "Investigation of active faults in Morocco using morphonetic methods and pattern analysis". *Sonderdruck an Geologische Rundschau, Band 81, Helt 1, Stuttgart,* pp. 119-210 Allemagne

Désodt.C; Launa.J; Molinarol.H-H, (2017); "Les glissements de terrain, modélisation et prévision", *Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay.*

Devkota.K, Regmi.A, Pourghasemi.H, Yoshida.K, Pradhan.B, Ryu.I, Dhital.M, and Althuwaynee.O, (2013);"Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya." *Nat. Hazards, Vol. 65, No. 1,* pp. 135-165.

Dewitte.O, (2006);"Cinématique des glissements de terrain et prédiction de leur réactivation: approche probabiliste dans la région d'Oudenaarde". *Thèse de doctorat de l'Université de Liège.* 221p.

Dietrich.W, Reiss.E-R, Hsu.M-L, Montgomery.D-R, (1995); "A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data". *Hydrological processes, 9* (3-4): 383-400. doi: https://doi.org/10.1002/hyp.3360090311.

Dietrich.W-E, and Montgomery.D-R,(1998);"Hillslopes",*channels and landscape scale. G. Sposito, editor, Scale dependence and scale invariance in hydrology, Cambridge University Press, Cambridge, England*.

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

Dikau.R, Brunsden.D, Schrott.L, Ibsen.M-L, (1996);"Landslides Recognition, Identification, Movement and Causes";*John Wiley & Sons, New York,* 251 p.

Domej.G, (2018); "Seismically induced effects and slope stability in urbanized zones by numerical modeling". *Doctoral Thesis, Université Gustave Eiffel (ex: Universté Paris-Est & IFSSTAR),* 266 p

Domej.G, Bourdeau.C, Lenti.L, Martino.S, Semblat.J-F, (2019); "Assessing seismically induced slope deformation of the Diezma Landslide via limit equilibrium analysis and numerical modeling". In: *Silvestri F., Moraci N. (Eds.). Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions - Proceedings of the 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering (ICEGE 2019), CRC Press, London,* p. 2166-2173.

Donati.L et Turrini.M-C, (2002); "An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: Application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy)", *Engineering Geology 63(3-4)*:277-289, DOI: 10.1016/S0013-7952(01)00087-4.

Duan.J, Grant.G-E, (2000); "Shallow landslide delineation for steep forest watershed based on topographic attributes and probability analysis". In: *J.P. Wilson and J.C. Gallant (Eds.), Terrayn analysis: principles and applications. Wiley, New York, NY, USA,* pp 311-329.

Dubayah.R, and Rich.P-M, (1995); "Topographic solar radiation models for GIS". *International Journal of Geographic Information Systems 9*: 405–419.

Dubois-Maury.J, (2001);"Les risques naturels : quelles réponses ?";*Dossiers d'actualité mondiale Problèmes politiques et sociaux, n°863, 21 septembre, La Documentation Française, Paris,* 88p.

Duman.T-Y, Can.T, Gokceoglu.C, Nefeslioglu.H-A, (2005); "Landslide susceptibility mapping of Cekmece area (Istanbul, Turkey) by conditional probability", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2(1),* DOI: 10.5194/hessd-2-155-2005, SourceOAIn, LicenseCC BY 4.0.

Duman.T-Y, Can.T, Gokceoglu.C, Sonmez.H, (2006); "Application of logistic regression for landslide susceptibility zoning of Cekmece Area, Istanbul, Turkey". *Environmental Geology 51(2)*:241-256, DOI: 10.1007/s00254-006-0322-1

Dunning.S-A, Mitchell.W-A, Rosser.N-J, & Petley.D-N, (2007);"The Hattian Bala rock avalanche and associated landslides triggered bythe Kashmir Earthquake of 8 October 2005". *Engineering Geology, 93(3–4):* 130–144, doi:10.1016/j.enggeo.2007.07.003.

Durand-Delga M., (1980); "Considérations sur les flyschs du Crétacé inférieur dans les chaînes alpines d'Europe". Bull. Soc. géol. Fr., 7, XXII, 15-30.

Durand-Delga.M, (1972); "La courbure de Gibraltar, extrémité occidentale des chaînes alpines, unit l'Europe et l'Afrique". *Eclogae geol. Helv., 65,* 267-278.

Durand-Delga.M, Lespinasse.P, (1965); "Le Miocène des Beni Issef (Rif septentrional) et ses rapports avec la nappe Numidienne". *Comptes Rendus Sommet Société Géologique Fr. 7,* 321–323.

E

El Gharbaoui.A, (1980); "La terre et l'Homme dans la péninsule tingitane. Etude sur l'Homme et le milieu dans le Rif occidental". *Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie et Géographie Physique, Rabat, n° 15,* 439 p.

El Hamdouni.I, Ait Brahim.L, Abdelouafi.A,(2018); "Importance of conditional independence in choosing the best combination of predictive factors for mapping the susceptibility of the landslide in the Ksar El Kebir, northern region_Morocco", *International Journal of New Technologies in Science and Engineering, Vol. 5 , Issue . 4,* 2018 , ISSN 2349-0780.

El Hamdouni.I, Aitbrahim.L, (2018); "Extraction of the predisposition parameters for mapping the susceptibility of slides lands, in the region of EL Quola, province of Larache (Nothern Rif)", *MATEC Web of Conferences 149, 02045, CMSS-2017.*https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902045

EL Hamdouni.I., (1999); "Apports de la télédétection et de la géotechnique à l'étude et la cartographie des glissements de terrains dans la région de Larache". *DESA, Faculté des Sciences de Rabat,* 160 p.

El Hatimi.N, (1982);"Contribution à l'étude géologique et structurale de la région d'Assifane (RIF, MAROC)". *Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat.* 133p.

El Kadiri.K, de Galdeano.C-S, Pedrera.A, Chalouan.A, Galindo-Zaldívar.J, Julià.R, Akil.M, Hlila.R, Ahmamou.M, (2010); "Eustatic and tectonic controls on Quaternary Ras Leona marine terraces (Strait of Gibraltar, northern Morocco)". *Quaternary Research 74,* 277–288. doi:10.1016/j.yqres.2010.06.008.

El Kharim.Y, (2002); "Etude des mouvements de versants dans la région de Tétouan (Rif occidental): Inventaire, analyse et cartographie". *Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc,* 250 p.

El Khattabi.J et Carlier.E, (2004); "Tectonic and hydrodynamic control of landslides in the northern area of the Central Rif, Morocco". *Engineering Geology* p. 255±264.

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

El Mrabet.A-T, (1991); "Histoire sismologique du Maroc". *Thèse 3ème cycle, Faculté des Lettres, Université Mohammed V, Rabat,* 375p. (en arabe).

El Moulat.M_, Debauche.O, Mahmoudi.S, Mahmoudi.S.A, Manneback.P, Lebeau.F, (2020);"Edge Computing andArtificial Intelligence for Landslides Monitoring".*The 7th International Symposium on Emerging Information, Communication and Networks (EICN 2020), November 2-5, 2020, Madeira, Portugal.*

Ercanoglu.M, Temiz.F-A, (2011);"Application of logistic regression and fuzzy operators to landslide susceptibility assessment in Azdavay (Kastamonu, Turkey)". *Environ Earth Sci 64*:949–964.

