



HAL
open science

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN (Rif Central, Maroc)

Mohamed Mastere

► **To cite this version:**

Mohamed Mastere. LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN (Rif Central, Maroc). Sciences de la Terre. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2011. Français. NNT: . tel-00679623

HAL Id: tel-00679623

<https://theses.hal.science/tel-00679623>

Submitted on 1 Nov 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

Mention : Risques naturels

Présentée par

Mohamed MASTERE

Préparée au sein de l'équipe GEOALEA de l'UMR
6538 CNRS, Laboratoire Domaines Océaniques,
de l'Institut Universitaire Européen de la Mer

**LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS
DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE
CHEFCHAOUEN (Rif Central, Maroc)**
Analyse Spatiale, Modélisation Probabiliste Multi-Echelle
& Impacts sur l'Aménagement et l'Urbanisme

Thèse soutenue à Brest le 10 Novembre 2011
Devant le jury composé de :

Eric Mercier

Professeur, Université de Nantes / *Président*

Olivier MAQUAIRE

Professeur, Université de Caen, Basse Normandie / *Rapporteur*

Mohamed SAHABI

Professeur, Université C. Doukkali (El Jadida, Maroc) / *Rapporteur*

Laurent GEOFFROY

Professeur, Université de Brest / *Examineur*

Yannick THIERY

Docteur ingénieur, Total Paris / *Examineur*

Brigitte VAN VLIET LANOË

Directeur de recherche CNRS, IUEM Brest / *Directeur de thèse*

Lahsen AIT BRAHIM

Professeur, Université Med V (Rabat, Maroc) / *Directeur de thèse*



Avant-propos

*Cette thèse a été effectuée en **cotutelle** entre l'Université de Bretagne Occidentale (Brest France) et l'Université Mohammed V d (Rabat Maroc) d'une part ; et dans le cadre de **l'action intégrée** N° AI-192-08, entre l'Institut Universitaire Européen de la Mer (Brest, France), et la Faculté des sciences d'El Jadida, et en **collaboration** avec la Faculté des Sciences de Rabat, l'Université Pierre et Marie Curie (Jussieu, Paris VI), et l'Université des Sciences et Technologies de Lille. Elle a été financée par une allocation de recherche EGIDE (partenariat Huber Curien Volubilis 17174P) d'une part et une bourse d'excellence du gouvernement marocain gérée par le CNRST d'autre part.*

A ma famille

A la mémoire de ma grande mère...

Remerciements

Je suis l'auteur officiel de cette thèse...eh oui...on dira que c'est la thèse de "Mohamed" et on ajoutera ensuite "Elle est bien" ou "Ce travail ne vaut pas grande chose"... Je n'en sais absolument rien de ce que l'on dira à propos de ma thèse. Mais, je sais une chose, et elle est certaine: je ne serais jamais arrivé là seulement par mes propres moyens. Certes, dans ce mémoire il y a eu énormément d'efforts, un grand investissement en temps, suffisamment de pertes, beaucoup de doutes et d'angoisses qui me sont propres... Mais dedans, il y a aussi l'enthousiasme, la sueur, la peur et des morceaux de vie d'autres personnes. Certaines d'entre elles m'ont aidé par responsabilité morale, d'autres par pur intérêt, d'autres par solidarité, mais les plus nombreux par amour ou simple amitié. Il y a aussi ceux, mais très rares heureusement, qui pour moi constituaient la cinquième roue de la charrette...voire même me mettre des bâtons dans les roues...Mais, dans ces moments finaux où le grand soulagement prend place et que j'en suis à écrire cette page, je n'ai pas envie de repenser à ces derniers. C'est pour ça que, ma première pensée va d'abord de devoir à toutes les personnes (et elles sont nombreuses !) que j'ai eu la chance de rencontrer grâce à cette expérience professionnelle mais avant tout humaine, et qui même sans avoir contribué directement à la réalisation de ce travail, ont été très importantes pour moi. Qu'elles reçoivent maintenant, tous remerciements les plus sincères, et qu'elles retrouvent ici l'expression de ma reconnaissance, ma confiance, et mon amitié.

Mes premiers remerciements s'adressent tout naturellement à mes deux directeurs de thèse :

***Brigitte Van-Vliet Lanoë** (Directeur de recherche au Centre National de Recherche Scientifique à l'Institut Universitaire Européen de la Mer) que j'ai rencontrée pour la première fois durant ma première année de Master et lors d'une mission de terrain dans la région d'Arbaoua – Moulay Bousselham), Quaternariste et stratigraphe, spécialiste des déformations périglaciaires et co-séismiques, et de la déformation récente. Elle était là quand il le fallait, elle m'a initié à l'analyse et l'interprétation géomorphologique des photos aériennes des images satellitaires et des MNT. Elle a toujours répondu présente pour mes nombreuses questions, doutes et besoins de discussions. Sans sa curiosité scientifique très positive, son encadrement enthousiaste et très pédagogique, cette thèse n'aurait pas vu le jour. Je n'oublierais de la remercier pour la grande bibliographie qu'elle a mise à ma disposition et pour de la relecture répétée de tous mes chapitres... J'ai été à la fois heureux et honoré d'avoir travaillé avec elle. Qu'elle trouve ici le terme de ma sincère gratitude et ma profonde reconnaissance.*

***Lahsen Ait Brahim** (Professeur de l'enseignement supérieur à l'Université Mohammed V et Directeur du Laboratoire Risques Géologiques Télédétection et Environnement), passionnant structuraliste, initiateur du règlement de la construction parasismique au Maroc et grand expert en risques géologiques. C'était en STU4 (deuxième semestre du cycle du DEUG) qu'il m'a initié pour la première fois au monde des SIG, de la télédétection spatiale et leur intérêt dans la prévention des risques géologiques. Ensuite, c'est après un exposé qu'il m'avait chargé de faire sur les mouvements de versants, que je vais me plonger dans cette thématique et en y réalisant mon mémoire de Master. Je le remercie de m'avoir proposé ce sujet et pour les corrections qu'il m'a faites. Il a témoigné d'une grande confiance en moi en me permettant de réaliser ma thèse en toute autonomie. Je n'oublierais les longues séances de travail. Qu'il me soit permis de lui exprimer ma profonde estime et ma sincère considération.*

***Yannick Thiery** (Docteur et ingénieur à Total Elf Paris). C'est officieusement mon troisième directeur de thèse. En effet, cette thèse n'aurait pas été aussi aboutie sans les connaissances qu'il a partagées avec moi, ses concepts, ses idées et surtout ses conseils. Spécialiste dans l'analyse, et la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de versant et la modélisation du risque par différentes méthodes et approches. Je le remercie de m'avoir accueilli et hébergé chez lui à Strasbourg et à l'EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre). C'est là qu'il m'a initié aux principales notions de la modélisation de la susceptibilité/aléa et du risque mouvements de terrain. Ma collaboration avec lui a été étroite tout au long de l'élaboration de la seconde partie de ce travail.*

Je le remercie infiniment de m'avoir consacré une grande part de son temps, et pour lui témoigner de l'honneur qu'il me fait en acceptant d'examiner ce travail.

Je tiens à remercier les membres du jury :

*Je remercie très vivement **Eric Mercier** (Professeur à l'Université de Nantes) grand spécialiste dans l'évolution géomorphologique et géodynamique des chaînes de l'Afrique du nord pour avoir évalué avant l'heure mon chapitre Géologie et pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider mon jury et d'examiner ce travail malgré son calendrier très serré.*

*Je remercie très sincèrement **Olivier Maquaire** (Professeur à l'Université de Caen Basse – Normandie), spécialiste de l'analyse morphologique et dynamique des glissements de terrain, de l'honneur qu'il me fait en siégeant dans mon jury et d'avoir souscrit à la tâche d'être rapporteur de ma thèse malgré ses nombreuses occupations.*

*Je tiens à exprimer ma gratitude envers **Mohamed Sahabi** (Professeur à l'Université Chouaïb Eddoukali d'El Jadida, Maroc) qui a permis mon intégration dans le partenariat Huber Curien Volubilis 17174 P, et a accepté sans hésitation d'être rapporteur de ma thèse malgré ses très nombreuses responsabilités.*

*Je remercie très vivement **Laurent Geoffroy** (Professeur à l'Université de Brest et à l'Institut Universitaire Européen de la Mer), structuraliste, spécialiste des marges atlantiques, d'avoir accepté de juger ce travail malgré ses nombreuses occupations.*

*Je saisis cette occasion pour exprimer ma reconnaissance à **Pascal Le Roy** responsable de l'action intégrée N° AI-192-0, que j'ai eu l'occasion de rencontrer pour la première fois à bord du Navire Océanographique "Côtes de la Manche". Il a suivi avec un grand intérêt l'avancement de ce travail. Je le remercie pour ses qualités humaines, son aide amicale et surtout lors des moments d'angoisses que l'on peut avoir dans de tels parcours.*

*J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur **Taj Eddine Cherkaoui**, Professeur à l'institut scientifique de Rabat pour ses encouragements, et surtout pour m'avoir préparé et envoyé les données sismiques du Nord du Maroc à maintes fois.*

*Je remercie infiniment Monsieur **Abd Elmoula Lefhaili**, Chef du service des Etudes et de l'Inventaire Forestier National au sein du Haut-Commissariat des Eaux et Forêts et de la Lutte Contre la Désertification, pour les données sur les essences forestières de mon secteur.*

*Je remercie **Marc-André Gutscher** pour la base de données espagnole des séismes et pour les figures qu'il m'a faites, et **Jaques Déverchère** pour ses remarques très pertinentes. Mes discussions avec vous, m'ont été d'un grand intérêt pour mieux aborder le paramètre sismicité de mon secteur d'étude.*

*Je n'oublierai de remercier les professeurs du Département des Sciences de la Terre qui à divers titres m'ont inculqué l'amour que j'ai pour les sciences de la terre. Je pense particulièrement à **Ahmed Chalouan**, et **Christian Hoepffner** avec qui j'ai été pour plusieurs fois sur le terrain.*

*J'ai une pensée très spéciale envers Professeur **Maria Snoussi** qui m'a soutenu moralement et n'a cessé de m'épauler pendant les moments d'angoisses extrêmes. Qu'elle trouve dans ces quelques mots l'assurance de ma sincère gratitude et ma profonde considération.*

*Je remercie **Abdelmajid Marzouk** Directeur de la société « Rséaux de consulting et services » qui m'a accueilli avec toute sympathie au sein de sa société et qui a témoigné d'une grande confiance en moi en me mettant à la tête de plusieurs projets.*

Je remercie **François Thézé** pour son amitié qui a débuté sur un vol Paris – Brest, sa présence et son aide ont été déterminant pour la réussite de ce travail.

Une pensée à mes nombreux amis de la **REDAL**, mes amis de l'**AMPD**, mes confrères de la géomatique à l'**AMJG**....

Un grand merci également à mes amis de Brest, je pense notamment à **Abel** sa femme **Caroline** et leur petit **Alane**, pour leur accueil et tous les dinés qu'on a pris ensemble. Je pense aussi à **Marcaurelio**, **Morgana**, **Roza**, **Ousmane** et **Athéna** pour tous les bons moments qu'on a partagés, ainsi qu'à ma collègue de bureau **Flora** et tous les doctorants et le personnel du laboratoire Domaines Océaniques...j'aurais aussi une mauvaise grâce de ne remercier **Brigitte** pour les œufs blancs de chaque lundi ☺.

A mes très nombreux amis(es) au Maroc pour lesquels (lesquelles) la liste ne sera jamais achevée, je dédie ce modeste travail. Je pense à la petite famille **Guelzime** (El Mehdi et Mariam) pour les moments inoubliables qu'on a passés ensemble, la petite famille **Arfaoui** (Rabiï et Hasnaae) et mon cher ami **Yassine** qui a pris en charge la totalité de mon séjour à Séville. Je le dédie aussi à **Abdou** mon ami et collègue de bureau à Rabat, qui m'embarquait à bord de son vélo...pour plusieurs fois ☺. Un spécial clin d'œil à **Nasreddine** mon collègue de laboratoire à Rabat, je n'oublierais jamais les longues journées continues de travailles depuis notre Master1.

A **Khalifa** et **Zahra** (mes parents) en reconnaissance de tout ce qu'ils ont consenti pour moi, et qui n'ont épargné aucun effort pour mon bien être, et pour mon éducation. Vous avez fait de moi l'homme que je suis. Mon frère **Mounir**, et mes sœurs **Maryem** et **Salwa**, pour leur amour, ainsi qu'à ma défunte grande mère je dédie cet humble travail.

A **Ayat** l'arbre de vie sur lequel je me suis appuyé depuis cette année ! Arbre qui m'a fait découvrir l'amitié et l'amour, qui discrètement m'a fait supporter cette rédaction infernale ... Merci infiniment d'être là.

A tous ceux qui me connaissent de près ou de loin je dédie cet humble travail !

Résumé

L'aléa géologique présente un axe de recherche en développement constant, les zones habitées étant de plus en plus envahissantes et les exigences pour la maîtrise des aléas étant de plus en plus fortes. Les zones de montagne sont parmi les régions concernées par différents types d'aléas. Cette étude s'est attachée à l'évaluation de la composante spatiale ou Susceptibilité de l'aléa Mouvements de terrain (MT) qui constituent l'aléa le plus important dans le Rif Nord – Ouest, Maroc. Ce travail présente une procédure en trois étapes pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrains (SMT). Neuf paramètres disponibles de prédisposition du milieu géologique (lithologie, fracturation, sismicité, gradient de pente, hypsométrie, exposition des versants, réseau hydrographique, précipitations, et occupation des sols) ont été cartographiés et hiérarchisés dans le but de mieux comprendre leurs interrelations et leurs effets respectifs dans la genèse des MT. Ensuite, la classification, l'inventaire, la description et l'analyse des MT ont été réalisés par interprétation d'images satellitaires THR associée à un travail de terrain. Enfin, la SMT a été évaluée par l'utilisation d'une approche multi-échelle (petite = 1/100 000^{ème}, moyenne = 1/50 000^{ème}, grande = 1/5000^{ème}). A petite échelle, cette évaluation a été effectuée par la combinaison de cartes d'index (CCI) où les poids et les pondérations pour chaque paramètre ont été introduits en se basant sur les données statistiques réelles afin de réduire l'aspect subjectif de la méthode. A une échelle moyenne, cette évaluation a été effectuée par l'application et la comparaison de deux approches probabilistes. Il s'agit - de l'approche bivariée de la théorie de l'évidence, et, - de l'approche multivariée des régressions logistiques ; cette seconde approche s'est avérée la plus performante à prédire la SMT à cette échelle, dans un environnement montagneux maghrébin. A grande échelle, cette évaluation a été effectuée par zonage géomorphologique effectué directement sur le terrain et puis finalisé grâce à la vision synoptique que confère l'imagerie satellitaire THR. Les différentes cartes réalisées constituent un puissant outil d'aide à la décision pour présenter, comparer et discuter des scénarios d'aménagement du territoire : aménagements urbains, ouvrages ou tracés routiers. Ces résultats s'inscrivent dans le cadre du développement durable et permettent d'atténuer les impacts socio-économiques habituellement constatés, lors de déclenchement des MT.

Mots clés : mouvements de terrain, susceptibilité, cartographie, combinaison de cartes d'index, théorie de l'évidence, régressions logistiques, analyse spatiale, SIG, modélisation probabiliste, multi-échelle, aménagement et urbanisme, le Rif, Maroc, Nord de l'Afrique.

Abstract

Geological hazards represent a research topic that is in constant development. Populated areas are ever expanding and the requirements for the control of the hazards they represent are becoming increasingly significant. Orogenic zones are among the areas affected by different types of hazards. This study focuses on the evaluation of the spatial component of the mass movement (MM) hazard which is the most common hazard in the Northwest part of the Rifain belt in Morocco. It introduces a three-step procedure to assess mass movement susceptibility (MMS). Nine contextual variables that characterize the geological environment (lithology, fracturing, seismicity, slope gradient, elevation, aspect, stream's net, precipitation and land-use) were mapped and classified in order to better understand their interrelationships and their respective effects in the onset of MM. Following this, the classification, inventory, description and the analysis of the MM were carried out by interpretation of high remote sensing data associated to the field study. Finally, MMS was assessed using a multi-scale approach (small = 1/100,000 ; mean = 1/50,000 ; large = 1/5,000). At the small scale, this assessment was carried out using an index-based approach where the rating and weighting of each parameter was introduced based on real statistical data to reduce the subjectivity of the method. At the meso-scale, this evaluation was performed by applying and comparing two probabilistic approaches. These are: (i) the bivariate weights of evidence approach (WEOA), and (ii) the multivariate logistic regression approach (LRA). LRA proved most successful in predicting MMS at the meso-scale in a North African mountain environment. At the large scale, the evaluation was conducted by geomorphological zoning during the field study and finalized by a synoptic view conferred by high remote sensing imagery. The various maps produced constitute a powerful decision-making tool to present, compare and discuss scenarios of town and land-use planning, i.e. urban planning, works or road plans. These results are part of a sustainable development framework which allows to mitigate the socioeconomic impacts that are usually noticed during the release of MM.

Key words: mass movement, susceptibility, mapping, index-based approach, weights of evidence, logistic regression, spatial analysis, probabilistic modeling, multi-scale, urbanism and land-use planning, Rifain orogen, Morocco, North Africa.