Ercanoglu.M; (2005);"Landslide susceptibility assessment of SE Bartin (Ouest Black Sea region, Turkey) by artificial neural networks". *Nat Haz Earth Sys Sci 5*:979–992

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

Ermini.L, Catani.F, Casagli.N, (2005);"Artificial neural networks applied to landslide susceptibility assessment". *Geomorphology 66*:327–343

Esmali.A, Ahmadi.H, (2003); "Using GIS & RS in mass movements hazard zonation a case study in Germichay Watershed, Ardebil, Iran". *Map India Conference 2003*. At http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/landslides/ma03004.htm

ESRI, (2018);"World Cities data, available" at: http: //www.arcgis.com/home/item.html? id= dfab3b294ab24961899b2a98e9e8cd3d, last access: 19 February 2018.

Etienne.D, (2007); "Evaluation quantitative et cartographie du risque "glissement de terrain" Application au Bassin de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence - France)"; *Master 2 Recherche, Mention Géosciences, Environnement, Risques. Spécialité "Risques Technologiques et Naturels" Parcours "Risques naturels", Université Louis Pasteur - Strasbourg 1.*

F

Fabbri.A, Chung.C-F,(2008); "On Blind Tests and Spatial Prediction Models", *Natural Resources Research, Vol. 17, No. 2*, June 2008; DOI: 10.1007/s11053-008-9072-y.

Fabbri.A, Chung.C-F, Napolitano.P, Zêzere.J, (2002); "Prediction rate functions of landslide susceptibility applied in the Iberian peninsula", *Management Information Systems, Project: Newtech. © 2002 WIT Press, Ashurst Lodge, Southampton, SO40 7AA, UK. All rights reserved. Paper from: Risk Analysis III, CA Brebbia (Editor). ISBN* 1-85312-915-1. Web: www.witpress.com Email witpress@witpress.com

Fabbri.A-G. & Chung.C-F,(2001); "Spatial support in landslide hazard predictionbased on map overlays", *Proc, IAMG 2001, International Association for Mathematical Geology Annual Meeting Cancun, Mexico*, September 10-12, http:www.kgs.ukans,edu/conference/iamg/program.html/.

Faccenna.C, Piromallo.C, Crespo-Blanc.A, Jolivet.L, Rossetti.F, (2004b); "Lateral slabdeformation and the origin of the Ouestern Mediterranean arcs". *Tectonics 23.*

Fares.A, (1994); "Essai méthodologique de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate (Rif, Maroc)". *Thèse Doctorat. Université de Franche Comté.* 177 p.

Fares.A, Rollet.M, Broquet.P, (1994); "Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain". *Revue Française de Géotechnique n° 69,* p. 63-72.

Farina.P, Davide.C, Fumagalli.A, Moretti.S, (2006); "Permanent Scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project", *Engineering Geology 88(3)*:200-217, DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.09.007

Favre.J-L, Resig.S, Leroi.E,(2000);"Conditional landslide hazardmapping". In: Melchers RE, Stewart MG (eds) Applications of statistics and probability-civil engineering and riskanalysis. A.A. Balkema, Rotterdam, pp 255–262

Favre.P,(1992);"Géologie des massifs calcaires situés au front Sud de l'unité de Kétama (Rif, Maroc).*Genève (13, rue des Maraîchers), Section des sciences de la terre.*

Fay.G, (1997);"L'évolution d'une paysannerie montagnarde : les Jbalas Sud-Rifains". In: *Méditerranée, troisième série, tome 35, 1-2-1979. L'homme et son milieu naturel au Maghreb.* pp. 81-91; doi : https://doi.org/10.3406/medit.1979.1901

Feinberg.H,(1986);"Les séries tertiaires des zones externes du Rif (Maroc)". *Notes et Mémoires du Serv. Géologique du Maroc 315*, 192.

Fell.R, Corominas.J, Bonnard.C, Cascini.L, Leroi.E & Savage.W, (2008a); "Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning". *Engineering Geology, 102 (3-4)* : 85–98.

Fell.R, Corominas.J, Bonnard.C, Cascini.L, Leroi.E, & Savage.W-Z, (2008b);"Commentary onGuidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning". *Engineering Geology, 102* (3-4) : 99–111.

Fell.R, Ho.K.K-S, Lacasse.S, Leroi.E, (2005); "A framework for landslide risk assessment and management", *Proceedings International Conference on Landslide Risk Management, London,Taylor & Francis*, 3-25.

Fiechter.G, & Suter.G, (1986-1987); "Carte géologique d'Asilah" au 1/50 000.– *Notes Mém. Serv. géol. Maroc, 346.*

Finlay.P-J, Fell.R, and Maguire.P-K, (1997); "The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall", *Revue canadienne de géotechnique, 1997, 34(6)*: 811-824, https://doi.org/10.1139/t97-047

Fischer.G-B, Amos.C-B, Bookhagen.B, Burbank.D-W, and Godard.V,(2012);"Debris flow modeling for susceptibility mapping at regional to national scale in Norway".In *proceedings of 11th International & North American. Symposium on Landslides, Banff.*

Flageollet.J-C,(1989);"Les mouvements de terrain et leur prévention, Paris":*Masson, 218 p.*

Flageollet.J-C,(1996); "The time dimension in the study of mass movements". *Geomorphology, 15*, 185-190.

Fleming.M-D, and Hoffer.R-M, (1979);"Machine processing of Landsat MSS data and LARSTechnical",*Report 062879, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue. University, Ouest Lafayette, Indiana*.

Fressad.M, (2013); "Les glissements de terrain du Pays d'Auge coninental(Normandie, France): caractérisation, cartographie, analyse spatiale et modélisation"; *Thése de Doctorat, Spécialité géographie physique, humaine économique et régionale. Université de Caen Basse Normandie*.

Fressard.M, Thiery.Y, & Maquaire.O, (2013); "Which data for quantitative landslide susceptibility mapping at operational scale?. Case study of the Pays d'Auge plateau hillslopes (Normandy, France)".*Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss., (1)* : 1285–1317.

G

Gabet.E, Burbank.D, Putkonen.J, Pratt-Situala.B, Ojha.T, (2004);"Rainfall thresholdsfor landsliding in the Himalaya of Nepal". *Geophys J Roy Astron Soc 63*:131–143.

Galli.M, Ardizzone.F, Cardinali.M, Guzzetti.F, Reichenbach.P,(2008);"Comparinglandslide inventory maps". *Geophys J Roy Astron Soc 94*:268–289

Garczynski.F, (1984);"Glissement de terrain et forêt de montagne. Grenoble". *Service de Restauration des terrains en Montagne.* 23p.

Ghallab.A, et al., (2015); "modélisation de la distribution spatiale des paramètres bioclimatiques dans la region tanger- tetouan (rif occidental)"; *European Scientific Journal 11(17)*:1857-788.

Ghosh.S, van Ouesten.C-J, Carranza.E.J-M, Ghoshal.T, Sarkar.N, Surendranath.M, (2009a);"A quantitative approach for improvingthe BIS (Indian) method of medium-scale landslide susceptibility".*Journal of the Geological Society of India 74*, 625-638.

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

Gokceoglu.C, Sezer.E-A, (2009); " A statistical assessment on international landslide literature (1945-2008)", December 2009; Landslides 6(4):345-351; DOI: 10.1007/s10346-009-0166-3.

Gomez.H, Bradshow.R, Mather.P,(2000);"Monitoring the distribution of shallowlandslide prone areas using Remote Sensing, DTM and GIS - a case studyfrom the tropical Andes of Venezuela". In: *Casanova E (ed) Remote Sensing in 21st century: Economic and Environmental applications. Balkema, Rotterndam,* pp 395–401.