Table des matières

Avant-propos	3
Remerciements	7
Résumé	11
Table des matières	13

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE ET CONCEPTS DE BASE 21

Résumé du chapitre	21
1. Positionnement de la thèse	22
1.1. Thématique	22
1.2. Intérêt scientifique	22
1.3. Intérêt sociétal	22
1.4. Travaux antérieurs	23
1.5. Un risque calculé qui prend le dessus	24
1.6. Problématique et objectifs de la thèse	25
1.7. Organisation de la thèse	27
2. Concepts de base	28
2.1. Composantes du risque "mouvements de terrain" : susceptibilité, aléa et vulnérabilité	28
2.2. Zonage de la susceptibilité aux mouvements de terrain (SMT)	32
2.2.1. Généralités et principes	32
2.2.2. Méthodes de zonage	32
2.2.2.1. Zonage géologique	34
2.2.2.2. Zonage d'inventaire	34
2.2.2.3. Zonage heuristique (qualitatif)	35
2.2.2.4. Zonage statistique (quantitatif)	35
2.2.2.5. Zonage conceptuel (ou déterministe)	35
2.3. Apport des SIG : un environnement à multiples facettes et favorable pour une approche prédictive	36
2.4. Etapes de la modélisation de la susceptibilité sous SIG	36
2.5. Echelles d'analyse : quelle méthode pour quelle échelle ?	38
2.6. Données nécessaires	39
3. Conclusion du chapitre 1	41

CHAPITRE II : PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE 45

Résumé du chapitre	45
1. Cadre géographique géomorphologique et géologique de la province de Chefchaouen	46
1.1. Localisation géographique	46
1.2. Cadre morphologique	46
1.3. Cadre géologique détaillé	48
1.3.1. Domaine interne	50
1.3.1.1. Les Sébtides	50
1.3.1.2. Les Ghomarides	50
1.3.1.3. La chaîne ou dorsale calcaire	50
1.3.2. Domaine des nappes de flyschs	50

1.3.2.1.	La nappe pré-dorsalienne	50
1.3.2.2.	La nappe mauritanienne	51
1.3.2.3.	La nappe massylienne	51
1.3.2.4.	La nappe numidienne	51
1.3.3.	Domaine externe	53
1.3.3.1.	Zones intra-rifaines ou intra-Rif	53
1.3.3.2.	Zones Mésorifaine ou Méso-Rif	53
1.3.3.3.	Zones pré-rifaines ou Pré-Rif	54
1.3.3.4.	L'avant pays (les unités décollées et glissées)	54
1.4.	Cadre tectonique	55
1.5.	Conclusion du chapitre 2	58

CHAPITRE III : ANALYSE MORPHO-TECTONIQUE DU SECTEUR D'ETUDE 61

Résumé du chapitre	61
1. Généralités	62
1.1. Présentation de la technique	62
1.2. Finalité de la technique pour notre approche	62
2. Analyse morphostructurale du Modèle Numérique du Terrain (MNT)	63
2.1. Introduction	63
2.2. Le MNT : Définition	63
2.3. Richesse des MNT et multiplicité de leurs utilisations	63
2.4. Elaboration du MNT	64
2.5. MNT de la zone d'étude	65
2.6. Choix des ASTER GDEM à la place des SRTM	67
2.7. Estompage du MNT et anomalies morphostructurales	67
3. Analyse du réseau hydrographique en termes d'anomalies et perturbations structurales	70
3.1. Introduction	70
3.2. Principes et applications de la méthode	70
3.3. Facteurs de contrôle de forme du réseau hydrographique	70
3.4. Perturbation du réseau hydrographique	71
3.5. Anomalies du réseau hydrographique	71
3.6. Réseau hydrographique du secteur d'étude	72
3.6.1. Préparation des données	72
3.6.2. Traitement des données hydrographiques sous SAGA	72
3.6.3. Traitement des données sous ArcGis	73
3.7. Anomalies de drainage dans le secteur d'étude	74
4. Conclusion du chapitre 3	75

CHAPITRE IV : LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : CLASSIFICATION, INVENTAIRE, DESCRIPTION ET ANALYSE 79

Résumé du chapitre	79
1. Typologie et classification des mouvements de terrain	80
1.1. Typologie	80
1.1.1. Etat de l'art	80
1.2. Classification	80

1.2.1.	Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs _____	83
1.2.2.	Les glissements _____	84
1.2.2.1.	Glissement plan ou translationnel _____	85
1.2.2.2.	Glissement circulaire ou rotationnel _____	85
1.2.3.	Les écoulement, ou coulées de masses _____	86
1.2.3.1.	Coulée boueuse ou coulée de débris _____	86
1.2.3.2.	La reptation _____	88
1.2.3.3.	Le fluage _____	89
1.2.4.	Les mouvements complexes, ou mixtes _____	89
2.	Inventaire des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen _____	89
2.1.	Données de base et cadre théorique de l'inventaire cartographique des MT _____	89
2.2.	Techniques et données utilisées _____	90
2.2.1.	Etude bibliographique _____	90
2.2.2.	Les documents cartographiques existants et leur validité _____	90
2.2.3.	Les images satellitaires _____	91
2.3.	Méthodologie cartographique pour l'inventaire des MT de la province de Chefchaouen _____	92
2.4.	Les limites de la méthode : facteurs affectant la qualité d'inventaire _____	92
2.5.	Qualité de la carte d'inventaire des MT _____	95
3.	Etude de cas _____	95
3.1.	Le debris flow du Jbel Amtrass _____	95
3.1.1.	Introduction et description de l'état actuel _____	95
3.1.2.	Mécanismes de contrôles : Action conjointe de la fracturation, de la source d'eau et de la gélifraction _____	98
3.1.3.	Evolution spatio – temporelle de 1965 à 1995 _____	100
3.2.	Le glissement de Bou Halla _____	103
3.2.1.	Introduction _____	103
3.2.2.	Cadre lithologique et rôle de l'infiltration _____	105
3.2.3.	Phases de réactivation _____	107
3.3.	L'écroulement de Cherafate _____	107
3.3.1.	Introduction et cadre structural _____	107
3.3.2.	Rôle de l'héritage structural _____	109
3.3.3.	Evolution temporelle _____	110
4.	Synthèse 1 _____	110
5.	Représentativité des phénomènes inventoriés _____	112
5.1.	Introduction _____	112
5.2.	Abondance ou densité des MT _____	112
5.3.	Persistance et fréquence temporelle des MT _____	114
5.4.	Analyse statistique des phénomènes _____	115
5.4.1.	Analyse de la taille des MT (superficie) _____	116
5.5.	Pertinence des attributs : indice de confiance cartographique (ICC) _____	119
5.6.	Synthèse 2 _____	120
6.	Conclusion chapitre 4 _____	120

CHAPITRE V : LES VARIABLES PREDICTIVES : ACQUISITION, DESCRIPTION ET RELATION AVEC LES MOUVEMENTS DE TERRAIN (VARIABLE A MODELISER)

125

Résumé du chapitre _____	125
1. Les variables géologiques : Lithologie et failles _____	126
1.1. Introduction _____	126

1.2.	Carte lithologique	126
1.3.	Les failles	129
1.4.	Fracturation issue des données satellitaires	129
1.4.1.	Introduction et données utilisées	129
1.4.2.	Notion de résolution en télédétection	130
1.4.3.	Méthodologie et principaux traitements utilisés	132
1.5.	Carte de la fracturation issue des données satellitaire	132
1.6.	Carte de la fracturation issue de l'analyse morphotectonique	133
1.7.	Carte de la fracturation totale	133
1.8.	Distance par rapport aux failles ou densité de failles ?	139
1.8.1.	Carte de densité des failles	139
1.8.2.	Rôle des diaclases	140
1.8.3.	Pendage des strates	140
1.9.	Discussion : relation des facteurs géologiques avec les MT	140
1.9.1.	Relation avec les unités géotechniques et géomorphologiques	141
1.9.2.	Relation avec la fracturation	142
2.	La variable : Sismicité	145
2.1.	Introduction	145
2.2.	Le réseau télémétré Marocain	145
2.3.	Sismicité historique instrumentale	146
2.4.	Sismicité actuelle (2009 – 2011)	147
2.5.	Magnitude ou profondeur ; déclencheur ou prédisposant ?	149
2.6.	Relation séismes – précipitations	151
2.7.	Carte des isoprofondeurs	151
2.8.	Discussion : relation de la sismicité avec les mouvements de terrain	152
3.	Les variables géométriques ou topographiques: gradient de pente, altitude et expositions	155
3.1.	Introduction	155
3.2.	Gradient de pente	155
3.3.	Altitude ou hypsométrie	157
3.4.	Expositions	159
3.5.	Effet de la morphologie de la pente (courbure)	161
3.6.	Discussion : relation des facteurs géométriques avec les MT	161
3.6.1.	Relation avec la pente	161
3.6.2.	Relation avec l'hypsométrie	163
3.6.3.	Relation avec l'exposition	164
4.	La variable : réseau hydrographique	166
4.1.	Introduction	166
4.2.	Les eaux souterraines	167
4.3.	Les eaux de surface	168
4.3.1.	Document de base et type du réseau hydrographique	168
4.3.2.	Comment intégrer le réseau hydrographique ?	168
4.4.	La densité du réseau hydrographique	170
4.5.	Dynamique des eaux et dégradation des sols	171
5.	La variable : Précipitations	173
5.1.	Caractéristiques générales	173
5.2.	Analyse des données de précipitations	174
5.2.1.	Caractéristiques temporelles des précipitations	174
5.2.2.	Rôle des pluies	176
5.2.3.	Réalisation de la carte des précipitations	176
5.2.4.	Interaction avec le relief	180
5.2.5.	Rôle de l'évapotranspiration	181
5.2.6.	Rôle de la neige	182
5.2.7.	Rôle de la gélifraction	183

5.3.	L'Oscillation Nord Atlantique	183
5.3.1.	Définition	183
5.3.2.	Impacts sur les températures et les précipitations	183
5.3.3.	Impacts de la NAO sur le Maroc	184
5.4.	Discussion : relation des précipitations avec les MT	186
6.	La variable : Occupation des sols	187
6.1.	Introduction	187
6.2.	Types d'occupation des sols	187
6.2.1.	L'occupation humaine	188
6.2.2.	Types de cultures	188
6.2.3.	La forêt : essences forestières et reboisement	189
6.2.4.	Le déboisement : défrichement et incendies	192
6.2.5.	Les routes et les carrières	192
6.3.	La carte d'occupation des sols de la province de Chefchaouen	192
6.4.	Discussion : relation de l'occupation des sols avec les MT	193
7.	Conclusion chapitre 5	194

CHAPITRE VI : ZONAGE DE LA SUSCEPTIBILITE _____ 199

Résumé du chapitre _____ 199

1.	Méthodologie générale d'approche : Approche d'Analyse Multi-échelle (AAM)	200
2.	Zonation de la susceptibilité à échelle régionale (1/ 100 000) de la province de Chefchaouen par approche heuristique	202
2.1.	Sélection des paramètres générant les mouvements de terrain	202
2.2.	Méthodologie : Combinaison de cartes d'index	203
2.3.	Indexation des paramètres	204
2.4.	Résultat : Zonage de la susceptibilité à échelle régionale	206
2.5.	Qualité de la carte de susceptibilité : validation du modèle	212
2.6.	Discussion et conclusion : zonation de la susceptibilité à échelle régionale	213
3.	Zonation de la susceptibilité à méso-échelle (1/ 50 000) dans un environnement montagneux	214
3.1.	Introduction	214
3.2.	Secteur d'étude : région de Bab Taza	215
3.2.1.	Cadre géographique	215
3.2.2.	Cadre géologique et géomorphologique	216
3.3.	Rappels et principes des approches sélectionnées pour le zonage de la susceptibilité à méso-échelle	217
3.3.1.	Théorie de l'évidence (TDE) : Approche bivariée	217
3.3.1.1.	Introduction	217
3.3.1.2.	Principes de la théorie de l'évidence	217
3.3.2.	Les régressions logistiques (RL) : Approche multivariée	219
3.3.2.1.	Principes des régressions logistiques	219
3.4.	Sélection des variables	220
3.4.1.	Variable à modéliser : mouvements de terrain	220
3.4.2.	Variables prédictives : paramètres de prédisposition	220
3.4.2.1.	Théorie de l'évidence : test de l'indépendance conditionnelle	224
3.4.2.2.	Les régressions logistiques : diagnostic de colinéarité	225
3.4.2.3.	Construction des néo-variables prédictives (NVP)	227
3.5.	Zonage de la susceptibilité	228
3.6.	Susceptibilité aux glissements de terrain	229
3.6.1.	Application de la théorie de l'évidence	229

3.6.1.1.	Réalisation des simulations	230
3.6.1.2.	Carte de susceptibilité aux glissements de terrain	233
3.6.2.	Application des régressions logistiques	235
3.6.2.1.	Carte de susceptibilité aux glissements de terrain	235
3.7.	Susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris	237
3.7.1.	Application de la théorie de l'évidence	237
3.7.2.	Application des régressions logistiques	239
3.8.	Cartes synthétiques	241
3.8.1.	Théorie de l'évidence	241
3.8.2.	Les régressions logistiques	242
3.9.	Discussion et conclusion	244
4.	Zonation de la susceptibilité à grande échelle (1/ 5 000, village de Chefchaouen) par approche géomorphologique	247
4.1.	Cadre géographique	247
4.2.	Cadre géologique et géomorphologique	247
4.3.	Evaluation de la susceptibilité à grande échelle par zonage géomorphologique	247
4.4.	Discussion et conclusion	249
5.	Conclusion du chapitre 6	250
Conclusion générale		255
Utilité de nos résultats		260
Recommandations et perspectives		260
Références bibliographiques		265
Liste des figures		293
Liste des tableaux		300
Liste des annexes		303
Annexes		305

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE ET CONCEPTS DE BASE

Résumé du chapitre

Ce chapitre s'articule en deux parties. Nous replacerons d'abord cette thèse dans son contexte en abordant sa thématique et sa base scientifique puis son intérêt sociétal. Nous ferons une synthèse préalable des travaux antérieurs traitant du risque ou de l'aléa «mouvement de terrain » au Maroc. Comme ce travail traite d'autres aspects que les seuls mouvements gravitaires, nous garderons le label « mouvements de terrain » dans son sens large. Notre problématique de recherche et les objectifs de remédiation traités dans ce travail seront d'abord définis avant d'aborder l'organisation proprement-dite de ce mémoire. Une seconde partie commence par une mise au point sur la nomenclature des différentes composantes reconnues du risque «mouvements de terrain », à savoir l'aléa, la susceptibilité, la vulnérabilité, les enjeux, ce afin d'éviter les fréquents abus de langage ou les ambiguïtés. Ensuite, nous ferons un rapide état de l'art concernant les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et l'apport des SIG comme outils d'aide à l'analyse spatiale et à la compréhension des phénomènes.

1. Positionnement de la thèse

1.1. Thématique

La recherche menée dans notre travail s'inscrit dans le cadre de l'étude d'un risque naturel majeur à l'échelle du globe. Il s'agit du champ scientifique de **la géomorphologie dynamique et quantitative** portant sur la définition, et la compréhension de la composante spatiale de **l'aléa géologique** qui est **la susceptibilité mouvement de terrain** ou appelé également **susceptibilité gravitaire**. Il peut s'agir de phénomènes ponctuels, superficiels, profonds, limités dans le temps et dans l'espace, mais aussi de mouvements de grande ampleur affectant l'ensemble d'un versant (Malet, 2002) (Cf. Chapitre 4 : Amtrass ; Bou Halla ; Chrafate...). Ces mouvements de versants, le plus souvent gravitaires, constituent une famille très diversifiée et conduisent le plus souvent à l'interruption, l'endommagement ou la destruction des infrastructures et des biens causant un important préjudice socio-économique.

1.2. Intérêt scientifique

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

1.3. Intérêt sociétal

Le Maghreb, et particulièrement le Rif, est un milieu de par sa nature géologique et ses précipitations, est très susceptible aux mouvements de terrain. Le 21 février 1988, dans la ville de Fès, 52 personnes ont péri sous une masse écroulée du front d'une ancienne carrière. A Bab Taza, parmi tous les types de mouvements de terrain répertoriés et classifiés avec précision dans le nord du Maroc, la coulée de débris d'Amtrass constitue un cas d'école vue le préjudice causé au village de la région. Ce mouvement complexe et récurrent remonte au moins à la fin du 19ème siècle. Le Douar Chrafate connaît et a connu plusieurs écroulements et glissements lors de la dernière décennie, des blocs de grandes dimensions s'écroulent du Jbel Chrafate au pied d'un grand escarpement de faille actif. Ces blocs viennent de temps en temps atterrir à l'intérieur du village en détruisant la route.

Pour notre société, Les **mouvements de terrain** est un terme générique mais qui englobe en réalité plusieurs phénomènes (Cf. Chapitre 4, typologie). Le plus souvent, ils sont déclenchés par des précipitations intenses suite à un ébranlement sismique ou à l'action de l'homme comme dans le cas d'entaille des versants pour les routes. Les secteurs les plus susceptibles peuvent se caler mais sans se restreindre à celles-ci, sur les zones soumises à de grands aléas climatiques ou sismiques, mais aussi des activités anthropiques (Ledoux, 1995 ; Alexander, 1995 ; Hervas, 2003 ; Sossey Alaoui, 2005). Les questions scientifiques posées plus haut rejoignent un problème crucial de notre société : quels sont les endroits et les

secteurs susceptibles d'être réaffectés par des mouvements de terrain très dévastateurs et dommageables d'un point de vue socio-économique ? L'identification de ces secteurs est fondamentale pour les populations vivant au pied des Jbels et des versants fortement fracturés et de ce fait, se trouvent plus exposés à des mouvements de terrain de type "écroulement, éboulement et chutes de pierres et de blocs". Il ne faut oublier cependant pas, que les décideurs souhaiteraient avoir des documents de bases bien adaptés et qui les aideront dans l'orientation de l'implantation des sites d'aménagement, les nouvelles extensions urbaines, les ponts les chaussées et les tracés de nouvelles routes. Pour mieux répondre à toutes ces questions, nous modélisons la susceptibilité aux mouvements de terrain, au niveau de la province de **Chefchaouen** par **en utilisant une approche multi-échelle et en déduire les éventuels impacts sur l'aménagement et l'urbanisme.**

1.4. Travaux antérieurs

Comparé aux pays de l'occident, le Maroc doit actuellement doit doubler d'effort en matière de prévision et de prévention des risques et des mouvements de terrain en particulier, sachant que depuis longtemps déjà, la fragilité de la zone du Rif a incité les chercheurs à se pencher sur le problème posé par les mouvements de terrain dans cette région. **G. Champetier, 1987** disait à ce propos: "...pour trouver des travaux de synthèse cartographique sur les mouvements de terrain, il faut se tourner hors de France, au Maroc par exemple, avec les études de **Millies-Lacroix** sur les pentes instables du Rif...".

C'est dans les années 60, avec les plans de développement de la région du nord : Programme de Développement Economique Rural du Rif Occidental (D.E.R.R.O) et le Projet Sebou, que les responsables ont pris conscience des dégâts causés aux terrains, des dommages subis par les routes à réhabiliter en grande partie chaque année et de la masse considérable d'alluvions issues des sapements de berges ou des badlands et charriées vers les barrages. Les interventions furent de deux types : a) des travaux cartographiques de synthèse géomorphologique générale où les mouvements de terrain ne sont que très modestement représentés à très petite échelle. b) des interventions dictées par le besoin de re-talutage de routes déformées ou par l'aménagement du territoire. Se voulant rapides et peu coûteuses, elles ne se sont intéressées qu'à la partie des biens directement affectés. Ces interventions ponctuelles furent et restent l'œuvre des ingénieurs du Laboratoire Public d'Etudes et d'Essais (L.P.E.E), pour le compte de la Direction Provinciale de l'Equipement (D.P.E), de l'Office National des Chemins de Fer (O.N.C.F.)...etc.

Cependant, 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** en **1968**. 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 000^{ème}, 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 1/500 000^{ème}. Il y a relevé, en plus des zones de ravinements et érosions, les zones de solifluxion et de recul de berges par les sapements des cours d'eau. **Maurer, 1968**, dans sa thèse réalisa trois cartes hors texte. Deux d'entre elles traitent des Jbel Khizana et Sanhaja Sraïr, et sont à l'échelle de 1/50 000^{ème}. La troisième traite l'ensemble du Rif central est à l'échelle 1/300 000^{ème}. Sur ces cartes qui traitent de l'évolution géomorphologique et de la dynamique géomorphologique actuelle, les

mouvements de terrain tiennent une part "honorabile". 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 faite pour les cartes d'El Hoceima, de Taounate, de Tétouan, et de la péninsule de Tanger qui ont été préparées dans le cadre de thèse de Doctorat (Marga, 1994 ; Fares, 1994 ; El Kharrim, 2002 ; Sossey Alaoui, 2005). Najjari et Taoussi, 1987 dans un mémoire de fin d'études, ont rédigés les fiches techniques d'une trentaine de mouvements actifs recensés dans le Rif depuis 1960, pour la remise en état du réseau routier et ferroviaire affecté.

Dans notre secteur d'étude, la plus part des routes et autoroutes, ont fait l'objet de plusieurs rapports et suivis à la suite de mouvements répétés depuis le début des années 60. Dans ces études sont surtout traités les glissements et les coulées boueuses. Les écroulements, à cause de leurs périodes de préparation et d'amortissement très brèves, sont vite oubliés. Ils sont pourtant loin d'être négligeables. Les escarpements d'écroulements potentiels dominent plusieurs douars et tronçons de routes près de Chrafate, Amatrassé, Akroud, Bou Halla...etc.

En comparaison, sur le territoire français, une carte des risques naturels a été dressée depuis les années 1970. Le B.R.G.M. (Bureau des Recherches Géologiques et Minières) et le L.C.P.C. (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) qui constituent les principaux initiateurs, à la suite des dégâts causés par l'hiver rigoureux 1962-63, En 1975-1976, une quinzaine de cartes Z.E.R.M.O.S (Zones Exposées aux Mouvements du Sol et du Sous-sol) était établie. Après la carte Z.E.R.M.O.S, le concept « risques naturels », a connu un nouvel essor en France avec la loi du 13/07/1982 relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles. L'état élabore et met en application les P.E.R. (Plan d'exposition aux risques naturels prévisibles) qui définissent les zones exposées et les techniques de préventions à y mettre en œuvre tant par les propriétaires que par les collectivités ou les établissements publics. Le P.E.R approuvé par les élus locaux vaut, dans ses indications et son règlement, servitude d'utilité publique et est opposable aux tiers. Il doit être annexé au P.O.S (Plan d'Occupation des Sols) de la commune concernée. Les P.O.S sont établis à 1/5000ème, quelquefois à une plus grande échelle pour certains secteurs conformément à l'article L. 123-10 du code de l'urbanisme. La loi du 13/07/1982 crée l'obligation pour les entreprises d'assurances, d'étendre leur garantie aux biens et activités, aux effets des catastrophes naturelles.

1.5. Un risque calculé qui prend le dessus

En visualisant le terrain et les diverses unités géomorphologiques du Rif occidental, nous pouvons constater plusieurs signes des mouvements inexorables des pentes naturelles qui couvrent une grande variété de phénomènes. Tous en commun un déplacement de matériaux déstabilisés par des facteurs naturels (fortes précipitations, séismes ...).

A ces causes naturelles, il faut ajouter l'incidence des pratiques anthropiques. L'urbanisation de certaines régions (littorales ou au pied des massifs montagneux...) où se trouvent des terrains sensibles crée une surcharge statique pour des matériaux dont la stabilité est précaire. La construction de routes sur des versants pentus induit naissance à une rupture de la continuité naturelle de la pente, perturbant son équilibre. Ceci modifie les écoulements des eaux superficielles qui peuvent être acheminées vers des zones préférentielles d'infiltration (Cf. Chapitre 4, Bou Halla). Ces phénomènes complexes (mouvements de

terrain) peuvent être ponctuels, superficiels, limités dans l'espace et dans le temps mais aussi rapides et de grandes ampleurs affectant alors des versants entiers.

« Parmi les pays les plus affectés, le Japon est celui qui paie le plus lourd tribut avec 1.5 milliard de dollars de dégâts par an et une dépense de 4.4 milliards de dollars pour la mitigation (Glade, 1998). Suivent l'Italie, les Etats-Unis et l'Inde avec respectivement 1.8, 1.4 et 1 milliard de dollars de dégâts par an (Catenacci, 1992). Outre les dommages matériels, les 'mouvements de terrain' ont provoqué 800 à 1 000 victimes en moyenne par an depuis 20 ans (Aleotti et Chowdhury, 1999) et depuis 1993, 940 personnes ont été tuées chaque année, la majorité résidant au Pérou, en Chine, au Japon, en Italie et aux Etats-Unis (Alexander, 1993 ; Evans, 1997 ; Guzzetti, 2000...) » (in Thiery, 2007)

Jusqu'à la moitié du XIX^{ème} siècle les 'mouvement de terrain', surtout gravitaires, tout comme c'est le cas pour les autres risques naturels, relevaient de la fatalité et de la volonté divine (Malet, 2003). Cependant, de mémoire d'hommes ayant vécu dans des zones qui ont fait le lieu de tels phénomènes, il a été tout à fait normale qu'une certaine connaissance empirique se développent et permettent ainsi de tirer quelques règles de bon sens. Comme par exemple, ne jamais bâtir sa maison au pied d'une montagne instable. Après cette période et avec la fin du XIX^{ème} (révolution industrielle), l'homme a assisté à un grand essor scientifique et technologique qui lui a permis d'avoir une idée réelle sur la gravité d'être exposé à un risque, et s'est rendu compte du rôle crucial que peuvent jouer les scientifiques pour mettre en place une démarche permettant de prédire le risque qui menace sa sécurité afin de l'éviter.

1.6. Problématique et objectifs de la thèse

Les mouvements de terrain gravitaires (*mass movements*) font partie des risques naturels auxquels le Maroc se trouve confronté, notamment dans les régions Rifaines. Ceux-ci sont d'autant plus importants au niveau des zones faisant partie d'importants couloirs de failles, où la réactivation récente de celles-ci peut largement contribuer au déclenchement des mouvements de terrain. Les conséquences d'un tel type de phénomènes peuvent être multiples (Figure I-1) : ensevelissement et destruction d'habitations, de ponts et de routes, ainsi que des pertes de vies humaines même si elles sont rares.

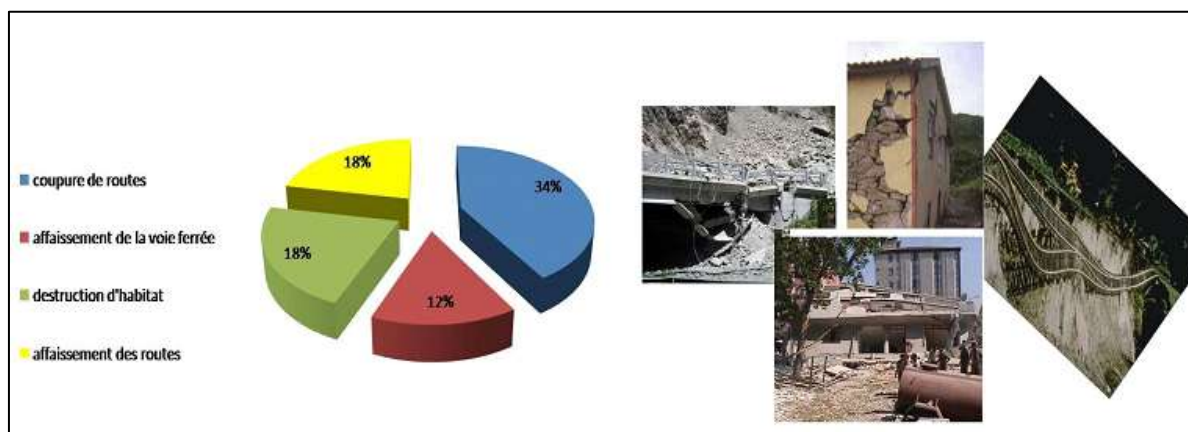


Figure I-1 : Pourcentages des dégâts causés par les mouvements de terrain dans le Rif.

De ce fait, ces aléas engendrent des pertes très coûteuses pour l'économie nationale et son développement. A titre informatif une part qui avoisine les 50% du budget total alloué

au DPTP (Directions Provinciales de Travaux Publics) au Rif se trouve chaque année destinée aux travaux de confortement, soutènement et remise en état des routes suite à de nombreux accidents destructeurs.

Des efforts d'évaluation l'aléa « mouvements de terrain » ont été menés lors des dernières années dans le Rif, mais le nombre de mouvements ne cesse de s'accroître le plus souvent aux endroits sensés être déjà étudiés (Lacroix, 1968 ; Azzouz et al., 2002 ; Fares, 1994 ; Margaa, 1994 ; El Khatabi, 2001 ; El Kharim, 2002 ; Mansour, 1998 ; Sossey Alaoui, 2005...), et définis comme étant stables. **Cela vient du fait que seules des approches qualitatives directes et basées sur la connaissance de l'analyste ont été utilisées**, pour déterminer la relation entre les mouvements de terrain observés et les facteurs de prédisposition. La contrainte majeure de ce type d'approche est **la totale subjectivité au niveau du seuillage des paramètres et de la pondération des facteurs impliqués dans le processus de mouvements, sans oublier le jugement qualitatif que en résultait pour qualifier les différents niveaux d'aléa (élevé, modéré, faible) sans aucune quantification de ces termes.**

Et c'est pourquoi, le but de ce travail a été d'analyser la susceptibilité aux mouvements de terrain en se basant sur des approches indirectes. Ces approches sont focalisées sur le couplage entre modèles statistiques et probabilistes, ce, par l'intermédiaire de différentes fonctionnalités des Systèmes d'Information Géographique, et en particulier les modules d'analyse spatiale. Les modèles statistiques utilisés sont tous basés sur l'analyse de la répartition spatiale des mouvements de terrain, considérés comme une variable dépendante ou à modéliser, en fonction des facteurs de prédisposition (fracturation, précipitation), considérés, eux, comme variables indépendantes et prédictives. Le potentiel de notre démarche découle de l'utilisation d'approche à caractère objectif et reproductible avec une quantification de la probabilité d'occurrence du phénomène étudié.

Ainsi, le cadre général de la recherche engagée est structuré autour de trois grandes questions :

- i. **Quelles sont les données nécessaires et indispensables** pour une cartographie de la susceptibilité à une échelle **régionale, moyenne et grande** dont les secteurs sont caractérisés par une morphologie et lithologie complexes ?
- ii. **Quelles sont les méthodes de cartographie les plus adaptées et appropriées pour chaque échelle d'analyse**, et permettant de réduire les incertitudes liées aux données, pour obtenir les résultats les plus fiables?
- iii. **Dans quelle mesure les forçages climatiques (précipitation), et tectonique (réactivation de la fracturation récente Mio-Plio-Quaternaire) et la sismicité** joue un rôle dans le conditionnement des mouvements de terrain au sein de la province de Chefchaouen ?

Pour ce faire les étapes qui suivent ont été tracées :

- i. **Elaborer des bases de données multi-paramètres spatialisées** adaptées et représentatives des caractéristiques des secteurs d'étude et selon l'échelle d'analyse;

- ii. **Cartographier, classifier, caractériser et analyser les mouvements de terrain hérités et actuels** à l'aide des données satellitaires optiques très haute résolution (Spot 5) associées aux photographies aériennes et aux données de la vérité terrain ;
- iii. **Cartographier les principaux facteurs de prédisposition** (lithologie, pente, fracturation, précipitation, réseau hydrographique, sismicité, occupation des sols...etc.) ;
- iv. **Analyser la relation entre les mouvements de terrain et les facteurs de prédisposition**, en se basant sur une statistique (objective) de la distribution spatiale des phénomènes inventoriés en fonction de chaque paramètre ;
- v. **Etablir une démarche d'analyse multi-échelle en sélectionnant les méthodes de cartographie les plus adaptées**, afin d'évaluer la susceptibilité aux mouvements de terrain à échelle régionale, moyenne, et large ;

1.7. Organisation de la thèse

La présente thèse est constituée de six chapitres.

Dans le **premier chapitre 'introduction'**, après avoir abordé la thématique et son intérêt sociétal, nous donnerons un aperçu sur les travaux antérieurs similaires qui ont été effectués au Maroc, avant de décrire la problématique et les objectifs fixés par cette thèse. Ensuite, nous ferons un rapide état d'art sur les méthodes d'évaluation de la susceptibilité et l'apport des SIG comme outil d'aide à la compréhension des phénomènes et à leur analyse spatiale.

Le deuxième chapitre, a été consacré à la description du cadre géographique, géomorphologique, et géologique du secteur d'étude. Dans ce sens, une synthèse du cadre lithologique et tectonique des différentes unités du secteur a été effectuée, sans oublier sa position dans la chaîne alpine du pourtour méditerranéen.

Le troisième chapitre constitue une analyse cartographique de la fracturation récente au niveau de notre secteur d'étude, en se basant sur l'analyse morphostructurale du MNT, et celle du réseau hydrographique pour en extraire les anomalies et perturbations tectoniques. Le résultat de cette cartographie sera rassemblé synthétiquement avec la fracturation extraite de données satellitaires, bibliographiques et de terrain (Cf. Chapitre 5) pour la province de Chefchaouen.

Le quatrième chapitre, dresse un état d'art sur les méthodes de classification des mouvements de terrain. Cela a permis de définir une typologie générale des mouvements de terrain rencontrés dans le domaine Rifain. Ensuite, après avoir exposé la méthodologie et les différentes techniques utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain de notre secteur et leur caractérisation, il a été prouvé que les bases de données antérieurement utilisées sont incomplètes voire erronées. J'ai ensuite mené une analyse détaillée de trois cas particuliers et représentatifs des mouvements de terrain rencontrés dans cette province. La dernière partie de ce chapitre a porté sur l'analyse de la représentativité, l'abondance, et la densité des phénomènes inventoriés.

Le cinquième chapitre, illustre le travail réalisé pour l'acquisition, la description, la hiérarchisation, la mise en forme et l'analyse des facteurs de prédisposition disponibles dans

le secteur d'étude, toute en examinant dans le détail via une analyse statistique de leur relation avec les phénomènes inventoriés.

Le sixième chapitre, présente la partie qui a été consacrée à l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain à trois différentes échelles. -1° A échelle régionale (provinciale 1/100 000) par approche heuristique par combinaison de cartes d'index ; -2° à échelle moyenne (méso-échelle 1/50 000) par deux approches d'analyse spatiale fondée sur des méthodes probabilistes à savoir : l'approche bivariée fondée sur le théorème de Bayes (Théorie de l'Evidence ou *Weight of Evidence*) et l'approche multivariée fondée sur les régressions logistiques (*Weighted Logistic Regression*). Il s'agit ici d'une démarche exploratoire où il a été possible de définir la meilleure combinaison de paramètres pour la construction de la carte de susceptibilité. Les résultats obtenus par les deux approches ont été ensuite comparés entre eux ; -3° et à échelle large (1/5000) par l'utilisation d'une approche par zonage géomorphologique.

2. Concepts de base

2.1. Composantes du risque "mouvements de terrain" : susceptibilité, aléa et vulnérabilité

Que ce soit dans la littérature ou dans le langage scientifique courant (congrès, colloques, réunions...) une confusion peut toujours exister entre le mot '*susceptibilité*' et '*aléa*' aux mouvements de terrain, et c'est aussi vrai pour les concepts anglais de '*susceptibility*' et '*hazard*'. C'est une des motivations principales de ce paragraphe qui souhaite démontrer que les deux notions ne sont que des composantes totalement différentes parmi d'autres au sein d'un même concept plus large qui est le risque.

Une des définitions les plus usuelles du *risque* (*Risk* en anglais) de mouvements de terrain est celle proposée par le l'OUNDRO, 1979 (Office of the United Nations Disaster Relief coOrdinator) qui le définit par la probabilité d'apparition, dans un lieu donné et, à un moment donné, d'un phénomène (en occurrence un mouvement de terrain gravitaire) potentiellement dangereux et susceptible de causer des dommages aux personnes et aux biens. La même définition a été reprise dans le détail par Varnes, 1984 et 1978, qui le définit comme étant le nombre estimé de pertes en vies humaines, de personnes blessées, de dommages aux biens et de perturbations de l'activité économique en raison de la survenue d'un mouvement de terrain en se référant à une zone et une période données. D'après lui, le *risque* total peut donc être quantifié par le produit de la *vulnérabilité* (*V*), le coût (*C*) des éléments du risque et la probabilité d'occurrence (*A* = *aléa*) du mouvement de terrain ce qui est représenté par la formule suivante :

$$\text{Equation.1} \quad \text{Risque} = f(A \times V \times C)$$

Ces notions ont été définies pour la première fois dans le cadre de l'analyse du *risque* au sens large du terme, et puis adaptées aux spécificités de l'évaluation du risque mouvements gravitaires (Varnes, 1984 ; Fell, 1994 ; Leroi, 1996 ; Lee et Jones, 2004 ; Bonnard et al, 2004 ; Fell et al, 2005).

Avec :

A : *Aléa* ou "*Hazard*" correspond à la probabilité d'occurrence **spatiale** (*susceptibilité*) en relation avec les paramètres environnementaux directs tels que la

lithologie, la pente, la fracturation... ; et **temporelle** liée aux facteurs environnementaux indirects tels que l'activité sismique, les précipitations ou même le comportement du réseau hydrographique. Cet **aléa** ne peut devenir risque qu'en présence d'enjeux humains, économiques et environnementaux, possédant une certaine **vulnérabilité** (fragilité). Par exemple, un mouvement de terrain qui survient dans une région montagneuse déserte et non habitée ne constitue pas un risque, contrairement à celui qui se déclenche dans un secteur peuplé, qui constitue un risque majeur et peut provoquer des dommages considérables. Sur un espace donné, un aléa est plus ou moins probable et comporte une large part d'incertitude quant à son déroulement (moment, circonstances). L'analyse scientifique de l'**aléa** comporte donc, la description de la nature du phénomène, de son intensité et de sa probabilité d'occurrence.

V : **Vulnérabilité** ou "Vulnerability" qui exprime le niveau d'effet prévisible et quantifiable d'un phénomène naturel (**aléa**) sur des enjeux (personnes, biens, équipements, environnement) susceptibles d'être affectés par le phénomène aléatoire et de subir des dommages.

C : **Coût** ou "Cost" correspond au montant des pertes causées par l'action de l'aléa sur les éléments à risque (nombre d'habitations, nombre des victimes, coût des constructions...). Le coût et la vulnérabilité dépendent essentiellement de l'intensité de l'aléa.