Govi.M, Sorzana.P-F, (1980);"Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount inPiedmont basin (NorthOuestern Italy)",*Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica 14*, 43–60

Greco.R, Sorriso-Valvo.M, Catalano.E, (2007); "Logistic Regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: The Aspromonte case study, Calabria, Italy", *Engineering Geology, Volume 89, Issues 1-2, 12 , January 2007,* Pages 47-66.
https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.006

Greenbaum.D, et al., (1995);"Rapid methods of landslide hazardmapping: Papua New Guinea",*case study: British Geological Survey Technical Report*_WC/95/27

Gritzner.M-L, Marcns.W-A, AspinaII.R, and Custer.S-G, (2001);"Assessing lands lide potential using GIS,soil wateT wetness modelling and topographic attricutes, Payette River, Idaho", *Geomorphology 37 (1-2)*,149-165.

Grünthal.G, Bosse.C, Sellami.S Sellami, Giardini.D, (1999); "Compilation of the GSHAP regional seismic hazard for Europe, Africa and the Middle East", December 1999Annali *di Geofisica 42(6)*; DOI: 10.4401/ag-3782,SourceDOAJ,LicenseCC BY 4.0, Project: GSHAP: Global Seismic Hazard Assessment Program.

Gutierrez.F, Soldati.M, Audemard.F, Balteanu.D, (2010);"Recent advances in landslideinvestigation: issues and perspectives". *Geophys J Roy Astron Soc 124*:95–101

Guzzetti.F, (2000);"Landslide fatalities and the evaluation of landslide risk in Italy". *Engineering Geology, 58 (2)* : 89–107.

Guzzetti.F, (2006);"Landslide hazard and risk assessment". *Universitäts und Landesbibliothek Bonn*. 373p.

Guzzetti.F, Ardizzone.F, Mauro.A, Mirco.G, Reichenbach.P, Rossi.M,(2008);" Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy", *Geomorphology,Volume 96*, Issues 1–2, 1 April 2008, Pages 105-122.

Guzzetti.F, Mondini.A-C, Cardinali.M, Fiorucci.F, Santangelo.M, & Chang.K-T, (2012);"Landslide inventory maps : New tools for an old problem". *Earth-Science Reviews, 112* (1) : 42–66.

Guzzetti.F, Peruccacci.S, Rossi.M, Stark.C-P, (2007);"Rainfall thresholds for the initiation of landslides". *Meteorology Atmospheric Physics (in press)*.

Guzzetti.F, Reichenbach.P, Ardizzone.F, Cardinali.M & Galli.M, (2006),"Estimating the quality of landslide susceptibility models". *Geomorphology, 81 (1-2)* : 166–184.

Guzzetti.F, Reichenbach.P, Cardinali.M, Ardizzone.F, & Galli.M, (2003);"The impact of landslides in the Umbria region, central Italy". *Natural Hazards and Earth System Science, 3 (5)* : 469–486.

Guzzetti.F, Reichenbach.P, Cardinali.M, Ardizzone.F,(2005a);"Probabilistic landslidehazard assessment at the basin scale". *Geophys J Roy Astron Soc 2*:272–299

H

Harris.J-R, Wilkinson.L, Grunsky.E-C,(2000);"Effective use and interpretation of lithogeochemical data in regional mineral exploration programs: application of geographic information systems (GIS) technology". *Ore Geology Review 16*, 107-143.

Hatamifar.R, Mousavi.S.H, Alimoradi.M,(2012); "Landslide hazard zonation using AHP model and GIStechnique in Khoram Abad City"; *Geomorphology and environmental planning, 23(3)*: 43-60.

Havenith.H-B, Strom.A, Calvetti.F, Jongmans.D, (2003); "Seismic triggering of landslides. Part B: Simulation of dynamic failure processes", November 2003, *Natural hazards and earth system sciences 3(6)*, DOI: 10.5194/nhess-3-663-2003, SourceOAI, LicenseCC BY 4.0, Project: DEM modelling.

Hengl.T, & Reuter.H, (2011);"How accurate and usable is GDEM? A statistical assessment of GDEMusing LiDAR data". In : *Geomorphometry* 2011, edited by T. Hengl, I. S. Evans, J. P. Wilson and M.Gould. pp. 45–48.

Horton.R,(1945);"Erosional developpement of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology". *Geological Society American Bulletin, New York, Volume 56*, n° 40, 275-370p.

Hosmer.D-W, & Lemeshow.S, (1989);"Applied regression analysis". *John Willey, New York*. 337p.

Howard.A-D, (1967); "Drainage analysis in geologic interpretation:a summation". *Bulletin of American Association of Petroleum Geologists 51, 11*, 2246-3428.

Hoyez.B, (1989);"Le Numidien et les flyschs oligo-miocénes de la bordure sud de la Mediterranée occidentale", *These Doct. Etat, Univ. Lille,* 1989, 464p.

Humbert.M, et Jeannette.A, (1962);"Les cartes géotechniques : quelques principes de réalisation", *dans Revue de géographie du Maroc, Rabat*, n° 1-2, 1962, 67-75 p.

Hutchinson.M-F, (1989);"A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits". *Journal of Hydrology, 106(3-4)*: 211-232.

Hutchinson.M-F,(1996);"A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models". In:*Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling* : 21–26.

I

Ineter, Cosude, (2005); "Estudios Territoriales, Cuerpo Suizo de Ayuda Humanitaria. Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenaza por inestabilidad de laderas". *Proyecto MET-ALARN. Managua, Nicaragua*.

International Union of Geological Sciences(IUGS), Working Group on Landslides, (1995);"A suggested method for describing the rate ofmovement of a landslide". *Bull Int Assoc Eng Geol 52:75–78Ives et Messerli*,1981;

Iovine.G,(2008);"Mud-flow and lava-flow susceptibility and hazard mapping through numerical modelling,GIS techniques, historical and geoenvironmental analyses". In: Saànchez-Marré M, Béjar J, Comas J,Rizzoli AE, Guariso G (Eds.) Proceedings of the iEMSs Fourth Biennial Meeting: InternationalCongress on Environmental Modelling and Software, 7-10 July 2008, 3 1447-1460

Irimuș, I.A,(1997);"Geomorphological Cartography (in Romanian)", Focul Viu Print House, ClujNapoca, 111 pp.

Iwahashi.J, Watanabe.S, Furuya.T,(2001);"Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan". *Computers and Geosciences, 27 (7)*, 851–865.

J

Jaboyedoff.M, Oppikofer.T, Abellan.A, Derron.M-H, Loye.A, Metzger.R, Pedrazzini.A,(2012);"Use of LIDAR in landslide investigations: a review". *Nat Hazards. 61*:528

Jelinek.R, Wagner.P,(2007);"Landslide hazard zonation by deterministic analysis".*Landslides 4*:339–350

Jolivet.L, Augier.R, Faccenna.C, Negro.F, Rimmele.G, Agard.P, Robin.C, Rossetti.F, Crespo-Blanc.A,(2008)"Subduction, convergence and the mode of backarc extension in theMediterranean region". *Bulletin de la Société Géologique de France 179*, 525–550.

K

Kavzoglu.T, Sahin.E-K, Colkesen.I, (2013);"Landslide susceptibility mapping using GIS-basedmulti-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression".*Landslides.* doi:10.1007/s10346-013-0391–7

Kayastha.P, Megh.R-D, De Smedt.F, (2013); "Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, Ouest Nepal"; March 2013, *Computers & Geosciences 52*:398–408, DOI: 10.1016/j.cageo.2012.11.003, P.