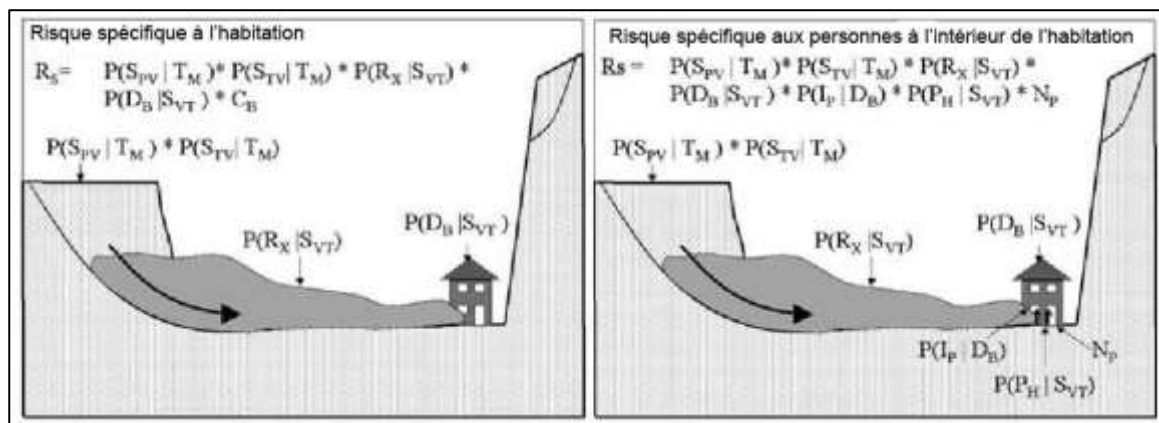


Figure I-2 : Exemples des méthodes possibles pour le calcul du risque mouvements de terrain spécifique à une habitation et aux habitants qui peuvent s'y trouver, Van Westen, 2006.

Avec : **P (SPV / TM)** = Probabilité spatiale, probabilité conditionnelle de l'initiation du mouvement de versant avec un volume, type et emplacement spécifiques, avec certains facteurs déclenchant (événements sismiques, ou pluvieux), ainsi qu'une magnitude et intensité données ; **P (SVT / TM)** = Probabilité temporelle, probabilité conditionnelle de l'initiation du mouvement de versant avec un volume, type et emplacement spécifiques, avec certains facteurs déclenchant (événements sismiques, ou pluvieux), ainsi qu'une magnitude, intensité et une période de temps données ; **P (RX / SVT)** = Probabilité conditionnelle du départ d'une masse de terrain en parcourant une distance X jusqu'à couvrir l'habitation par un volume donné lié à l'occurrence d'un mouvement de terrain donné ; **P (DB / SVT)** = Probabilité conditionnelle qu'un dommage affecte l'habitation (construction spécifique) suite à l'occurrence d'un mouvement de terrain avec un type et volume donnés ; **CB** = les coûts pour le remplacement ou la reconstruction de l'habitation ; **P (IP / DB)** = □ Probabilité conditionnelle de blessures ou de morts des personnes présentes à l'intérieur de l'habitation, en relation avec l'ampleur des dégâts subis par l'habitation suite à l'occurrence d'un mouvement de terrain de type et volume donnés par un éboulement d'un volume donné et le type ; **P (PH / SVT)** = □ Probabilité conditionnelle que des personnes soient présentes à l'intérieur de l'habitation, à un moment donné de la journée où le mouvement de terrain pourrait survenir ; **NP** = Nombre de personnes dans l'habitation.

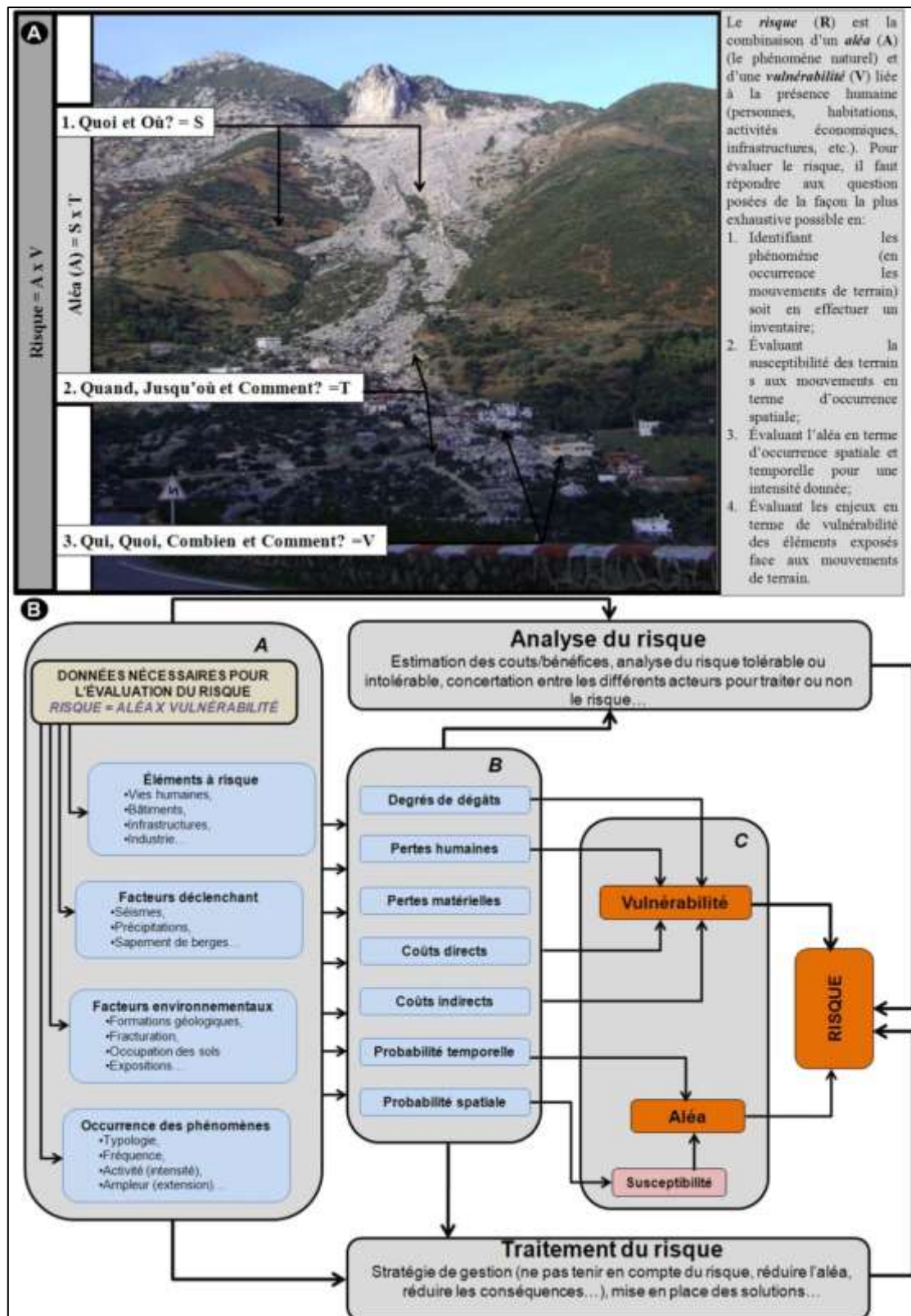


Figure I-3 : Cadre théorique de l'évaluation, et de la gestion du risque pour les mouvements de terrain. (A) : les différentes composantes de l'évaluation du risque à travers l'exemple de la coulée de pierres du Jbel Akroud (Rif Nord-Occidental, Maroc), avec S : Susceptibilité qui est fonction de la localisation des phénomènes et de leurs relations avec les paramètres intrinsèques (facteurs de prédisposition) ; T : composante temporelle de la probabilité d'occurrence qui est fonction des paramètres extrinsèques (facteurs de déclenchement) ; V : Vulnérabilité ; (B) : Système intégré d'évaluation et de gestion du risque mouvements de terrain.

Cependant, la formule (Equation.1) permettant de quantifier le risque semble être d'une simplicité qui s'avère très vite trompeuse et délicate, dès que l'on tente d'aborder un cas particulier dans son détail, tel que pour le risque appliqué à une habitation et/ou aux personnes qui s'y trouvent (Figure I-2) (Van Westen, 2006).

En résumé, un risque naturel majeur est la combinaison d'un aléa (le phénomène naturel) et d'une vulnérabilité liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, etc). Le nombre de victimes et le coût des dommages peuvent être élevés, en fonction de l'intensité, de la soudaineté et de la durée du phénomène.

Les principaux éléments pour le bon déroulement d'une démarche scientifique d'évaluation et de gestion du risque 'mouvement de terrain' sont illustrés dans la figure I-3. Celle-ci montre que la première étape à mener est l'évaluation de l'aléa, ce qui revient à déterminer la probabilité temporelle et spatiale. La première (temporelle) est basée sur les données d'enregistrements historiques (archives) dans lesquelles des corrélations entre la survenance des événements (mouvements de terrain) avec les paramètres déclenchants qui sont le plus souvent des sollicitations sismiques ou des précipitations intenses, ont été établies. Ce type de données étant très difficile à avoir même dans les pays les plus industrialisés, dissuade les cartographes (de l'aléa et du risque) d'inclure la composante temporelle de l'aléa dans la démarche du calcul du risque, et la limite dans sa composante spatiale, où appelée *susceptibilité* (*S*). Ainsi le *A* (aléa) de l'équation.1 sera remplacé par un *S* que l'on actualise dans la formule (Equation.2) du calcul du risque :

$$\text{Equation.2} \quad \text{Risque} = f(S \times V \times C)$$

Vu que nous ne disposons pas des données permettant de cartographier l'aléa, nous nous pourrions répondre à la question n°2 (Figure I-3A) et par conséquent nous nous contenterons par l'évaluation de la susceptibilité de notre secteur aux mouvements de terrain gravitaires ou non. Cela était le cas pour plusieurs auteurs (Ghosh et al., 2011 ; Pavel et al., 2011 ; Atkinson et Massari, 2011 ; Van Den Eeckhaut et al., 2011 ; Sterlacchini et al., 2011 ; Lara et Sepúlveda, 2010 ; Van Den Eeckhaut et al., 2010 ; Dong et al., 2010 ; Bai et al., 2010 ; Regmi et al., 2010 ; Nandi et Shakoor., 2010 ; Garcia-Rodriguez et al., 2008 ; Song et al., 2008 ; Yao et al., 2008 ; Nefeslioglu et al., 2008 ; Moeyersons et al., 2008 ; Thiery et al., 2007 ; Thiery, 2007 ; Greco et al., 2007 ; Malet et al., 2006, Maquaire et al., 2006 ; Ayalew et al., 2005 ; Maquaire, 2002...etc). Celle-ci, est le plus souvent obtenue par l'analyse de la relation spatiale entre les mouvements de terrain et un ensemble de facteurs environnementaux supposés être responsable de leur genèse. Une telle démarche permet de prédire les futures zones susceptibles, en essayant de trouver les aires où des combinaisons similaires de facteurs environnementaux se trouvent réunis. Pour cela, nous aurons recours à l'utilisation d'une méthode adaptée, tout en tenant compte **de l'échelle d'analyse et des données disponibles**.

Cependant, l'évaluation de la susceptibilité suppose tout d'abord, que tous les phénomènes du secteur ont été identifiés (inventoriés), et classés selon leur typologie (Cf. Chapitre 4). Cela implique aussi, qu'ils se reproduiront selon les mêmes conditions qui les ont générés dans le passé. C'est pourquoi, les paramètres les plus significatifs (facteurs de prédisposition) devraient être cartographiés, hiérarchisés, et analysés, pour pouvoir définir des pondérations relatives à chaque facteur mis en cause pour la localisation des phénomènes (Varnes, 1984 ; Carrara et al., 1995 ; Van Westen et al., 2000 ; Van Westen et al., 2003 ;

Guzzetti, 2005 ; Guzzetti et al., 2005 ; Van Westen et al., 2006). Pour ce faire, plusieurs méthodes peuvent être utilisées.

2.2. Zonage de la susceptibilité aux mouvements de terrain (SMT)

2.2.1. Généralités et principes

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

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

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

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

-4° L'évaluation de l'occurrence spatiale et temporelle des mouvements de terrain peut être effectuée par voie heuristique (analyse qualitative), probabiliste statistique, ou par l'application de modèles physiques, ce qui permettra d'aboutir à un **zonage de la susceptibilité** (ou de l'aléa) en différentes classes (niveaux) (Carrara et al., 1995 ; Soeters et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999 ; Guzzetti, 2005).

2.2.2. Méthodes de zonage

Au regard de la littérature, les méthodes d'évaluation de la susceptibilité (ou de l'aléa) et de la hiérarchisation (pondération) proposées peuvent généralement être divisées en deux groupes : -1° **qualitatives ou quantitative**, et -2° **directes ou indirectes** (Varnes, 1984 ; Carrara et al., 1995; Hutchinson, 1995; Soeters et Van Westen, 1996 ; Van Westen et al., 1997 ; Aleotti and Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999 ; Gorsevski et al., 2003 ; Guzzetti, 2005...etc). Les méthodes **qualitatives** sont subjectives et évaluent la susceptibilité d'une

façon descriptive en se basant sur les connaissances du géologue de terrain, et caractérisent les niveaux de susceptibilité selon la perception de l'analyste, alors que les méthodes **quantitatives** assignent les niveaux de susceptibilité par voie numérique (calcul automatique de la probabilité).

Quant aux méthodes **directes**, la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain s'effectue directement par simple zonage et interprétation géomorphologique sur le terrain, via les images satellitaires ou par interprétation des photos aériennes (Verstappen, 1983 ; Nossin, 1989). Elles sont cependant assez souvent (mais pas nécessairement) associées à une cartographie d'inventaire des mouvements de versants.

Les méthodes **indirectes** semblent être les plus pragmatiques, raison pour laquelle nous en avons sélectionné deux approches pour la modélisation de la susceptibilité à méso-échelle (Cf. Chapitre 6). Elles s'organisent généralement en cinq étapes :

- 1- la reconnaissance et la cartographie des mouvements de terrain du secteur concerné par l'analyse (*training area*), pour aboutir à une carte d'inventaire ;
- 2- l'identification et la cartographie des paramètres physiques, impliqués directement ou indirectement dans l'occurrence des instabilités des versants ;
- 3- l'estimation (par pondération) de l'importance relative de chacun de ces paramètres dans la genèse des mouvements ;
- 4- le zonage du secteur en différents niveaux de susceptibilité ;
- 5- l'évaluation de la qualité du modèle appliqué.

	<i>Directe</i>	<i>Indirecte</i>	<i>Qualitative</i>	<i>Quantitative</i>
Zonage géomorphologique	✓		✓	
Zonage heuristique		✓	✓	
Zonage par inventaire		✓		✓
Zonage statistique		✓		✓
Zonage conceptuel		✓		✓

Tableau I-1 : Caractéristiques des approches proposées dans la littérature pour le zonage de la susceptibilité aux mouvements de terrain, Van Westen et al, 1997 ; Guzzetti, 2005 ; adaptée.

En conclusion de cette introduction ; et en partant de la littérature (Varnes, 1984 ; Carrara et al., 1995; Hutchinson, 1995; Soeters et Van Westen, 1996 ; Van Westen et al., 1997 ; Aleotti and Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999 ; Gorsevski et al., 2003 ; Guzzetti, 2005...etc) ; les approches les plus souvent utilisées pour l'évaluation de la susceptibilité et issues des deux familles que l'on a décrite, sont au nombre de cinq (Tableau VI-1) : -1° zonage par approche de cartographie géomorphologique ; -2° zonage par approche d'analyse de l'inventaire des phénomènes ; -3° zonage par approche heuristique ; -4° zonage par

approche statistique ; -5° zonage par approche des processus de modèles conceptuels (déterministes) (*Process based conceptual models*).

Il est lieu de mentionner que les différentes méthodes seront décrites très succinctement. Le détail de chaque famille d'approches ou les méthodes qui s'y apparentent, est largement décrit dans la littérature (Campbell, 1973 ; Wright et al., 1974 ; Humbert, 1977 ; Nilsen et Brabb, 1977 ; Carrara et al, 1978 ; Pomeroy, 1979 ; Godefroy et Humbert, 1983 ; Kienholz et al., 1983 ; DeGraff, 1985 ; DeGraff et Canuti, 1988 ; Carrara, 1988 ; Neeley et Rice, 1990 ; Montgomery et al., 1991 ; Pachauri et Pant, 1992 ; Van Westen, 1993 ; Guzzetti et al., 1994 ; Hansen et al., 1995 ; Carrara et al., 1995 ; Sarkar et al., 1995 ; Soeters et Van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; Pachauri et al., 1998 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Bulut et al., 2000 ; Parise et Jibson, 2000 ; Ardizzone et al., 2002 ; Lee et al., 2002 ; Cardinali et al., 2002 ; Chau et al., 2003 ; Moreiras, 2004 ; Liu et al., 2004 ; Reichenbach et al., 2005 ; Guzzetti, 2005 ; Moreiras, 2005 ; Van Westen et al., 2006...etc).

2.2.2.1. Zonage géologique

Un zonage par cartographie géologique et géomorphologique est une méthode **directe** et **qualitative** (Tableau VI-1) pour l'évaluation de la SMT¹, et qui est repose sur l'habilité du géologue à reconnaître les versants potentiellement instables, les conséquences qui peuvent résulter de leur évolution (Humbert, 1977 ; Godefroy et Humbert, 1983 ; Kienholz et al., 1983 ; Hansen et al., 1995 ; Pachauri et al., 1998 ; Cardinali et al., 2002 ; Reichenbach et al., 2005) ; ce zonage peut être basé sur une photo-interprétation ou des travaux directement effectués sur le terrain (Van Westen, 1993 ; Guzzetti, 2005). Il s'agit donc d'une approche qui permet d'évaluer la susceptibilité (et ou l'aléa) d'une façon rapide et en prenant en considération plusieurs facteurs. Cependant, cette méthode, étant basée sur l'avis du spécialiste du terrain, ce qui montre que celle-ci peut changer d'un géologue à un géomorphologue ou à un pédologue, relevant d'une grande subjectivité intrinsèque. A ce même propos Ardizzone et al., 2002 ; démontre que trois zonages différents pour l'aléa ont été obtenus par trois géomorphologues, et ce pour une même zone à la ville de Perugia en Italie.

2.2.2.2. Zonage d'inventaire

Cette méthode permet le zonage de la SMT en se basant sur la distribution des mouvements passés. L'exemple le plus simple d'une telle approche, est celui de la construction d'une carte de densité des MT²(Cf. chapitre 4, Figure IV-27). Cela montre qu'il s'agit donc d'une méthode **indirecte** avec des résultats **quantitatifs** (Tableau VI-1) (Campbell, 1973 ; Wright et al., 1974 ; Pomeroy, 1979 ; DeGraff, 1985 ; DeGraff et Canuti, 1988 ; Guzzetti et al., 1994 ; Bulut et al., 2000 ; Parise et Jibson, 2000 ; Chau et al., 2003 ; Moreiras, 2004 ; Guzzetti, 2005). Cependant, étant basée seulement sur les phénomènes inventoriés, cette méthode peut relever de plusieurs incertitudes liées au processus d'inventaire, la complexité des phénomènes, et au fait qu'elle n'intègre en aucun cas l'effet des facteurs géo-environnementaux (Ardizzone et al., 2002 ; Guzzetti, 2005).

1 : SMT : Susceptibilité aux Mouvements de terrain.

2 : MT : Mouvements de terrain.

2.2.2.3. Zonage heuristique (qualitatif)

Ce type de zonage de la SMT nécessite la connaissance à priori des facteurs intervenant dans la genèse des MT de la zone d'étude. Il est qualifié d'**indirect**, et généralement **qualitatif** (Tableau VI-1) puisqu'il sa qualité dépend largement du degré de compréhension des processus géo(morpho)logiques du secteur en question par le cartographe. Les facteurs environnementaux sont classifiés, hiérarchisés et pondérés en fonction de leur importance (ou contribution) estimée dans la formation d'un MT. Les trois dernières étapes font que les résultats du zonage de la susceptibilité, d'une part, et la délimitation des zones instables par démarche heuristique, d'autre part, soient subjectives (Nilsen et Brabb, 1977 ; Neeley et Rice, 1990 ; Montgomery et al., 1991 ; Pachauri et Pant, 1992 ; Sarkar et al., 1995 ; Pachauri et al., 1998 ; Lee et al., 2002 ; Liu et al., 2004 ; Moreiras, 2005 ; Guzzetti, 2005). Cependant, Van Westen et al., 1997, affirme que la subjectivité apportée par le cartographe lors de la classification et la pondération des paramètres, n'a toujours pas une mauvaise influence sur la qualité des résultats, notamment dans le cas d'une bonne connaissances des paramètres environnementaux. Cependant, **l'approche par processus analytique hiérarchique (AHP), et l'approche par combinaison de cartes d'index constituent deux exemples majeurs du zonage heuristique.**

2.2.2.4. Zonage statistique (quantitatif)

Le zonage par approche statistique de la SMT est basé sur la définition et description des relations statistiques et fonctionnelles entre les facteurs contributifs à la genèse des MT et la distribution spatiale des MT observés (hérités et actuels) (Carrara et al, 1978 ; Carrara, 1988 ; Van Westen, 1993 ; Carrara et al., 1995 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Leroi, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Van Westen et al., 2006). Il s'agit donc d'une méthode **indirecte** qui donne des résultats **quantitatifs** (Tableau VI-1) pour évaluer la susceptibilité (et/ou l'aléa) au MT.

Au vue de la littérature (75%), deux grandes méthodes semblent être les plus utilisées sur les dernières 20 années, et il s'agit de : -1° l'approche **bivariée** (méthodes bayésiennes, méthodes des fonctions favorables...etc) et -2° celle **multivariée** (régressions logistiques, régressions multiples...etc), toutes les deux basées sur le même principe, où la distribution spatiale des MT est déterminée pour les différentes classes de chaque facteur contributif, et ce par l'obtention d'une pondération (**objectivement**) pour chaque facteur à l'aide de calculs algorithmiques précis. Une fois obtenus, les résultats sont appliqués aux sites actuellement stables mais susceptibles de connaître une rupture dans le future.

2.2.2.5. Zonage conceptuel (ou déterministe)

Le zonage par approche conceptuelle appelé en anglais «*Process based models*» ou «*deterministic or physically based models*» est basé sur la compréhension des lois physiques régissant la stabilité des versants. Ces dernières étant non disponibles, ou très difficilement quantifiables comme le cas du calcul du risque (Figure I-2) les modèles physiques de base se trouvent simplifiés, et sont dès lors appelés modèles conceptuels (Guzzetti, 2005). Il s'agit de méthodes **indirectes** et **quantitatives** (Tableau VI-1), fournissant des résultats adéquats ou non pour l'évaluation de la susceptibilité (et ou de l'aléa), tout dépend de la finalité de la carte à obtenir. Le zonage conceptuel (à base déterministe ou physique) est beaucoup plus adapté pour l'étude d'un type spécifique de MT, ou d'investiguer l'effet spécifique d'un des

paramètres déclenchant qui peut correspondre par exemple à la sismicité, précipitations, ou autre.

2.3. Apport des SIG : un environnement à multiples facettes et favorable pour une approche prédictive

L'objectif ultime d'un SIG (annexe 1) est de permettre la mise en place d'un support pour une prise de décision fondée sur des données spatiales, ce qui revient à prédire (ou envisager) le comportement, ou l'occupation, l'évolution, ou le devenir...d'une zone géographique donnée. Tel est le cas pour les cartes de susceptibilités dont la réalisation constitue une partie de cette thèse, et qui permettront d'orienter les futurs sites d'extension urbaine et les tracés de nouvelles routes...en fonction du comportement futur des versants (l'occurrence des mouvements de terrain). Cela montre que les SIG constituent un outil incontournable, et justifie leur utilisation pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa 'mouvements de terrain', puisqu'ils permettent de combiner (en plus de la superposition, des analyses, des requêtes...) des données et métadonnées indicatives (couches) de différents types (matricielles, vectorielles) et différentes sources dans une base unifiée et homogène, pour anticiper la variation spatiale d'un phénomène donné comme les mouvements de terrain (dans notre cas), variations météorologiques, variations eustatiques...etc.

De telles démarches ont été rendues possibles, car les SIG sont conçus pour rassembler (stocker), créer, numériser, mettre à jour régulièrement et aisément...etc. Toutes ses étapes et bien plus d'autres ont été utilisées lors du chapitre 4 pour l'inventaire des mouvements de terrain, la définition de leurs caractéristiques (types, tailles, superficies, périmètres...) et leur analyse (densité, persistance, fréquence...) ainsi que leur superposition sur d'autres cartes d'inventaire pour évaluer la qualité de cet inventaire. Les mêmes étapes ont été abordées dans le chapitre 5 pour l'acquisition, la description des variables prédictives, ainsi que la caractérisation de leur relation avec les mouvements de terrain. A tout cela s'ajoute le large éventail d'extensions et de codes de calculs qui sont disponibles sous des interfaces différentes comme l'extension *ArcSDM* pour *ArcView 3.x*, *ArcGis 9.3*, ou *ArcGis 10* dans notre cas. Il s'ajoute aussi la possibilité aisée d'affichage 2 et 3D sans oublier la quatrième dimension qui est le temps, permettant d'effectuer des études multi-temporelle (exemple Amtrass, Cf. chapitre 4)

Dans un environnement SIG, l'utilisateur peut améliorer les modèles de calcul par les diverses méthodes d'ajustement des données d'entrée. Il peut procéder à plusieurs analyses de sensibilité des modèles et optimiser les résultats par des procédures d'essais et vérification. Cela permet d'améliorer progressivement la qualité et notamment la précision. Il peut aussi comparer ses modèles entre eux par des procédures de superposition ou de croisement pour choisir plus facilement le modèle le plus adapté à son site de recherche.

2.4. Etapes de la modélisation de la susceptibilité sous SIG

Décrire les différentes étapes pour la modélisation de la susceptibilité aux mouvements de terrain à l'aide d'un SIG peut paraître très long, mais indispensable pour la compréhension de la suite logique des processus. **La première des étapes est de se fixer une ou des échelles de travail et la définition des méthodes adaptées** (voir plus loin, paragraphe 5), suivie par la **collecte des données existantes** (cartes géologiques, géomorphologiques, topographiques, ou toute autres carte thématique, rapports, données bibliographiques...etc). Dans une seconde

étape, l'interprétation des données de la télédétection spatiale satellitaire et aéroportée est conduite et est complétée par des missions de contrôle sur le terrain pour réaliser :

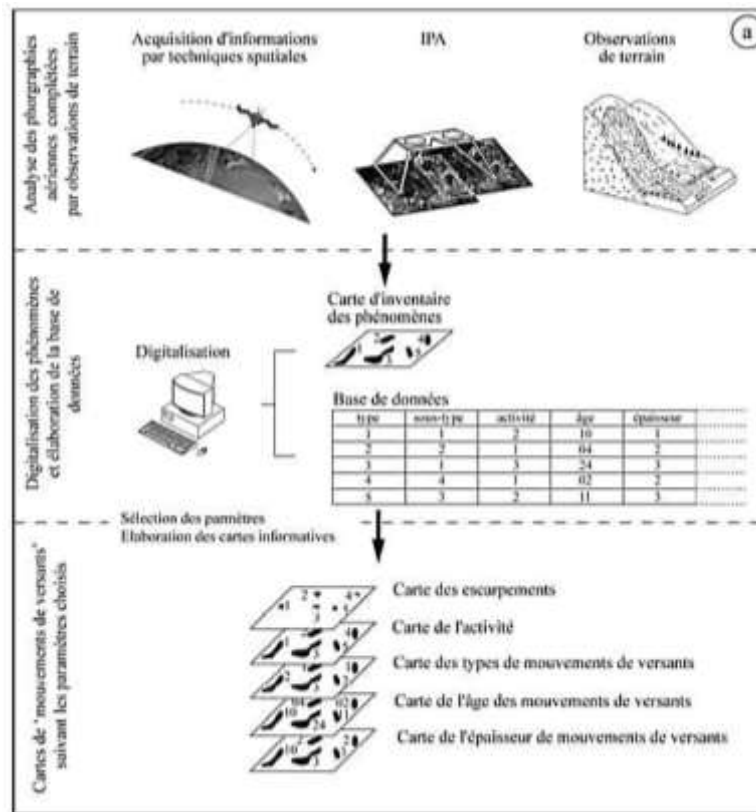


Figure I-4 : Etapes pour une cartographie d'inventaire sous SIG (Adaptée par Thiery, 2007, de Van Westen, 1993 ; et Soeters et Van Westen, 1996).

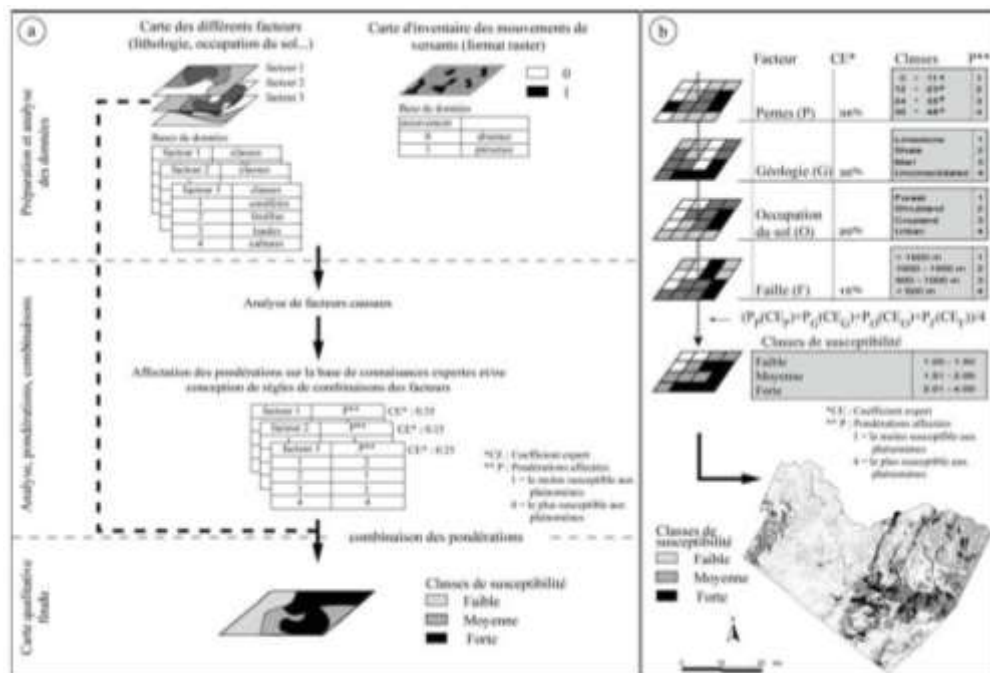


Figure I-5 : Exemple de cartographie de la susceptibilité sous SIG par l'utilisation d'une approche quantitative indexée ; a : Stratégie par SIG (Adaptée par Thiery, 2007, de Van Westen, 1993 ; et Soeters et Van Westen, 1996) ; b : Exemple de carte qualitative indexée (Adaptée par Thiery, 2007, de Wachal et Hudak, 2000).

-1° L'inventaire des phénomènes (Cf. chapitre 4) (mouvements de terrain ou appelés variable à modéliser) hérités et actuels du secteur en question, et où chaque phénomène est distingué selon son type et son activité. La figure I-4 retrace un exemple d'inventaire de mouvements de terrain à l'aide des SIG ;

-2° La cartographie des paramètres les plus significatifs (Cf. chapitre 5) (**facteurs conditionnant**) et leur analyse. En parallèle la structuration d'une base de données et de sa métadonnée est effectuée ainsi que son géocodage, sans oublier la possibilité d'ajout de nouvelles données en entrée (*input data*). Toutes les étapes que l'on vient d'énumérer doivent être validées, et les données qui en résultent, doivent être transformées au format adéquat pour leur exploitation informatique.

Enfin **-3° La définition des pondérations relatives** (en respectant les lois de la méthode utilisée) **pour chaque facteur** causal pour la localisation des phénomènes, ce qui définit la relation entre la distribution spatiale des phénomènes et les facteurs intervenant dans leur genèse, afin d'aboutir au produit ultime qui est **la carte de susceptibilité**. Un exemple d'obtention d'une carte de susceptibilité par combinaison d'index sous SIG est illustré par la figure I-5.

2.5. Echelles d'analyse : quelle méthode pour quelle échelle ?

Définir l'échelle d'analyse, est la toute première étape de tout travail de cartographie (ou évaluation) de la susceptibilité (et/ou de l'aléa), comme nous l'avons précisé précédemment (Cf. paragraphe 3). Pour ce faire, il faut se poser deux questions principales : **-1° Quelle est la précision (finalité) des résultats à obtenir ?**, et **-2° quels sont les moyens disponibles pour la réalisation de l'étude ?** Après quoi, il faut et il est désormais possible de sélectionner la méthode (ou les méthodes) adaptée(s). Cependant, les premières échelles d'analyse ont été fixées initialement par l'Association Internationale des Géologues Ingénieurs (IAEG, 1976). Ces dernières au nombre de quatre, ont été reprises par Van Westen, 1993, où on distingue :

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

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

- Echelle nationale : $1/1\ 000\ 000$:
- Echelle régionale : $1/100\ 000$ à $1/500\ 000$
- Echelle moyenne : $1/25\ 000$ à $1/50\ 000$
- Echelle large : $1/15\ 000$ à $1/5\ 000$
- Echelle locale : $1/1\ 000$ à $1/5\ 000$

Le Tableau I-2 constitue une synthèse portant sur l'utilisation des cartes de susceptibilité (et/ou d'aléa) aux mouvements de terrain pour les différentes échelles que l'on

vient d'énumérer ainsi que les méthodes adaptées pour celles-ci. Cependant, d'après [Maquaire, 2002](#), les différentes approches et méthodes disponibles pour l'évaluation de la susceptibilité et/ou de l'aléa, présentent toutes et sans exception des avantages et des inconvénients comme résumé dans le Tableau I-3.

Échelle	Utilisation	Méthodes adaptées
Échelle nationale 1/ 1 000 000	Cette échelle est utilisée pour délimiter rapidement les régions soumises à de potentiels mouvements de terrain. Les cartes obtenues sont exploitées essentiellement par les agences nationales d'aménagement des territoires, d'urbanisme et d'agriculture...etc. Elles couvrent de très grands étendus de l'ordre de 100 000Km ² et plus, en indiquant les régions où de très nombreux mouvements de terrain peuvent avoir lieu.	Très peu d'approches sont appropriées à cette échelle d'analyse, parmi lesquelles on cite le zonage par inventaire des phénomènes, ou aussi la des cartes de densités de mouvements de terrain. D'après Thiery, 2007 , les cartes d'inventaire nationales sont très rares, et quand elles existent les différents types de phénomènes n'y sont pas représentés.
Échelle régionale 1/ 100 000 à 1/ 500 000	Les cartes de susceptibilité et/ou de l'aléa à cette échelle sont utilisées principalement par les agences des bassins versants, les directions d'urbanisme, d'aménagement de territoires...etc. Elles couvrent des étendus de 1000Km ² au minimum, et sont utilisées en première approximation dans la prise de décision pour les plans d'aménagement, d'extensions urbaines (villes et villages), ainsi que pour les tracés de routes régionales et provinciales.	Les méthodes adaptées sont de deux types: Les méthodes heuristiques (par combinaison de carte d'index, ou par AHP...etc), et aussi les approches statistiques notamment les multivariées d'entre elles méthodes les plus adaptées sont les méthodes statistiques. La méthode par recherche de fréquence des précipitations semble être aussi utilisable à cette échelle comme Thiery, 2007 , l'a souligné.
Échelle moyenne 1/ 25 000 à 1/ 50 000	Les cartes obtenues sont utilisées en premier lieu par les agences municipales et intermunicipales, les agences des travaux publics et les sociétés s'occupant des études de faisabilité pour de nouvelles villes et la mise en place de routes, autoroutes et chemin de faire. Elle sont aussi primordiale avant toute réalisation de grands ouvrages d'art tels que les ponts, viaducs, tunnels, barrages, phares... etc, ce qui nécessite plus de détail que dans les échelles précédentes. A cette échelle les cartes couvrent des secteurs de plusieurs centaines de Km ² , ou de l'ordre de 600Km ² en moyenne dans notre cas, puisqu'elles sont calées sur les cartes IGN à 1/ 50 000.	Les approches statistiques sont très bien adaptées pour cette échelle d'analyse surtout si un large jeu de données en entrée est disponible, et parmi ces méthodes on cite les méthodes bayésiennes, les régressions logistiques, logistiques floues, pondération de l'information, le réseau de neurones artificiels...etc. En cas de jeux de données réduits, les méthodes heuristiques comme le zonage par combinaison de cartes d'index, ou le zonage par analyse hiérarchique multicritère peuvent être utilisées.
Échelle large 1/ 15 000 à 1/ 5 000	Ce sont les autorités et les agences s'occupant de travaux d'infrastructures détaillés qui se servent de telles cartes. Elles sont indispensables et précèdent tout projet de construction de logements et d'évaluation du risque à l'échelle de villes et villages, puisque la carte devrait indiquer d'une façon absolue les différentes classes de susceptibilité (et/ou d'aléa) pour les différentes unités de terrain. Ces cartes couvrent des zones de l'ordre de quelques à plusieurs dizaines de Km ² .	Le zonage par approches conceptuelles (déterministes, géotechniques, précipitation critiques...etc) est bien adapté à cette échelle où de très petits phénomènes peuvent être repérés ce qui relève d'un grand détail comparé aux échelles précédentes. Le zonage par approche géomorphologique et celui par combinaison de cartes d'index est très bien adapté comme Thiery, 2007 , l'a confirmé.
Échelle locale 1/ 1 000 à 1/ 5 000	Il s'agit d'une échelle très détaillée dont les cartes sont utilisées par les agences municipales (ou communales) et les sociétés qui s'occupent de l'évaluation du risque ou la réalisation d'un projet d'ingénierie individuel et à l'échelle d'un site précis qui ne dépasse pas quelques hectares de superficie. Les cartes obtenues matérialisent très finement le niveau de susceptibilité (et/ou d'aléa) pour chaque parcelle du secteur.	Les méthodes déterministes et surtout les géotechniques d'entre elles sont exclusivement les plus bien adapté, notamment en présence de plusieurs informations en provenances de tests géotechniques ponctuels, les mesures des variations hydrologiques et hydrogéologiques. Le zonage par approche géomorphologique semble aussi être utilisable (Thiery, 2007).