Keefer.D-K, (1984);"Landslides caused by earthquakes". *Geological Society of America Bulletin, 95*: 406-421p.

Kili.M, ElMansouri.B, Ait Fora.A, (2006); "De nouveau éléments structuraux du complexe aquifére profond du bassin du Rharb (Maroc): implications hydrogéologiques". *C. R. Acad. Sciences, Paris, 1-9.*

Kim.S-K, Hong.W-P, Kim.Y-M, (1991);"Prediction of rainfall-triggered landslides in Korea". In: *Landslides (Bell DH, ed). Rotterdam: A.A. Balkema, 2*: 989–994

Komac.M, (2006); "A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia", *Geomorphology, Volume 74,* Issues 1–4, March 2006, Pages 17-28. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.005

L

Laaribi.A,(2000);"SIG et analyse multicritère". *Hermès Sciences Publications, Paris*.

Labriki.A, Chakiri.S, , Nouaim.W, , Allouza.M, , & Ezzayani.J, (2016);"Approche Méthodologique D'évaluation De Susceptibilité Des Versants Aux Glissements De Terrain Par Un Modèle Volumique De L'aléa ; Application Au Secteur De Boujibar Al Hoceima (Rif, Maroc)". *European Scientific Journal, ESJ,* 12(32), 206. https://doi.org/10.19044/esj.2016.v12n32p206

Larroque.C, (2009);"Aléa sismique dans une région intraplaque à sismicité modérée : la jonction Alpes-Bassin Ligure". *Sciences de la Terre. Université Nice Sophia Antipolis*, 2009. fftel-00453377f

Lawson.A-C,(1908);"The California earthquake of April 18, 1906: Report of the StateEarthquake Investigation Commission", *vol. I: Carnegie Institution of Washington Publication 87,* 451 p. (Note: available today in print, http://www.carnegieinstitutuion.org/books_in_print.html, and online, http://bancroft.berkeley.edu/collections/earthquakeandfire/splash.html.

Lebart & co-author: Rajman.M,(2000); "Handbook of Natural Language Processing",(chapter 20: Computing Similarities), (Dale, Moisl, Somers; eds), *Marcel Dekker, New York*, p 447-505, 2000.

Lee.S, (2005); "Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data". *Int J Remote Sens* 2005, 7: 1477-1491.

Lee.S, Choi.J, Min.K, (2002); "Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model". *Environmental Geology 43,* 120-131.

Lee.S, Pradhan.B, (2006); "Probabilistic landslide hazard and risk mapping on Penang Island, Malaysia". *J Earth Syst Sci* 2006, 115: 661-672. 10.1007/s12040-006-0004-0

Lee.S, Ryu.J-H, & Kim.I-S, (2007);"Landslide susceptibility analysis and its verification usinglikelihood ratio, logistic regression, and artificial neural network models : case study of Youngin,Korea". *Landslides, 4 (4)* : 327–338.

Lee.S, Ryu.J-H, Won.J-S, & Park.H-J, (2004);"Determination and application of the weights forlandslide susceptibility mapping using an artificial neural network". *Engineering Geology, 71* (3):289–302.

Leone.F, Aesté.J-P, Leroi-E, (1996);"Vulnerability assessment ofelements exposed to mass-movement: working toward abetter risk perception". In: *Senneset K (ed.), Landslides Gliseements de Terrain. Balkema. Rotterdam, Holland.* pp263-270.

Leroi.E,(1996); "Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and development". *Proc. of 7th international symposium on landslides, June 17–21, Trondheim*, 35–51.

Leroux-Mallouf.R,(2013)"Caractérisation de la déformation Quaternaire du Rif Oriental (Maroc). Approche morphométrique haute résolution et morphotectonique". *(Mémoire de Master). Géosciences Montpellier, Montpellier*.

Lespinasse.P, (1975);"Géologie des zones externes et des flyschsentre Chaouène et Zoumi (centre de la chaîne rifaine, Maroc)".*Thèse d'État, université de Toulouse 1,* 248 p.

Lissak.C, (2012);"Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados) : Morphologie,fonctionnement et gestion du risque". *Thèse de l'Université de Caen Basse-Normandie*. 316p.

Litto.W, Jaaidi E-B, Medina.F, Dakki.M, (2001); "Etude sismo-structurale de la marge Nord du bassin du Gharb (avant-pays rifain, Maroc): mise en évidence d'une distension d'âge miocène supérieur".*Eclogae Geologicae Helvetiae 94(1):*63-73, Projects: Project 1. Recent tectonics in Morocco and associated natural hazards (earthquakes and tsunamis)Inversion tectonics: A tribute to Dr Ahmed Ben Yaïch.

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

Longley.P, Goodchild.M, Maguire.D, Rhind.D, editors,(2005);"Geographical information systems: principles, techniques, management and applications". *2nd ed. Chichester: Wiley*.

M

Maas.H-G, Kersten.T, (1997); "Aerotriangulation and DEM/Orthophoto generation from high-resolution stillvideo imagery: On the potential of digital cameras onboard an aircraft", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Volume 63,* Issue 9, Pages 1079-1084.

Malczewski.J, (1999);"GIS and multicriteria decision analysis". *Wiley, Toronto*

Malet.J-P& Maquaire.O, (2008); "Risk assessment methods of landslides", Project Report 2.2, *Risk Assessment Methodologies for Soil Threats* (RAMSOIL).

Malet.J-P, (2003); "Les glissements de type écoulement dans les marnes noires des Alpesdu Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique". *PhD, Université Louis Pasteur, Strasbourg (in French)*.

Manche.Y,(1997);"Propositions pour la priseen compte de la vulnérabilité dans lacartographie des risques naturels prévisibles".*Revue de Géographie Alpine 2 (LXXXIII)*, 49-62.

Mansour.M, (1998);"Geodynamic processes and cartography ofground movements in the area of Chefchaouen (District ofBouhalla-Amtrass): Application to the stabilization of main roadNb: 39. Ouestern Rif, Morocco". *Thèse de doctorat, université Paris-Diderot (Paris 7),* 192 p.

Mansour.M, Ait Brahim.L, (2005); "Utilisation de la télédétection pour l'analyse de la fracturation du domaine interne rifain(Maroc) : relation avec la répartition des sources". *Télédétection, 5,* 1-2-3, 95-103.

Maquaire.O,(2002);"Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain). Processus,Fonctionnement, Cartographie". *Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg,* 219p.

Maquaire.O, Malet.J-P, Remaıtre.A, Locat.J, Klotz.S, & Guillon.J, (2003); "Instability conditions of marly hillslopes: towards landsliding or gullying? The case of the Barcelonnette Basin, South East France". *Engineering Geology, 70 (1)*: 109–130.

Margaa.K, (1994); "Essai de cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de larégion d'Al Hoceima (Rif, Nord-Maroc)". *Thèse Doctorat, Université de Franche-Comté,* 196 p.

Marinoni.O, (2004); "Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS". *Comput Geosci 30(6):*637–646

Marques.R, Zêzere.J-L, Trigo.R-M, Trigo.I-F, (2008); "Rainfall patterns and critical values associated with landslides in Povoação County (São Miguel Island, Azores): Relationships with the North Atlantic Oscillation". February 2008, *Hydrological Processes 22(4)*:478 - 494, DOI: 10.1002/hyp.6879.

Martelloni.G, Segoni.S, Fanti.R, Catani.F, (2012);"Rainfall thresholds for the forecasting of landslide occurrence at regional scale". *Landslides 9(4):*485–495

Massa.M, Lovati.S, D'Alema.E, Ferretti.G, & Bakavoli.M, (2010a); "An experimental approach for estimating seismic amplification effectsat the top of a ridge, and the implication for ground-motion predictions: the case of Narni (central Italy)";*Bull. seism. Soc. Am., 100,* 3020–3034.