Tableau I-2 : Echelles d'analyses de la susceptibilité (et/ou de l'aléa) aux mouvements de terrain, utilisation et approches adaptées.

2.6. Données nécessaires

Nombreuses sont les données nécessaires pour l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité (et/ou de l'aléa), mais peuvent être résumées en deux grands groupes. Le

premier désigné sous le nom de **la variable à modéliser** correspond aux mouvements de terrain, leur inventaire, classification et caractérisation (Cf. chapitre 4). Cela implique l'utilisation d'une multitude de données et techniques (cartes thématiques, images satellitaires, photoaériennes, stéréoscopie, PIAO...).

Approches	Avantages	Inconvénients	Echelle			
			R	M	L	Loc
Stabilité d'un versant et zonage géotechnique approche déterministe – Facteur de sécurité (<i>Deterministic approaches – safety factor</i>)	Méthodologie objective et quantitative Demande des investigations et des mesures détaillées des paramètres géotechniques	Besoin de connaissances très détaillées de la zone étudiée L'utilisation des modèles géotechniques adaptés requiert une grande expérience Ne prend pas en compte des incertitudes variables	Na	Na	Re	Op
Stabilité d'un versant et zonage géotechnique Approche probabiliste (<i>probabilistic approaches</i>)	Permet de prendre en considération différentes incertitudes. Méthodologie objective et quantitative Fournit de nouveaux aperçus impossibles avec les méthodes déterministes	Requiert beaucoup de données Les distributions des probabilités sont difficiles à analyser pour de faible niveau d'aléa	Na	Na	Re	Op
Déformation d'un versant, modèle rhéologique et couplage	Fournit les champs de pression et de déformations. Permet les simulations et la prise en compte des interactions avec les ouvrages d'art, etc.	Requiert beaucoup de données, codes de calcul, paramétrisation, problème des interfaces, gestion des discontinuités, etc.	Na	Na	Na	Op
Zonage qualitatif Analyse géomorphologique (<i>field geomorphological analyse</i>)	Permet une évaluation rapide tenant compte d'un grand nombre de facteurs	Méthodologie totalement subjective utilisant des règles implicites qui empêchent une analyse critique des résultats	Na	Re	Op	Op
Zonage qualitatif Combinaison de cartes d'index (<i>combination of index maps</i>)	Résout le problème des règles cachées Totale automatisation des étapes Standardisation de la gestion des données	Subjectivité dans l'attribution des poids des valeurs des classes élémentaires de chaque paramètre	Re	re	Op	Op
Zonage statistique Analyse statistique (bi-variée et multi-variée) (<i>statistical analyse - bivariate and multivariate</i>)	Méthodologie objective Totale automatisation des étapes Standardisation de la gestion des données	Collecte systématique et analyses des données des différents facteurs sont assez encombrants	Op	Op	re	Re
Zonage dynamique Modèle dynamique spatialisé	Fournit les champs de pression et de déformations. Permet les simulations	Requiert beaucoup de données, codes de calcul, paramétrisation, problème des interfaces, gestion des discontinuités, etc.	Na	Na	Op	Op
Zonage dynamique Réseaux de neurones (<i>neural network</i>)	Méthodologie objective Ne demande pas une connaissance théorique sur les aspects physiques des problèmes	Difficulté dans la vérification des résultats quand des données instrumentales ne sont pas disponibles	Na	Na	Re	Op
Avec : Échelle : R (régional) ; M (moyenne) ; L (large) ; Loc (locale) Utilisation : Re (restrictive) ; Op (optimale) ; Na (non adaptée)						

Tableau I-3 : Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de l'aléa à différentes échelles (Adaptée par Maquaire, 2002 d'Aleotti et Chowdhury, 1999).

Le second groupe est désigné sous le nom **des variables prédictives** correspondant aux facteurs intervenant dans la genèse des mouvements de terrain. Ces facteurs peuvent être déclenchant (sollicitations sismiques, précipitations accrues...), ou prédisposant (gradient de pente, caractéristiques géotechniques, occupation des sols...). Les variables prédictives peuvent cependant être subdivisées en plusieurs sous-groupes et faire appel à plusieurs données, outils et techniques pour leur acquisition, traitement et description (Cf. chapitre 5).

En outre, il est lieu de signaler que le nombre de ces données (variables) varie en fonction de l'échelle d'analyse et de l'approche méthodologique utilisées, comme c'est illustré dans la figure I-6. Ces données étant sélectionnées pour la cartographie de la susceptibilité (et/ou de l'aléa) mouvements de terrain pour un secteur donné, doivent être complétées et homogénéisées en fonction de l'échelle de travail. C'est-à-dire, toutes les couches d'information devraient avoir la même échelle du travail, elle-même fonction de l'échelle d'analyse (Cf. paragraphe précédent). Autrement dit, toutes les données ont le même système de spatialisation (projection), et aussi la même taille du pixel. La dernière information à préciser, est l'approche à adopter.

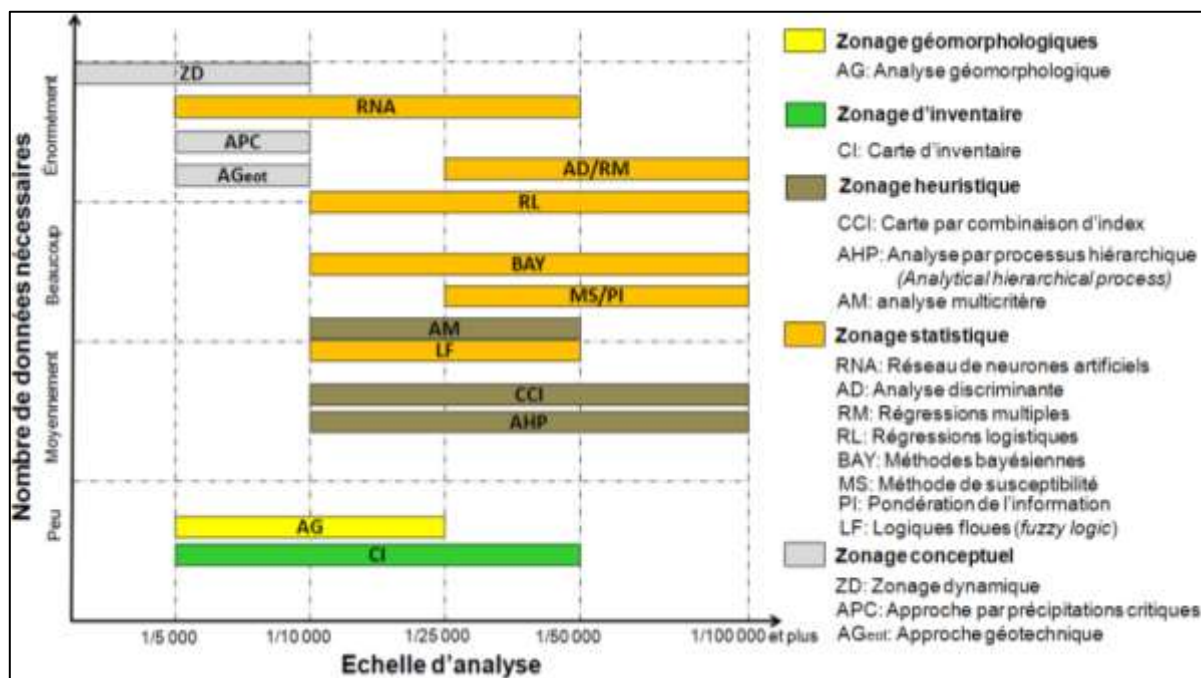


Figure I-6 : Classification des approches de zonage de la susceptibilité (et/ou de l'aléa) adaptées en fonction de l'échelle du travail et du nombre de données nécessaires, Thiery, 2007, adaptée.

3. Conclusion du chapitre 1

Ce chapitre introductif se partage en deux grandes parties. La première, a été destinée à replacer cette thèse dans son contexte thématique, en abordant son intérêt scientifique et sociétal. Elle a fait le lieu aussi d'une synthèse sur les différents travaux antérieurs sur le risque ou l'aléa mouvements de terrain qui ont été effectués au Maroc. De même, nous avons positionné notre problématique et les objectifs fixés par ce travail pour y remédier, avant de décrire l'organisation de ce mémoire.

La seconde partie a débuté par mettre le point sur la nomenclature des différentes composantes du risque mouvements de terrain, à savoir, l'aléa, la susceptibilité, la vulnérabilité, les enjeux... etc, pour éviter un certain nombre d'ambiguïtés et abus de langage trop souvent observés. Ensuite, une synthèse succincte sur les méthodes disponibles pour le zonage de la susceptibilité a été réalisée, et de même pour l'apport des SIG dans la modélisation de la susceptibilité, ainsi que les étapes de cette modélisation sous SIG qui est l'outil de base pour la réalisation de ce travail. En dernier lieu, une analyse sur les différentes échelles d'analyse en fonction des données nécessaires et les approches adaptées, a été abordée. L'échelle d'analyse et l'approche à adopter dépendent généralement des moyens

économiques qui peuvent être engagés pour la réalisation d'un projet donné ou une recherche donnée.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU SECTEUR D'ETUDE

Résumé du chapitre

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

1. Cadre géographique géomorphologique et géologique de la province de Chefchaouen

1.1. Localisation géographique

La province de Chefchaouen se situe administrativement sur une partie de la région économique de Tanger – Tétouan, (Figure II-1 A et B). Cette région a comme chef-lieu la ville de Tanger et recouvre deux provinces : celle qui nous intéresse et celle de Larache. Sept cartes topographiques à l'échelle de 1/100 000 ème ont été nécessaires pour couvrir la zone d'étude (Figure II-1C) : *El Ksar El Kbir, Chefchaouen, Jebha, Beni Boufrah, Ouazzane, Zoumi, et Ghafsai*. La province est limitée au Nord par la mer d'Alboran sur une longueur d'environ 120 Km, au Sud par les provinces de Taounate et Sidi Kacem, à l'Est par la province d'Al Hoceima et à l'Ouest par les Provinces de Tétouan et Larache.

La province de Chefchaouen est l'un des secteurs les plus peuplé du Maroc nord – occidental et du bassin méditerranéen. D'après les statistiques du dernier recensement de la population Marocaine effectué en 2004, la province compte plus de 524 602 habitants dont 35 709 habitants se concentrent dans la municipalité de Chefchaouen. La province englobe 1.76 % de la population totale du Maroc (RGPH, 2004) avec une densité moyenne de 120 habitants/Km², ce qui correspond à un peuplement environ quatre fois plus élevé que le niveau national (37 habitants/Km²).

La principale ressource des habitants de la province se base sur l'agriculture, qui emploie 85 % de la population active. Cependant, la rentabilité de ce secteur reste très limitée en raison des reliefs très accidentés, et la faible fertilité des terres en raison du lessivage par l'action continue de l'érosion du fait de la nature du sol, du climat et de la topographie.

1.2. Cadre morphologique

La Province de Chefchaouen se situe dans une des parties les plus accidentée de la chaîne du Rif. 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 (grandes barres de grés et quartzites) et calcaires (la Dorsale), toutes très accidentées avec des sommets dépassant les 2000 m. Les exemples les plus connus sont le Jbel Lakraa 2159 m et celui de Tissouka 2122 m à Bab Taza ainsi que Jbel Tisirène 2106 dans l'extrême Est de la province à Bab Berred.

A ces formations compétentes, s'ajoute une lithologie meuble très abondante, associée à un climat à la fois méditerranéen et océanique ainsi qu'à la tectonique active du domaine rifain (Tahayt, 2008). Le résultat, est une dynamique érosive intense à travers tout le secteur. La géomorphologie résultante se trouve donc caractérisée, par des reliefs très accidentés marqués par l'encaissement des vallées au niveau des Sebtides, les fortes pentes, les fortes dénivellations et les retombées en parois rocheuses des massifs (notamment au niveau de la Dorsale calcaire et aux niveaux des grands contacts chevauchants) comme cela a été déjà mentionné par Maurer en 1968, et puis El Gharbaoui en 198. 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, avec les roches plus tendres (Figure II-2).

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

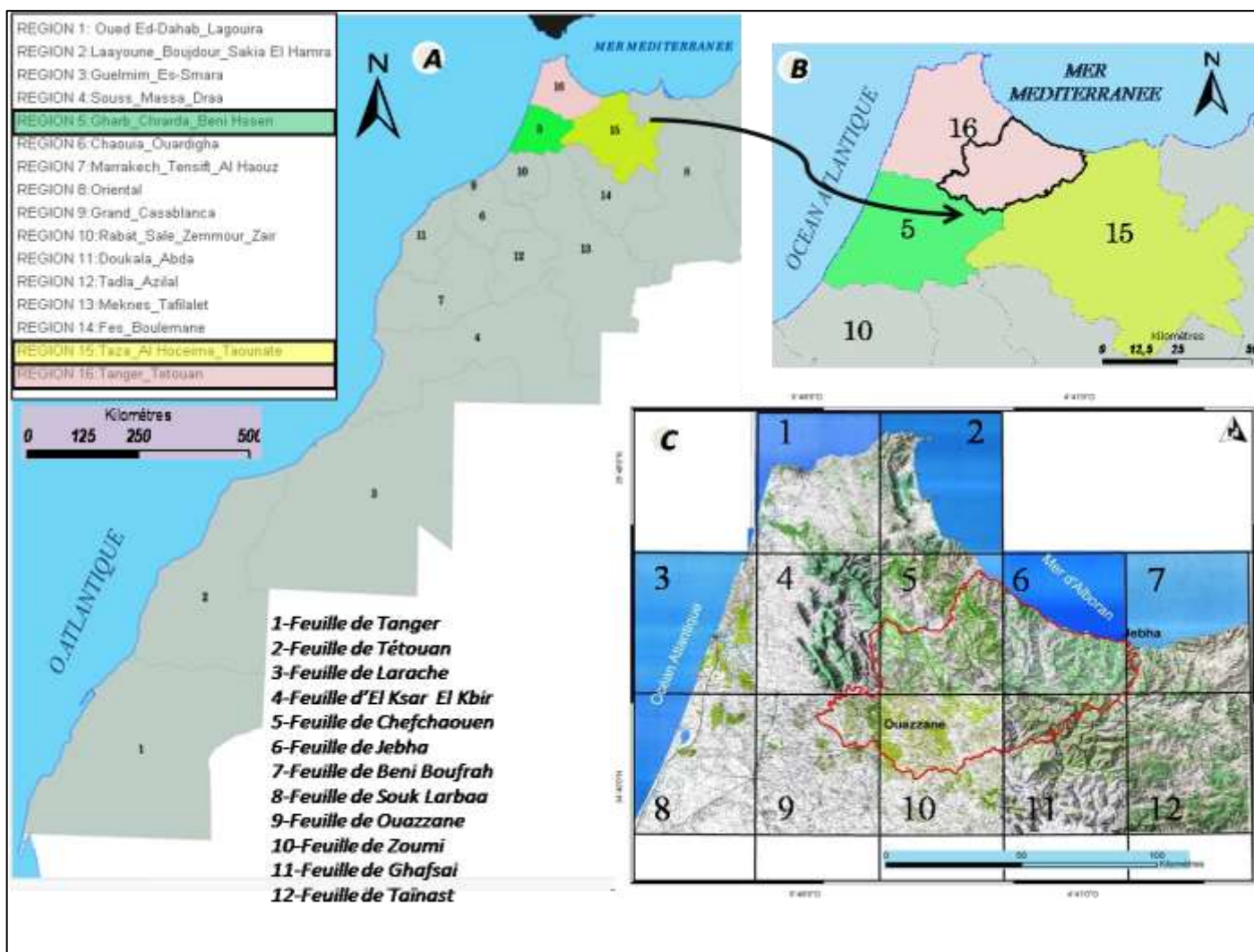


Figure II-1 : A : Carte des 16 subdivisions régionales du Maroc avec les 3 régions formant le Maroc Nord – Occidental (colorées en rose, jaune et vert) dont la province de Chefchaouen ; B : Zoom sur les trois régions du Maroc Nord – Occidental, le tracé noir représente les limites du secteur d'étude avec, 16 : Région de Tanger-Tétouan ; 15 : Région de Taza-Al Hoceima-Taounate ; 5 : Région de Gharb-Chrarda-Beni Hssen ; C : Couverture topographique du secteur d'étude, seules les cartes numérotées de 4 à 7 et de 9 à 11 font partie de notre secteur d'étude.

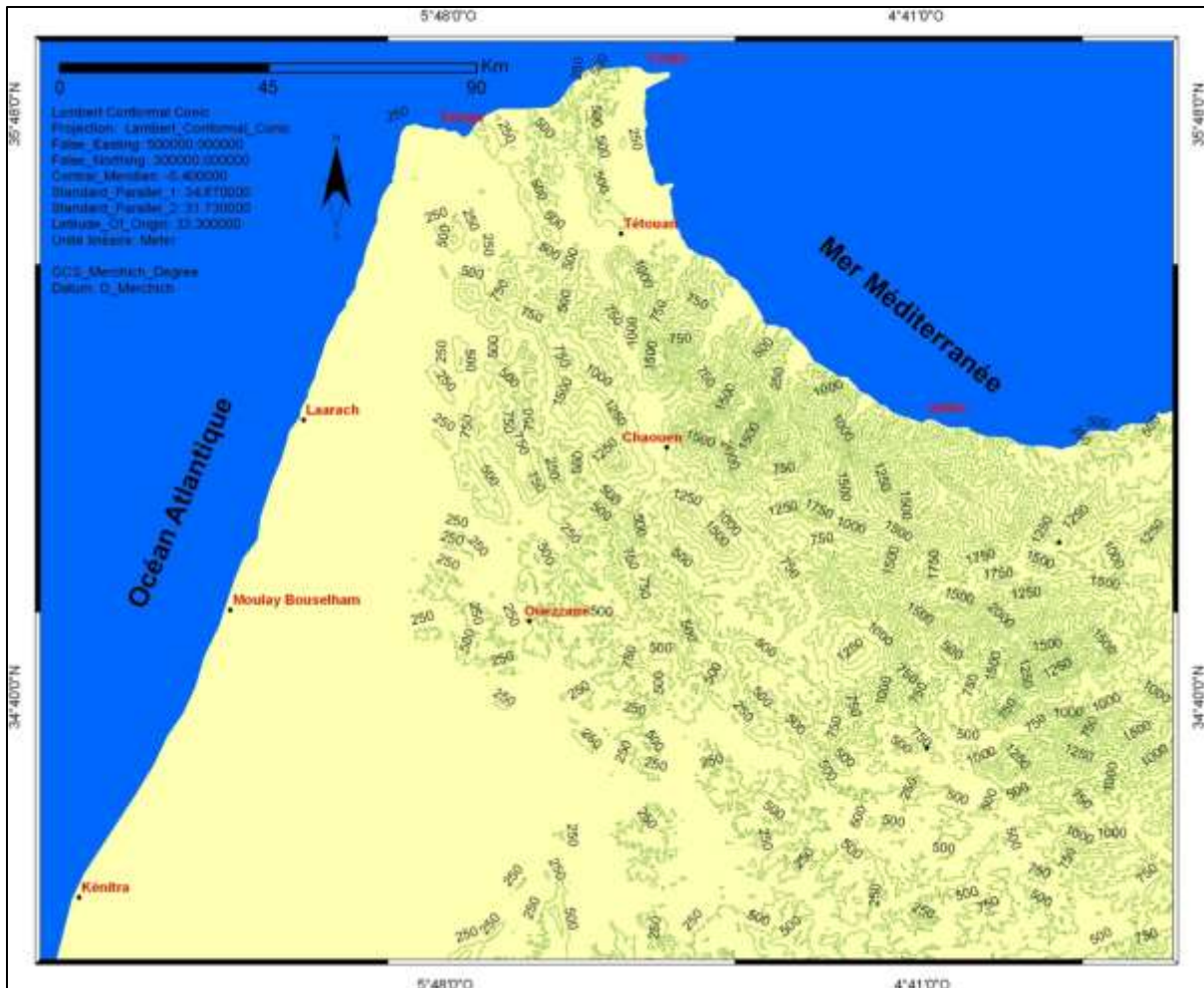


Figure II-2 : Carte orographique du Rif nord – occidentale.

1.3. Cadre géologique détaillé

Notre région d'étude correspond au domaine Rifain. Ce dernier constitue un ensemble géologique assez étendu limité au sud par les bassins du Gharb et Saïs, par l'océan Atlantique à l'Ouest, la Méditerranée et le Déroit de Gibraltar au Nord; vers l'Est, il se prolonge dans les tells (Figure II-3 et 4).

Il forme un segment de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale issue de la Téthys, son histoire géologique s'étend du Trias au Miocène supérieur avec des noyaux paléozoïques ayant enregistrés les traces de l'orogénèse hercynienne (Chalouan, 1986). Le Rif est la terminaison occidentale des Maghrébides (Durand Delga, 1980). C'est une chaîne qui court le long de la Méditerranée depuis Tanger jusqu'en Tunisie avec une interruption au niveau des frontières Algéro-Marocaines. Elle appartient au rameau "Dinaride" du système alpin (Apennin, Alpes méridionale, Dinarides), c'est-à-dire la branche Sud issue de la marge africaine de l'océan Téthysien. Au niveau du déroit de Gibraltar, le Rif se raccorde à la cordillère bétique qui elle appartient au rameau strictement alpin du système, c'est-à-dire la branche Nord issue de la marge européenne de l'océan Téthysien.

Comme toutes les chaînes alpines, le Rif est caractérisé par une structure complexe où prédominent des charriages profonds et des glissements superficiels, ainsi il est classiquement subdivisé en trois domaines distincts:

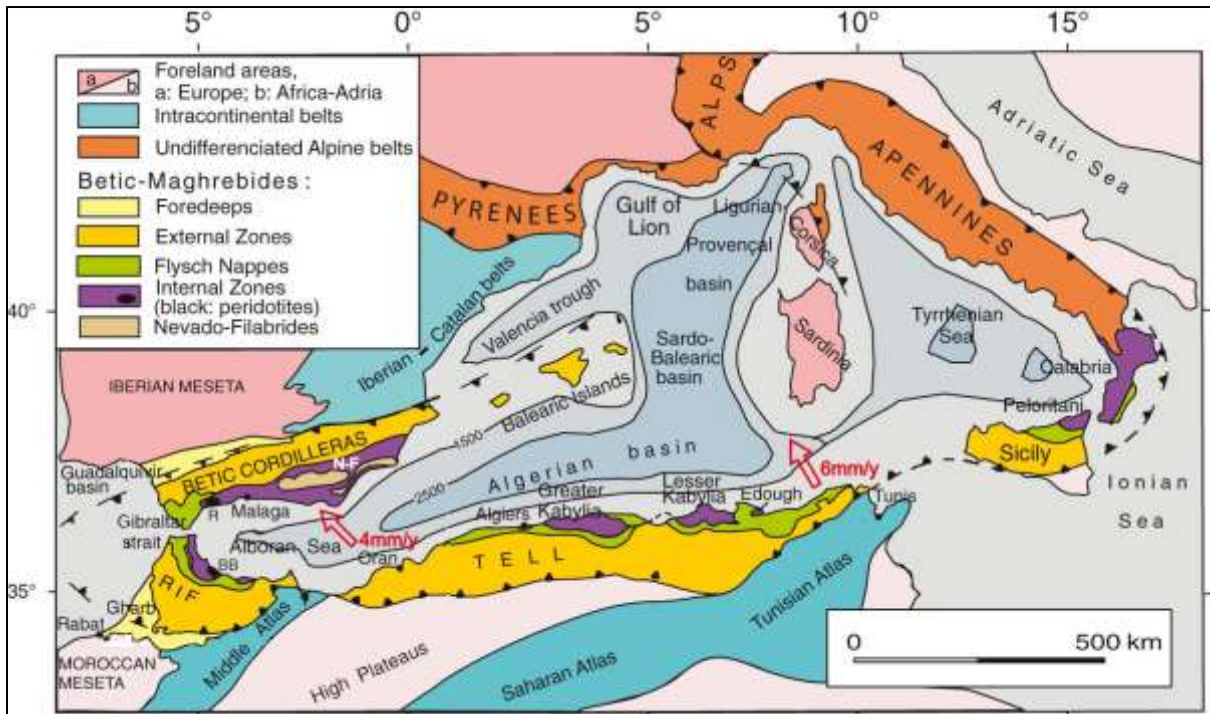


Figure II-3 : Carte schématique de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (Chalouan et al., 2008).

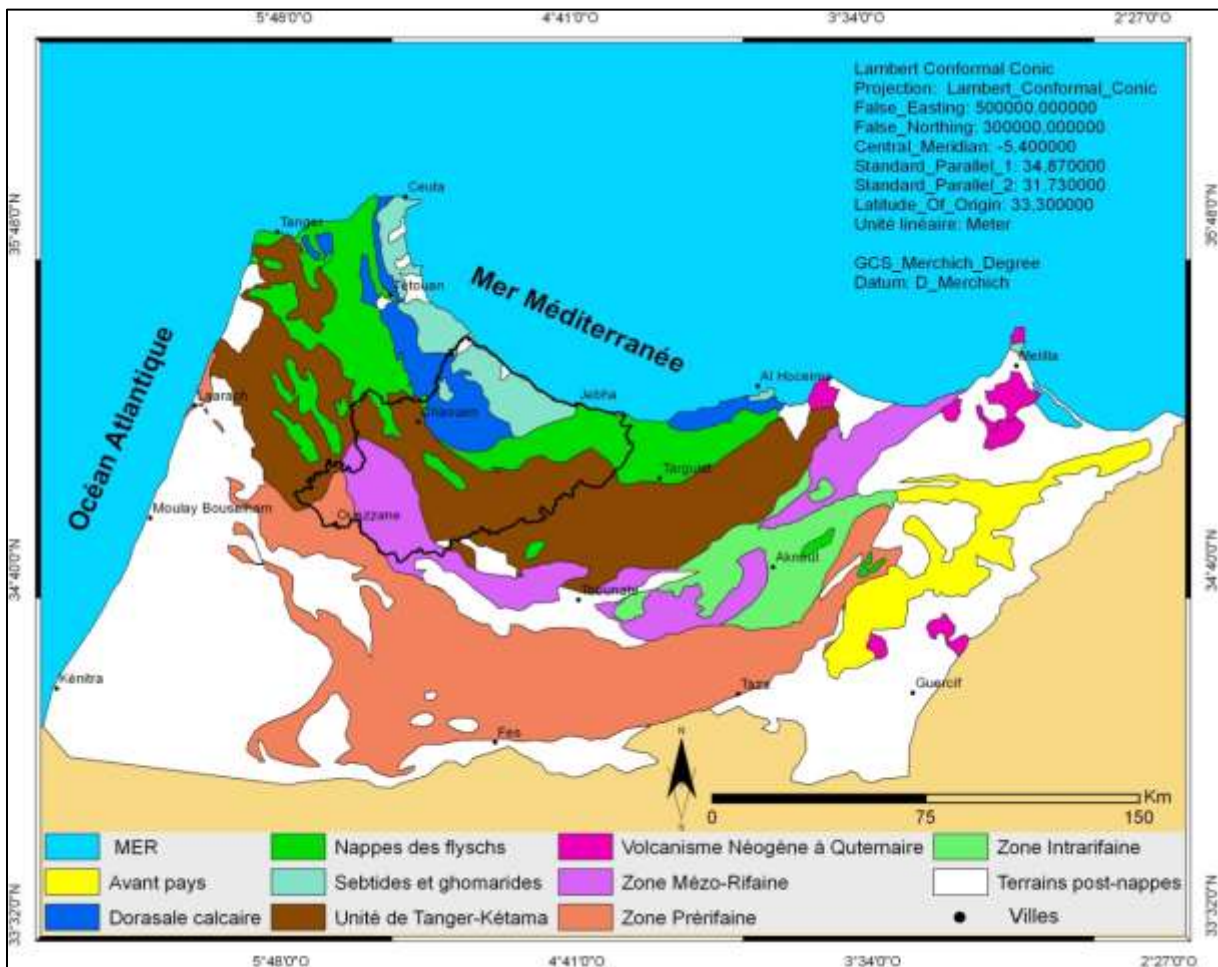


Figure II-4 : Carte schématique de la chaîne Rifaine, avec la localisation du secteur d'étude (polygone noir), Rampoux et al., 1979, modifiée.

1.3.1. Domaine interne

Il constitue la marge de la Méditerranée actuelle (Figure II-5) et dont la position paléogéographique correspondrait à la microplaque d'Alboran (Andrieux, 1971). Appelé aussi Rif interne, il est principalement développé au niveau de la péninsule de Tanger, où il se présente sous forme d'une bande continue le long de la côte méditerranéenne depuis Sebta jusqu'à l'accident de Jebha – Cherrafate sur lequel il s'arrête brutalement. Il est formé d'un ensemble de terrains allochtones: des terrains anciens polymétamorphiques, des séries paléozoïques et des séries méso-cénozoïques, qui sont :

1.3.1.1. Les Sébtides

Ce sont les unités les plus profondes (Figure II-5A et B) (Didon et al., 1973 ; Durand Delga et Olivier, 1988), équivalentes des *Alpujarides* de la chaîne bétique comprenant un socle pluri-métamorphique associé à des roches ultrabasiques. Ces dernières ont été interprétées par ces auteurs comme une écaille du manteau supérieur dont la remontée en surface s'est effectuée lors d'un processus d'extension lié à un amincissement crustal.

1.3.1.2. Les Ghomarides

Les Ghomarides reposent tectoniquement sur les différents niveaux des Sebtides (Figure II-5A). Elles reposent également sur la chaîne calcaire et par endroits même sur les nappes des flyschs en position plus externe (Chalouan, 1986). Les Ghomarides sont l'équivalent des *Malaguides* bétiques et constituées de terrains paléozoïques, mésozoïques et tertiaires (Figure II-5D) (Chalouane, 1986 ; Durand Delga et Olivier, 1988).

1.3.1.3. La chaîne ou dorsale calcaire

La dorsale calcaire occupe la partie la plus externe du Rif interne (Figure II-5A). C'est un ensemble complexe constitué par de puissantes séries carbonatées du Trias supérieur-Lias réduites et allant jusqu'au Miocène inférieur (Figure II-5C, E et F) (Olivier 1981, 1982 ; El Hatimi, 1982). L'évolution de ces séries principalement au Trias et au Lias a permis de distinguer des zones paléogéographiques avec une dorsale interne, une dorsale externe et une dorsale médiane (Didon et al., 1973 ; Wildi, 1983).

1.3.2. Domaine des nappes de flyschs

C'est un ensemble d'unités formées de séries de flyschs allochtones qui bordent à l'Ouest et au Sud la chaîne calcaire. Il est formé par des séries s'étageant du Crétacé à l'Aquitaniens. Elles comportent quatre nappes, à savoir :

- La nappe pré-dorsalienne
- La nappe maurétanienne
- La nappe massylienne
- La nappe numidienne

1.3.2.1. La nappe pré-dorsalienne

Constitue la partie externe de la dorsale calcaire. Elle correspondait à une zone de transition dont la signification géographique et structurale est sujette à de multiples

interprétations. Cette unité a été également désignée comme l'unité de Belliounes (Durand Delga, 1972), la *semelle tertiaire* (Andrieux, 1971), l'unité de Béni Derkoul (Wildi et al., 1977) ou l'unité chaotique à klipptes représentées par des dépôts re-sédimentés de **calcaires et dolomies** liasiques et des **flyschs** tertiaires (Durand Delga, 1963).

1.3.2.2. La nappe mauritanienne

Définie en Algérie et représentée au Maroc par la nappe de Jbel Tizirène, d'âge Crétacé inférieur, et, la nappe de Beni-idder d'âge Crétacé supérieur à l'Oligocène (Durand Delga et Mattauer, 1960). La nappe de Jbel Tizerene est dans l'ensemble comprise entre Bab Taza et les Bokkoya, elle constitue un immense affleurement de **flysch**. Par contre, au nord de Bab Taza et jusqu'à la parallèle de Tétouan, la nappe est réduite à des lambeaux dispersés. Plus au nord, la nappe s'étale plus largement entre la chaîne du Haouz et la région de Tanger pour apparaître enfin au bord du détroit de Gibraltar et former la Pointe de Cires. La nappe de J.Tizirène qui repose localement sur des radiolarites et des roches volcaniques (Chalouan et al., 2008), est formée par une série marno-calcaire d'âge Berriasien, surmontée par un ensemble de flyschs grésopélitique qui s'échelonne du Valanginien à l'Albien. Localement, la nappe de Tizirène est couverte en continuité stratigraphique par une formation cénomano-turonienne carbonatée associée à des minces niveaux phtanitiques (Olivier, 1981-1982 ; El Hatimi, 1982). La nappe de Beni-Idder est constituée par des terrains allant du Crétacé supérieur à l'Oligocène terminal / Miocène basal (Didon et al., 1973). Le Crétacé supérieur est essentiellement marneux, associé à des calcaires, parfois à silex, et, à intercalations gréseuses. L'Éocène est périto-calcarénitique, riche en bioclastes ; l'Oligocène est constitué par une puissante série grésomiacée carbonatée. La nappe de Beni-Idder constitue le complément stratigraphique de l'unité de J.Tizirène (Durand Delga et Olivier, 1988).

1.3.2.3. La nappe massylienne

Définie en Algérie, elle correspond au Maroc à la nappe de Melloussa (Durand Delga 1980 ; Didon et al., 1973) et à son équivalent latéral, la nappe de Chouamate (Andrieux, 1971 ; Didon et al., 1973). Au niveau de la chaîne rifaine, cette nappe est constituée dans sa grande partie stratigraphique par un **flysch grésopélitique** d'âge albo-aptien (Durand Delga, 1963) surmonté par un Crétacé supérieur calcaro-pélitique d'âge cénomano-turonien (Durand Delga, 1963).