Masson.M, (1976); "Influence des héritages périglaciaires sur l'instabilité des pentes naturelles: Application à la Normandie". *Bull. Liaison Labo. P. et Ch., No. Spécial, 11:* 77–89.

Mastere.M,(2011); "La susceptibilite aux mouvements de terrain dans la province de chefchaouen analyse spatiale, modelisation probabiliste multi-echelle et impacts sur l'amenagement & l'urbanisme", *These de Doctorat, Universite Mohammed V- Agdal, Faculte des Sciences-Rabat, En cotutelle avec l'Universite de Bretagne Occidentale-France.*

Mastere.M, Van Vliet Lanoë.B & Aït Brahim.L, (2013). "Land use mapping and its relation to mass wasting and gullying in NorthOuestern Rif (Morocco)".*Geomorpholog, relief, process, environment, 3,* 335–352.

Mastere.M, Van Vliet Lanoë.B, Mansour.M, Aït Brahim.L, (2011); "Spatiotemporal analysis of landslides using digital photogrammetry and DEM". *Revue Télédétection, 10,* 147-156.

Matheron.G, (1978), "Estimer et choisir", 175 p., *Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Fascicule 7, ENSMP, Paris.*

Maurer.G,(1968);"Les montagnes du Rif central. Etude géomorphologique". *Trav. Inst. Sci. Cherifien, Geol. Geogr. Phys. 4.*

Meghraoui.M, Morel.J-L, Andrieux.J, et Dahmani.M, (1996); "Tectonique plio-quaternaire de la chaîne tello-rifaine et de la mer d'Alboran: Une zone complexe de convergence continent-continent". *Bulletin de la Société Géologique, France, n° 167,* p. 141-157.

Metz.C-E, (1978); "Basic principles of ROC analysis". In: *Seminars in nuclear medicine. Elsevier, 8 (4)* :283–298.

Michard.A, Frizon de Lamotte.D, Negro.F, Saddiqi.O,(2007);"Serpentinite slives and metamorphism in the external Maghrebides: Arguments for an intracontinental suture in the African paleomargin (Morocco, Algeria)". *Rev. la Soc. Geológica España 20,* 173–185.

Michard.A, Negro.F, Saddiqi.O, Bouybaouène.M-L, Chalouan.A, Montigny.R, Goffè.B, (2006);"Pressure-temperature-time constraints on the Maghrebide mountain building: evidence from the Rif-Betic transect (Morocco, Spain), Algerian correlations, and geodynamic implications". *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, 338,* 92–114.

Miller.D-J, Burnett.K-M, (2007);"Effects offorest cover, topography, and samplingextent on the measured density of shallow,translational landslides". *Water Resources Research. 43*. WO3433. Doi:10.1029/2005WR004807.

Millies-Lacroix.A, (1965); "L'instabilité des versants dans le domaine rifain". *Revue Géomorphologie Dynamique, Vol. XV, n° 7, 8, 9,* p. 97-109.

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

Millies-Lacroix.A, (1981); "Classification des talus et versants instables".*Bull. Liaison Labo. P. et Ch., Numéro spécial X,* p.55-62.

Moine.M, (2008); "Inventaire et caractérisation de glissements de terrain à partirde données images aériennes et satellites par une méthodesemi-automatique: Application au bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence,France)"; *Mémoire de Master 2 Recherche, mention Géosciences, Environnement et Risques, spécialité Risques Technologiques et Naturels, parcours Risques Naturels, Laboratoire Image et Ville (UMR 7011), Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur, Strasbourg I.*

Molenaar.H, (2005);"Automatic recognition of geomorphologicfeatures. A process-based approach for the classification oflandslides using remote-sensing data sources". *Thesis, IBED-Physical Geography, Section Computational Bioand Physical Geography, Universiteit van Amsterdam.*

Montgomery.D-R, K. Schmidt.M.H, Greenberg, and Dietrich.W-E, (2000); "Forest clearing and regional landsliding", *Geology, 28,* 311–314, doi:10.1130/0091-7613(2000)28<311:FCARL>2.0.CO;2.

Moradi.B.M-H, Zargham.M, (2012); "GIS-based landslide susceptibility mapping by AHP method", *a case study, Dena City, Iran,*January 2012, https://www.researchgate.net/publication/285837947

Moreiras.S-M, (2004a);"Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendozaprovince, Argentina". *Earth Surface Processes and Landforms 29*:255–266.

Morel.J-C, (1992);"Carte des mouvements récents du Rif". *Notes et Mém. Serv. géol., Maroc, n° 365*.

Morel.J-L,(1989);"Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'actuel". *Geodin. Acta 3*, 283–294.

Mougin.J-P, (1973);"Les mouvements de terrain : recherches sur les apports mutuels des études géologique et mécanique à l'estimation de la stabilité des pentes"; *Thése de dorcteur ingenieur, Sciences de l'ingénieur [physics]. Universite Scientifique et Medicale de Grenoble, France*.

Muñoz Gallego.A-R et al., (2013) "Étude des valeurs naturelles des sections moyenne et basse de l'Oued Loukkos. Larache. Maroc"; *dans le cadre du jumelage entre la ville de Larache et Malaga en espagne.*

N

Nagarajan.R, Mukherjee.A, Roy.A, and Khire.M-V, (1998);"Temporal remote sensingdata and GIS application in landslide hazard zonation of part of Ouestern Ghat, India".*International Journal of Remote Sensing, 19*, 573–585.

Negro.F, De Sigoyer.J, Goffé.B, Saddiqi.O, Villa.I-M,(2008);"Tectonic evolution of the Betic–Rif arc: New constraints from 40Ar/39Ar dating on white micas in the Temsamane units (External Rif, northern Morocco)". *Lithos 106*, 93–109.

Nguyen.Q-P, Bui.H-B, (2004);"Landslide hazard mapping using Bayesian approach in GIS: case study in YangSan area, Korea". *GIS-IDEAS Symposium 2004, Hanoi, Vietnam*, 125-130.

Nijkamp.P, Rietveld.P, Voogd.H,(1990),"Multicriteria evaluation in physical planning". North-Holland, Amsterdam /New York.

O

Openshaw.S, Openshaw.C,(1997);"Artificial intelligence in geography". *John Wiley & Sons, Chichester*, 329 p.

Oreskes.N, Shrader-Frechette.K, Belitz.K, (1994);"Verification,validation, and confirmation of numerical models in the earthsciences". *Science 263*(5147):641–646

P

Parise.M,(2001);"Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard". *Physical Chemical Earth (C), 26 (9),* 697–703.

Parry.S, Millis.S, Clahan.B, Krug.K, (2010); "The importance of reading the landscape: the use of engineering geomorphology in regional landslide hazard assessments", https://www.researchgate.net/publication/283407391.

Partington.G-A,(2010) "Exploration targeting using GIS: more than a digital light Table." *Geo-Computing Conference, Brisbane,* 29Sept-1Oct 2010. Available at http://www.kenex.co.nz/documents/papers/PARTINGTON_2010.pdf

Pascon.P, Vander.W-H,(1983) ; "Essai d'écologie sociale d'une vallée rifaine (Maroc)", *Ouvrage publié avec le concours de l'Institut Universitaire de la Recherche Scientifique (IURS, Rabat), de la faculté de Géographie Sociale de l'Université d'Amsterdam (Pays-Bas) et de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (INAV, Rabat),* 297p,

Pavel.L, Štefan.K, (2011);"Developments in Landslides Inventory and Registry in Slovakia", in *Landslide Science and Practice, Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning (2013),*Pages 65-71.

Pike.R-J, Howell.D-G, and Graymer.R-W, (2003);"Landslides and cities—an unwantedpartnership": In G. *Heiken, R. Fakundiny and J. F. Sutter (eds.), Earth Science in the City—A Reader, American Geophys. Union Special Publication 56,* pp. 187–254.

Pistocchi.A, Luzi.L, Napolitano.P, (2002); "The use of predictive modelling techniques for optimal exploitation of spatial databases: a case study in landslide hazard mapping with expert system-like methods". *Environmental Geology, 41,* 765–775.

Platt.J-P,(2007);"From orogenic hinterlands to Mediterranean-style back-arc basins: a comparative analysis". *J.Geol. Soc. Lond. 164*:297–311

Platt.J-P, Behr.W-M, Johanesen.K, Williams.J-R,(2013);"The Betic-Rif Arc and Its OrogenicHinterland: A Review". *Annual Review of Earth and Planetary Sciences 41,* 313–357.doi:10.1146/annurev-earth-050212-123951

Poiraud.A, (2012);"Les glissements de terrain dans le bassin du tertiaire volcanisé du Puy-en-Velay (Massif central, France). Caractérisation, facteurs de contrôle et cartographie de l'aléa". *Thèse de doctorat de l'Université de Blaise Pascal de Clermont-Ferrand*. 563p.

Porcher.M, & Guillope.P, (1979);"Cartographie des risques ZERMOS appliquée à des plans d'occupationdes sols en Normandie". *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 99:* 43–54.

Poujol.A,(2017); "Analyse des déformations actuelles dans le Rif (Maroc) : approche morphotectonique; Géomorphologie". *Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc,* Submitted on 24 Apr 2017.

Pourghasemi.H-R, (2008);"Landslide hazard assessment using fuzzy logic (Case Study: A part ofHaraz Watershed), M.Sc". *Thesis, Tarbiat Modarres University International Campus, Iran,* pp 92

Power.M, Tilman.D, Estes.J-A, Paine.R-T, (1996); "Challenges in the quest for keystones: Identifying keystone species is difficult-but essential to understanding how loss of species will affect ecosystems", September 1996, *BioScience 46(8)*:609-620, DOI: 10.2307/1312990.

Pradhan.B, & Lee.S, (2010);"Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by usingfrequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models". Environmental Earth Sciences, 60 (5): 1037–1054.

Preux.P-M, et al,(2005);"Qu'est ce qu'une régression logistique?", *Rev Mal Respir; 22* :159-62.

R

Rakotomalala.R,(2017); "Régression logistique - Une approche pour rendre calculable P(Y /X)", http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/cours/supports_data_mining.html.

Raines.G-L, and Bonham-Carter.G-F,(2006); "Exploratory spatialmodelling demonstration for Carlin-type deposits, Central Nevada, USA, using Arc SDM". In *GIS applications in earth sciences: Special publication, edited by J. R. Harris, 23–52. Geological Association of Canada*.

Raines.G-L, Sawatzky.D-L, Bonham-Carter.G-F, and Looney.C-G, (2009); "SpatialData Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling usingweights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks".

Ramdani.M, (1991); "Etude sismotectonique du Maroc Nord". *Thèse d'Etat, Faculté des Sciences de Oujda, Maroc*, 250p.

Ranjan.K-D, Shuichi.H, Atsuko.N, Minoru.Y, Takuro.M, Katsuhiro.N, (2008); "GIS-based weights-of-evidence modeling of rainfall-induced landslides in small catchments for landslide susceptibility mapping". *Environmental Geology 54*, 311-324.

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

Reichenbach.P, Galli.M, Cardinali.M, Guzzetti.F, & Ardizzone.F, (2004);"Geomorphological mappingto assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of Central Italy.In : *Glade, T., Anderson, M. G., Crozier, M. (eds), Landslide hazard and risk* : 429–468.

Reid.H-F,(1910);"The mechanics of the earthquake". *Carnegie institution of Washington*.

Reilinger.R, McClusky.S,(2011);"Nubia–Arabia–Eurasia plate motions and the dynamics ofMediterranean and Middle East tectonics". *Geophysical Journal International 186*, 971–979.

Remaître.A,(2006);"Morphologie et dynamique des laves torrentielles : Applications aux torrents des Terres Noires du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud)". *Thèse de Doctorat de Géographie physique, humaine, économique et régionale de l'Université de Caen Basse-Normandie*, 486 p.

Romangy.A, (2014); "évolution des mouvements verticaux néogènes de la chaîne du rif (Nord-maroc) : apports d'une analyse structurale et thermochronologique" *Thèse de doctorat, Laboratoire Géoazur – UMR 7329, Univ. de Nice-Sophia Antipolis.*

Rozos.D, Pyrgiotis.L, Skias.S, Tsagaratos.P, (2008), "An implementation of rock engineering system for ranking the instability potential ofnatural slopes in Greek territory: an application in Karditsa County".*Landslides 5(3)*:261–270

Ruff.M, Czurda.K, (2008); "Landslide susceptibility analysis with a heuristic approach in the Eastern Alps (Vorarlberg, Austria)"; February 2008, Geomorphology 94(3):314-324, DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.10.032.

Ruiz-Constán.A, Galindo-Zaldívar.J, Pedrera.A, Célérier.B, Marín-Lechado.C, (2011);"Stress distribution at the transition from subduction to continental collision (northOuestern and central Betic Cordillera)". *Geochem. Geophys. Geosyst. 12,* Q12002. doi:10.1029/2011GC003824.

S

Saaty.L-T, Vargas.L-G, (2001); "Models, methods, concepts, and applications of the analytic hierarchy process". *Kluwer Academic, Boston,* 333 p.

Saaty.T-L,(2008); "Decision making with the analytic hierarchy process", *Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1,* 2008, p 83-98.

Saaty.T-L, (1980);"The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resources Allocation".*McGraw-Hill California University*, 287p.

Saaty.T-L, (1990);"An Exposition of the AHP in Reply to the Paper, Remarks on the Analytic Hierarchy Process",*Management Science, 36*: 259-268.

Saiful.I, Rini.A, Binti.A, and Javed.M, (2017), "Static and Dynamic Analysis of Mansa Devi Hill Landslide Using FLAC 3D". *International Journal of Civil Engineering and Technology, 8(11),* pp. 631 – 643.

Savigear.R.A-G, (1965);"A technique of morphological mapping". *Ann Assoc Am Geogr 55*:514–538.doi:10.1111/j.1467-8306.1965.tb00532.x

Sawatzky.D-L, Raines.G-L, Bonham-Carter.G-F, (2009b); "Spatial Data Modeller (SDM) for ArcMAP 9.3": *Help Files*.

Sawatzky.D-L, Raines.G-L, Bonham-Carter.G-F, and Looney.C-G,(2009);"SpatialData Modeller (SDM): ArcMAP 9.3 geoprocessing tools for spatial data modelling usingweights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural networks".http://arcscripts.esri.com/details.asp?dbid=15341.

Schmitt. E, (2010); "Weights of Evidence Mineral Prospectivity Modelling with ArcGIS", *EOSC 448 Directed Studies*,Dec. 2010.

Schulz.O-C, Snowmelt.D-J, and al., (2004);"field experiments and modelling in the High AtlasMountains of Morocco". *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, 2004, 8 (6),* pp.1076-1089. ffhal-00304983f

Schulz.W-H, (2007); "Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington". *Engineering Geology, 89,* 67-87.

Scott.K-M, (1988);"Origins, behaviour and sedimentology of lahars and lahar-runout flows in theTooutle-Cowlitz river system", *United States Geol. Surv. Prof. Paper 1447-A*, 74 p.

Sharpe.C.F-S, (1938);"Landslides and related phenomena". *Columbia University Press, New York.*

Si Mhamdi.H, Raji.M, Oukassou.M, (2016); "Fracturation et paléo-contraintes tardi-hercyniennes dans le granitoïde de Tichka (Haut Atlas Occidental, Maroc)", Project: Le massif paléozoïque de Tichka (Haut Atlas Occidental, Maroc): télédétection et analyse structurale, *1ére Rencontre Nationale des Jeunes Géologues 2016.*

Singhroy.V-H, Loehr.J-E, and Correa.A-C, "Landslide risk assessment with high spatial resolution remote sensing satellite data," IGARSS 2000. IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: The Role of Remote Sensing in Managing the Environment. *Proceedings (Cat. No.00CH37120), Honolulu, HI, USA, 2000, pp. 2501-2503 vol.6*, doi: 10.1109/IGARSS.2000.859620.

Soeters.R et Van Ouesten.CJ,(1996); "Slope instability Recognition, analysis and zonation" January 1996, in Landslides: Invistigation and Migration, Chapitre 8, p129-177.

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

Sterlacchini.S,(2000);"Applcazione di un modello previsionale di tipo bayesiano per la valutazione della pericolosità connessa a movimenti versante". *Quaderni di Geologia applicata. 7 (4-2)*, 95-109.

Suter.G,(1980);"Carte géologique/structurale de la chaîne rifaine, échelle 1:500 000";*Serv. Carte géol. Maroc 245a/b.*

Suter.G, et Fiechter.G, (1966); "Le Rif méridional atlantique (Maroc) : aperçustructural sur la région Ouezzane-Zoumi et le pats du Habt (Larache)"; *Note et Mém.Serv.Géol.Maroc,n°188*, p. 15-20.

Süzen.M-L, Doyuran.V,(2004a);"Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey". *Engineering Geology, 71,* 303–321.

Swets.J-A, (1988); "Measuring the accuracy of diagnostic systems". *Science240*, pp. 1285-1293.

T

Tahayt.A, Mourabit.T, Rigo.A, Feigl.K-L, Fadil.A, McClusky.S, Reilinger.R, Serroukh.M, Ouzzani-Touhami.A, Ben Sari.D, Vernant.P, (2008); "Mouvements actuels des blocs tectoniques dans l'Arc Bético-Rifain à partir des mesures GPS entre 1999 et 2005". *C. R. Geoscience, 340,* 400−413p.

Tahiri.M, Hakdaoui.M, Emran.A, Achab.M, El Hadi.H, Tahiri.A, (2014); "Contributions du SIG et de la Télédétection à la Corrélation Entrele NDVI et la Pluviométrie Pour L'étude de la VariabilitéClimatique Dans le Bassin de Tahaddart (Rif, Maroc)", *European Journal of Scientific*

Research, ISSN 1450-216X / 1450-202X Vol. 122 No 3 May, 2014, pp.253-274. http://www.europeanjournalofscientificresearch.com

Talebi.A, Dastorani.M-T, Irannezhad.M-H, (2010); "the role of oak forest on landslide prevention (case study: ardal, chahar mahal and bakhtiari province)", *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering, fall 2010 , Volume 4 , Number 12;* Page(s) 19 To 26.

Talhaoui.A, Aberkan.M, Iben Brahim, El Mouraouah.A; (2014) "Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain"; "Geological hazards and seismic activity within the area of Al Hoceima (Morocco): Approach of quantifying factors responsible for the triggering of the ground instabilities". *Pangea infos, Société Géologique de France,* 43/44, pp.3-18. ffinsu-00948298f.

Tanguay.M-G, and Seuthé.C, (1983);"Base d'un guide d'utilisation des imagesLandsat en géologie". *8ème Symposium canadien de télédétection et au 4ème, Congrès de L'Association québécoise de télédétection, Montréal*, 3-6 Mai 1983.

Tejera De Leon.J, (1993);"Les bassins néogènes d'avant-pays du Rif externe occidental liésà la transformante Jebha-Arbaoua (Maroc)". Thèse d'Etat Es-Science, Université de Pau, France, 323p.3 pl. h.t., 1 Ann.

Tejera De Leon.J,(1997); "Signification de la limite Jebha-Arbaoua(Maroc Nord-occidental): une rampe latérale au-dessus d'une discontinuité crustale héritée de la période de "rifting"", *Journal of African Earth Sciences, Vol. 24,* No. 4, PP. 455-472. © 1997 Elsevier Science Ltd; PII: S0899-5362(97)00075-4.

Terzaghi.K;(1950);"Mechanism of Landslides", *The Geological Society of America, Engineering Geology (Berkley)*, Volume, 83-123.

Thauvin.J-P, (1971); "Ressources en eaux du Maroc". *Tome 1 : Domaines du Rif et du Maroc oriental". Ed. Serv. Géol. Maroc, Rabat.* 315 p.

Thiart.C,and de Witt.M-J, (2006); "Fingerprinting the metal endowment of early continental crust to test for secular changes in global mineraliqation"; *Géological Society of America, Memoir 189,* 2006.

Thiery.Y, (2007);"Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements deversant: cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste". *Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie.* 443p.

Thiery.Y, Malet.J-P, Maquaire.O, (2006); "Test of Fuzzy Logic Rules for Landslide Susceptibility Assessment". *SAGEO 2006, Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale. Recherches & Développements. Strasbourg,* 11-13 septembre 2006, 16 p.

Thiery.Y, Malet.J-P, Sterlacchini.S, Puissant.A & Maquaire.O, (2007); "Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment". *Geomorphology, 92 (1-2)*: 38–59.

Thiery.Y, Malet.J-P, Sterlacchini.S, Puissant.A, Maquaire.O, (2007); "Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment". *Geomorphology, 9 (1-2),* 38-59.

Thiery.Y, MaletJ-P, Sterlacchini.S, Puissant.A, Maquaire.O, (2005); "Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, comparaison de deux approches spatialisées par SIG". Revue Internationale de Géomatique/European Journal of GIS and Spatial Analysis 15, 227–245.

Thiery.Y, Maquaire.O, & Fressard.M, (2013);"Application of expert rules in indirect approaches forlandslide susceptibility assessment". *Landslides: 1–14*.

Thiery.Y, Sterlacchini.S, Malet.J-P, Puissant.A, Maquaire.O, (2004b);"Modélisation spatiale de la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain, Stratégie et application d'une analyse bivariée par SIG". *Cassini 04, 7ème Conférence du GDR SIGMA, Géomatique et Analyse spatiale, 02-04 juin 2004, Grenoble, France,* 61-66. http://www.lsr.imag.fr/Cassini04/Cassini2004/jeudi/diapo_cassini2004_YT3.pdf

Tofani.V, Segoni.S, Agostini.A, Casagli.N, (2013); " Technical Note: Use of remote sensing for landslide studies in Europe", February 2013Natural hazards and earth system sciences 13:299-309 DOI: 10.5194/nhess-13-299-2013, LicenseCC BY 4.0

Travelletti.J, (2011);"Imagerie multi-paramètres et multi-résolutions pour l'observation et lacaractérisation des mécanismes de glissements-coulées". *Thèse de doctorat de l'Université de Caen*. 321p.

U

Udias.A, Lopez Arroya.A, et Mezcua.J, (1976); "Seismotectonic of the Azores-Alboran region". *Tectonophysics; 31, 259-289p.Plate Tectonics And The Azores Gibraltar Region. Nature Phys. Sc., 237.*74. 67-69.

Uromeihy.A, and Mahdafivar.M-R, (2000);"Landslide hazard zonation of Khorshrostam area, Iran";*Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58,* 207–213.

V

Valadão.O-P, Ganar.J-L, Queiroz.G, Ferreira.T, (2002); "Landslides density map of S. Miguel Island, Azores archipelago". *Natural Hazards and Earth System Sciences, 2 (1/2),* 51-56.

van den Eeckhaut.M, Poesen.J, Gullentops.F, Vandekerckhove.L, & Hervás.J, (2011);"Regionalmapping and characterisation of old landslides in hilly regions using LiDAR-based imagery inSouthern Flanders". *Quaternary Research, 75 (3)*: 721–733.

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

van Ouesten, C.J. (2000); The modelling of landslide hazards using GIS. Surveys in Geophysics, 21 (2):241–255.

van Ouesten.C, & Farifteh.J, (2001);"ILWIS user's Guide". *International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC) Enschede, Netherland*: 43–47.

van Ouesten.C.J,(2002);"Remote sensing and geographic informationsystems for natural disaster management"; in *Skidmore A ed Environmental modelling with GIS and remote sensing Taylor & Francis, London* 200–26

van Ouesten.C-J, (1993); "Application of geographic information systems to landslide hazard zonation".*Thèse de doctorat de l'ITC, Enschede, Pays-Bas, publication n°15,* 319p.

van Ouesten.C-J,(2004);"Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recentdevelopments". In: Landslides: Evaluation and Stabilization—Glissement de Terrain: Evaluation etStabilisation: *Proceedings of the 9th International Symposium on Landslides. Rio de Janeiro, Brazil. Citeseer,* pp.39–56.

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

van Ouesten.C-J,Rengers.N, & Soeters.R, (2003);"Use of geomorphological information in indirectlandslide susceptibility assessment". *Natural Hazards, 30 (3):* 399–419.

van Ouesten.C-J, van Asch.T.W-J, & Soeters.R, (2006);"Landslide hazard and risk zonation: why is itstill so difficult?";*Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65 (2):* 167–184.

Vargas.Jr.E-A; Velloso.R-C; de Campos.T.M-P, & Costa Filho.L-M, (1990);"Saturated-unsaturated analysis of water flow in slopes of Rio de Janeiro, Brazil".*Computers and Geotechnics, v. 10:3,* p. 247-261.

Varnes.D-J,(1978); "Slope Movement Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control". In: *Schuster, R.L., Krizek, R.J., (Eds), Transport Research Board, National Research,* 11–33.

Varnes.D-J, (1984),"Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice". *IAEG Commission on Landslides. UNESCO, Paris,* pp1-63.

Vernant.P, Fadil.A, Mourabit.T, Ouazar.D, Koulali.A, Davila.J-M, Garate.J, McClusky.S, Vieira.B-C, Fernandes.N-F, Filho.O-A, (2010);"Shallow landslideprediction in the Serra do Mar, Saõ Paulo, Brazil". *Nat Hazards Earth Syst Sci* 10:1829–1837. doi:10.5194/nhess-10-1829-2010

Vogt.J,(1985),"Révision d'anciens séismes ibéro-maghrébins. Inrapport: Études de sites de faisabilité d'une première centraleélectronucléaire au Maroc". *Maroc : Sofratome and Off. Nat. Elec.*, 78 p

Voogd.H, (1983);"Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning". *Pion Ltd., London.*

W

Wieczorek.G-F, (1984);"Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation andreduction". *Bulletin of the Assoc of Engineering Geologists, 21 (3).*

Wieczorek.G-F, (1987);"Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California". In Costa, J.,E., Weiczorek, G.,F., (Eds), Debris flow/avalanches: process, recognition and mitigation. *Reviews in Engineering Geology, Vol. 7, Geological Society of America, Boulder, Colo.*, 93–104.

Wood.J-D,(1996);"The geomorphological characterisation of digital elevation models". *PhD Thesis, University of Leicester, UK*. http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd

Y

Yalcin.A; (2008);"GIS-based landslide susceptibility mapping usinganalytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen(Turkey): Comparisons of results and confirmations". *CATENA 72 (1)*:1–12

Yeon.Y, Han.J, Ryu.K, (2010);"Landslide susceptibility mapping in Injae, Korea usinga decision tree". **Eng Geol 166**:274–283

Yesilnacar.E, Topal.T, (2005);"Landslide susceptibility mapping: Acomparison of logistic regression and neural Networks methodsin a medium scale study, Hendek region (Turkey)". *Eng Geol 79*:251–266

Yilmaz.I, (2009a);"A case study from Koyulhisar (Sivas-Turkey) forlandslide susceptibility mapping by artificial neural networks".*Bull Eng Geol Environ 68*:297–306

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

Yilmaz.I, (2010); "Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine". *Environmental Earth Science. 61,* pp. 821–836.

Z

Zakir.A, Chalouan.A, Feinberg.H, (2004); "Tectono-sedimentary evolution of a fore-chain domain:example of the Habt and Sidi Mrayt basins, northOuestern external Moroccan Rif; stratigraphicprecisions and tectonic modelling". *Bulletin de la Societe Geologique de France 175*, 383–397.

Zêzere.J-L, (2002);"Landslide susceptibility assessment considering landslidetypology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal)". *Nat Hazard Earth Syst Sci 2*:73–82.

Zêzere.J-L, Henriques.C-S, Garcia.R.A-C, Piedade.A, (2009); "Effects of landslide inventories uncertainty on landslide susceptibility modelling; In *book: Landslide Processes: From Geomorphologic Mapping to Dynamic Modelling. Edition: Strasbourg; Publisher: CERG Editions; Editors: Mallet, J.-P.; Remaitre, A.; Boggard. Project: FORLAND - Disastrous floods and landslides in Portugal: driving forces and applications for land use planning (PTDC/ATP-GEO/1660/2014)*.

Zêzere.J-L, Reis.E, Garcia.R, Oliveira.S, Rodrigues.M-L, Vieira.G-I, Ferreira.A-B, (2004);"Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslide hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal)". Natural Hazards and Earth System Sciences, 4, 133–146.

Zêzere.J-L, Trigo.R-M, Trigo.I-F, (2005);"Shallow and deep landslides induced by rainfall in the Lisbon region (Portugal): assessment of relationships with the North Atlantic Oscillation". *NHESS 5:* 331-344.

Zouhri.L, Lamouroux.C, Vachard.D, Pique.A,(2002);"Evidence of flexural extension of the Rifforeland: The Rharb-Mamora basin (northern Morocco)". *Bulletin de la Societe Geologique de France 173*, 509–514.

Sites consultés

http://earth.google.com/ ou https://earthexplorer.usgs.gov/

http://fr.windfinder.com/windstatistics

http://www.ign.es/ign/layoutIn/sismoFormularioCatalogo.do

https://fr.tutiempo.net/climat/ws-601050.html

https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm.

https://www.cartograf.fr/les-pays-le-maroc.php

https://www.ign.es/web/ign/portal/sis-catalogo-acelerogramas/-/catalogo-acelerogramas/search

https://www.persee.fr/doc/medit_0025-8296_1979_num_35_1_1901