1.3.2.4. La nappe numidienne

Le terme numidien a été proposé pour la première fois pour désigner une large séquence gréseuse affleurant le long de la côte algérienne. Ensuite, une série homologue était décrite dans la chaîne bétique en lui donnant le nom "*d'Arenisca d'Algibe*"; alors que ce n'est que récemment que des séries de **grès numidiens** ont été distinguées dans différents secteurs de la chaîne maghrébine et au Sud des Apennins (Durand Delga, 1963). De point de vue stratigraphie, les grès numidiens du Maroc ont été considérés pendant longtemps comme appartenant au Crétacé supérieur alors qu'au Nord du Déroit de Gibraltar « *l'Arenisca d'Aljibe* » leur attribution à l'Oligocène est justifiée. Ce n'est donc qu'en 1960, que Durand Delga et Mattauer reconnaissent le grès numidien au Maroc, en lui attribuant un âge oligocène par analogie avec les grès numidiens d'Algérie.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

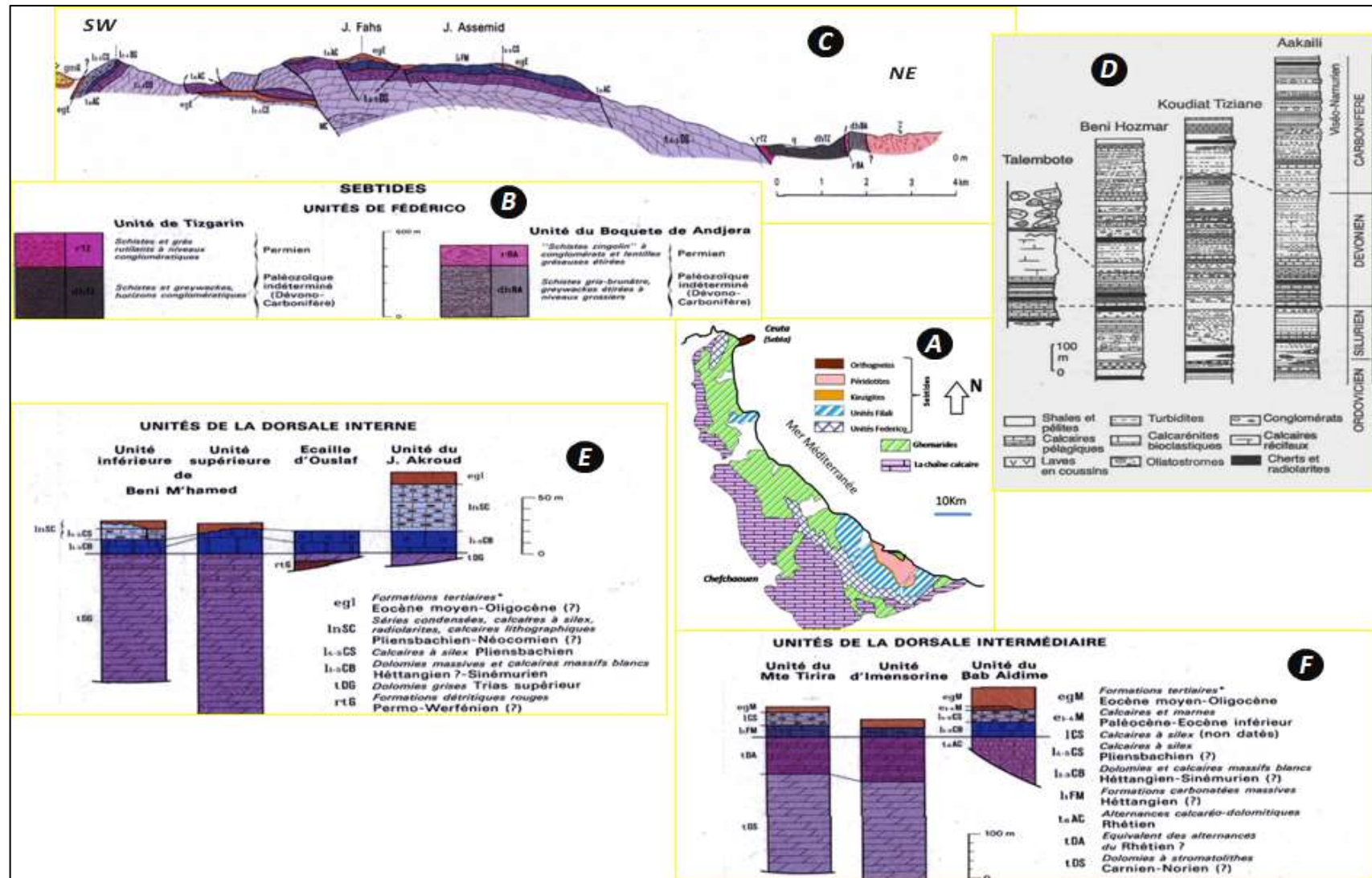


Figure II-5: A : Schéma montrant les subdivisions du rif interne ; B : Logs stratigraphiques des terrains sébtides (Service Géologique du Maroc, 1975) ; C : coupe géologique montrant les relations structurales entre les différentes subdivisions du Rif interne (SGM, 1975) ; D : colonnes lithostratigraphiques des unités Ghomarides (Chalouan, 1986) ; E et F : colonnes lithostratigraphiques des unités de la Chaîne calcaire interne et intermédiaire (SGM, 1975).

1.3.3. Domaine externe

Il s'agit d'un vaste domaine structural largement charrié par les nappes des flyschs allochtones et le domaine interne. Sa structure interne complexe traduit un dispositif paléogéographique qui correspondrait à la marge africaine de l'océan Téthysien (Durand-Delga et al., 1963 ; Lespinasse, 1975). Le Rif externe est formé par des unités enracinées et des unités de décollement (Figure II-6A et B), qui sont, de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne : zone intrarifaine, la zone mésorifaine, et la zone pré-rifaine (Suter, 1980a – 1980b). Le socle paléozoïque n'est pas reconnu dans le Rif externe.

1.3.3.1. Zones intra-rifaines ou intra-Rif

Elles forment la partie septentrionale du Rif externe définie en 1960 par Durand Delga et Mattauer. Les unités fondamentales de l'intra-Rif sont les unités de Tanger et de Ketama qui forment l'ossature du Rif externe, et qui contiennent trois sous-unités suivantes :

i. Unité de Ketama

Elle affleure dans le Rif central (Andrieux, 1971) et comporte une série allant du Trias à faciès germanique jusqu'à l'Albien formé essentiellement de **flyschs** d'âge albioptien avec quelques affleurements du Crétacé supérieur (Andrieux, 1971).

ii. Unité de Tanger

L'unité de Tanger relaie en plan et surmonte l'unité de Ketama. Elle correspond à un vaste ensemble lithologique considéré comme un ensemble structural formé en grande partie, par des **terrains marneux** datant du Crétacé supérieur, interprétés comme couverture de l'unité de Ketama (Lespinasse, 1975). Au sein de l'unité de Tanger, deux séries lithostratigraphiques peuvent être distinguées selon leurs positions géographiques relatives: l'unité de Tanger interne ou orientale et l'unité de Tanger externe ou occidentale (Lespinasse, 1975).

iii. Unité de Loukkos

Elle doit son nom à l'oued Loukkos qui y prend naissance, et y assure la transition entre les importants massifs Jurassique du Mésorif (décrit plus loin) à l'Ouest et les épaisses séries monotones du Crétacé supérieur de l'unité de Tanger. Elle affleure dans le Rif occidental, elle est formée de terrains essentiellement par des marnes jaunes et des marnes grises à intercalations calcaires, l'ensemble datant de l'Albien à l'Eocène (Lespinasse, 1975 ; Chalouan et al., 2008).

1.3.3.2. Zones Mésorifaine ou Mésorif

La zone Mésorifaine a été définie par Suter (1980a – 1980b) et elle est constituée de terrains allant du Lias au Miocène. Le Jurassique et le Crétacé sont les deux termes essentiels de la zone Mésorifaine (Asebriy et al., 1987). Celle-ci peut être subdivisée en deux sous-ensembles, le Mésorif interne et le Mésorif externe.

1.3.3.3. Zones pré-rifaines ou Pré-Rif

Le Pré-Rif forme la frange méridionale du domaine externe. Il est essentiellement représenté par des terrains à **faciès marneux** qui prédominent dès le Crétacé inférieur (WILDI 1983). Ainsi, on y distingue le Pré-Rif interne et le Pré-Rif externe.

i. Le Pré-Rif interne

Il est constitué d'écaillés enracinées sous le Méso-Rif et caractérisé par ses terrains du Lias et du Dogger qui forment ce qu'on appelle le "sof"³.

ii. Le Pré-Rif externe

Caractérisé par des affleurements formés principalement, par une nappe de décollement à structure chaotique; représentée par une matrice marneuse, elle aussi renferme des évaporites et d'autres éléments du Trias (Wildi, 1983).

1.3.3.4. L'avant pays (les unités décollées et glissées)

- Nappe rifaine supérieure à affinité intrarifaine (Wildi, 1983) :
- Les unités supérieures à affinités intrarifaines sont toutes les séries allochtones superposées à l'unité de Ketama dont le Jurassique détritique est semblable à celui de la nappe de Senhadja⁴ et la nappe d'Aknoul⁵.
- Nappes rifaines à affinité Mésorifaines (Wildi, 1983).
- Nappes de type Ouezzane : on y trouve la nappe d'Ouezzane (sensu stricto) (1980a – 1980b), la nappe de Habt⁶ et l'unité de Tsoul qui est superposée au domaine pré-rifain (Le Blanc et Olivier, 1983). De point de vue stratigraphique ces nappes sont constituées de terrains allant du Crétacé au Miocène supérieur.

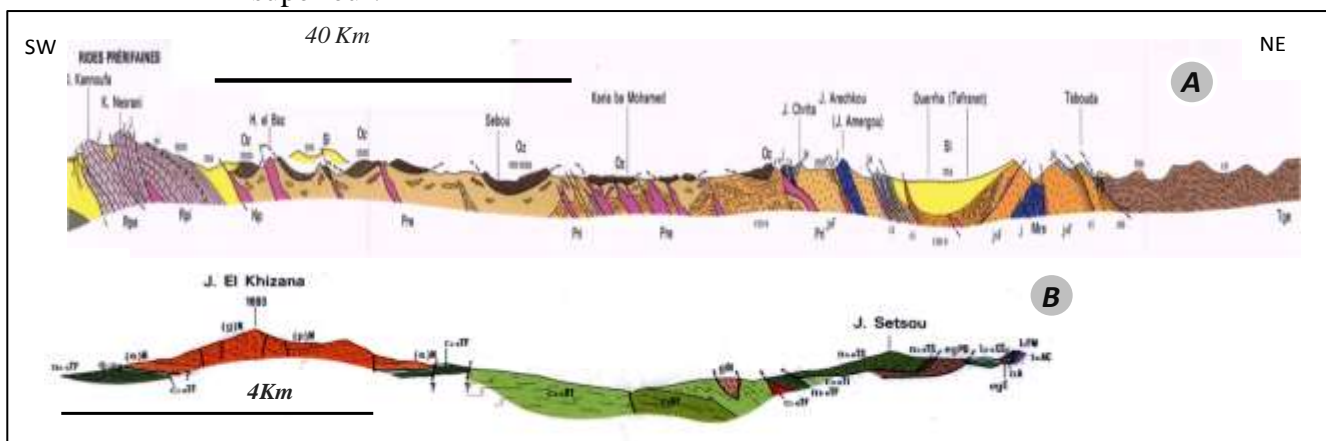


Figure II- 6: A : Coupe géologique du domaine externe : passant par les rides pré-rifaines, Kariat ba Mohamed, Tanger externe, et l'unité de Ketama (Suter, 1980a); B : Coupe géologique du domaine externe (intrarif), et les nappes de flyschs, passant par Jebel El Khizana, les formations de Bab Taza, la formation d'Asserdoune, et Jebel Setsou (SGM, 1975).

³ Sof : est une déformation du mot arabe "Sfof" pluriel de "Saf". Pour les indigènes du Rif central, il s agit des rochers calcaires jurassiques plus ou moins alignés comme des murs. Ils les appellent ainsi, car pour eux ils correspondent à des murs de rochers alignés et jaillissant des marnes du Pré-rif externe.

⁴ Nappe de Senhadja : comprend des terrains allant du Lias au Crétacé supérieur, affectés d'une déformation souple et d'un léger métamorphisme.

⁵ Nappe d'Aknoul : Constitue la couverture décollée de l'unité de Kétama-Tanger.

⁶ Nappe du Habt : Couverture en contact avec l'unité de Tanger.

1.4. Cadre tectonique

L'un des traits majeurs de l'évolution du système bético-rifain est la mise en place des nappes de charriage, en relation avec le rapprochement des plaques Afrique et Europe (Figure II-7). Les travaux consacrés à l'interprétation de ce phénomène (Andrieux et al., 1989 ; Andrieux et al., 1971 ; Tapponier, 1977 ; Bourgois., 1978 ; Bourgois et al., 1992) ont tous insisté sur la relation entre la migration, vers l'ouest des zones internes, la mise en place des nappes et la formation de l'arc de Gibraltar. Cette histoire a débuté par une période de rifting qui démarre au Trias (Figure II-7 et 8) et s'est poursuivie pendant le Jurassique pour donner la Téthys avec la formation possible du sillon Maghrébin (Durand-Delga et al., 1980) dont la position reste discutable. Au cours du Miocène, le Rif fut le siège d'une tectonique polyphasée. L'évolution de la chaîne Rifaine Miocène à l'actuel peut être résumée de la manière suivante :

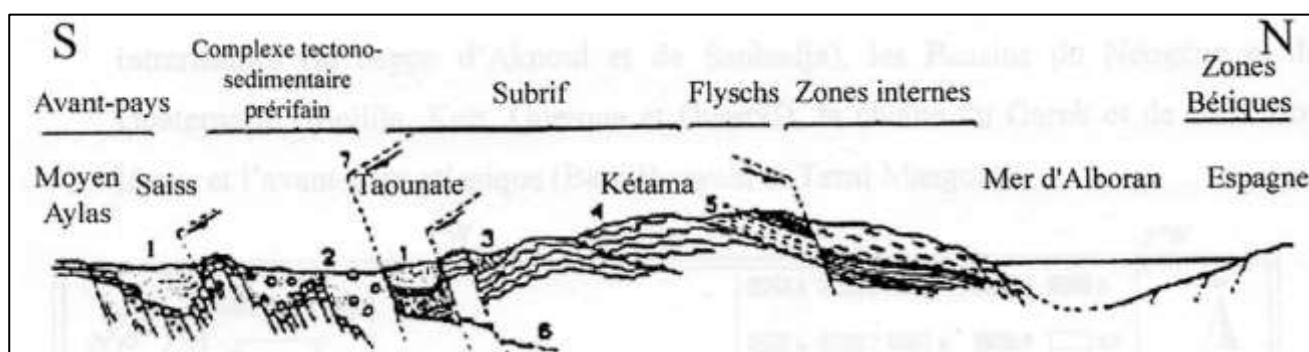


Figure II-7 : Coupe tectonique de la chaîne Rifaine (Ait Brahim, 1991). 1 : Miocène supérieur – Actuel, 2 : Tortonien à klippes sédimentaires, 3 : Crétacé supérieur à klippes sédimentaires, 4 : Jurassique – Crétacé, 5 : Crétacé, 6 : Chevauchement, 7 : Décrochement.

Le régime tectonique 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 décrochants 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).

La contrainte compressive enregistrée pendant le Miocène inférieur subit une légère rotation pour devenir NNW-SSE au Miocène moyen. L'activité tectonique se manifeste en grande partie par des charriages et des décrochements senestres (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. Le Rif est le siège d'une activité tectonique complexe marquée par une compression de direction N040°E au Tortonien. Cette compression est responsable du fonctionnement des décrochements conjugués senestres N070-090°E (auxquels est attribué l'ouverture des bassins post-nappes) et dextres N020-170°E (d'Al Hoceima, Ras Tarf), le jeu ou rejeu des accidents N040-050°E en failles décrochantes senestres à composante normale importante (Nekor et Kert).

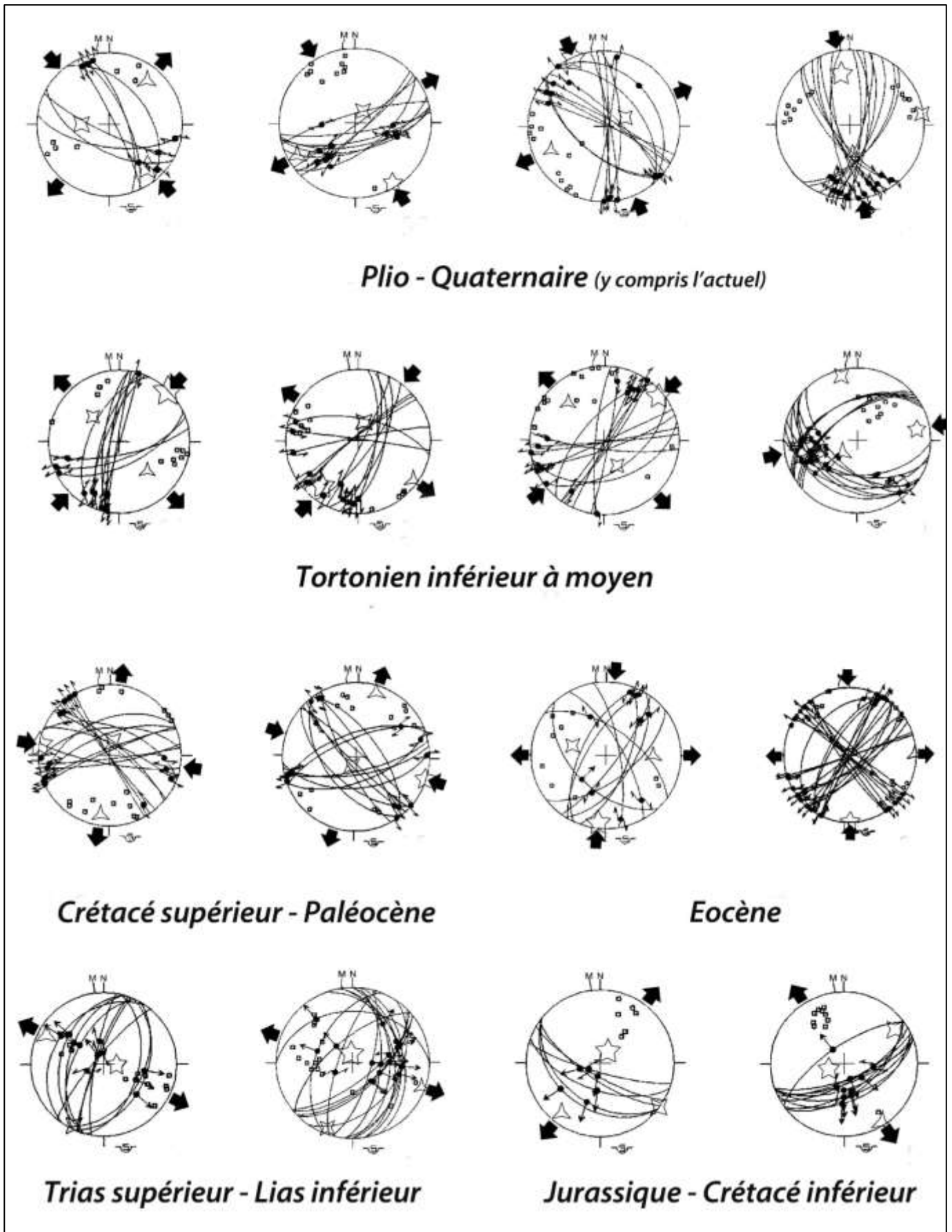


Figure II-8 : Etats de contraintes dans la chaîne Rifaine depuis le Trias supérieur à l'actuel, d'après Ait Brahim et al., 2002, adaptée.

La distension NW-SE contemporaine, en affectant les terrains de la région y compris le substratum (Ait Brahim, 1991 ; Chaouni, 1999 ; Ait Brahim et al., 2002) serait à l'origine du volcanisme de RasTarf, du Cap des Trois Fourches et de Gourougou. Pendant le Tortonien-Messinien, le changement de la direction de la contrainte de N040°E à N000 provoque le jeu des décrochements senestres NNE – SSW à NNW – SSE et dextres EW à NW – SE, des failles inverses ENE – WSW et, des plis d'axes E – W à ENE-WSW.

Le Messinien est marqué par une activité tectonique globalement dominée par un régime subméridien qui s'exprime par des décrochements senestres NNE-SSW à NNW-SSE et dextres E – W à NW – SE, ainsi que des failles inverses ENE – WSW et des plis d'axes E – W à WSW.

Au Plio-Quaternaire (y compris l'actuel), la direction de la contrainte N140-160°E (Morel, 1989 ; Ait Brahim, 1991) a créé des failles qui sont responsables de l'individualisation et du fonctionnement des bassins Néogènes tel que celui du Bas Nekor ou de Boudinar.

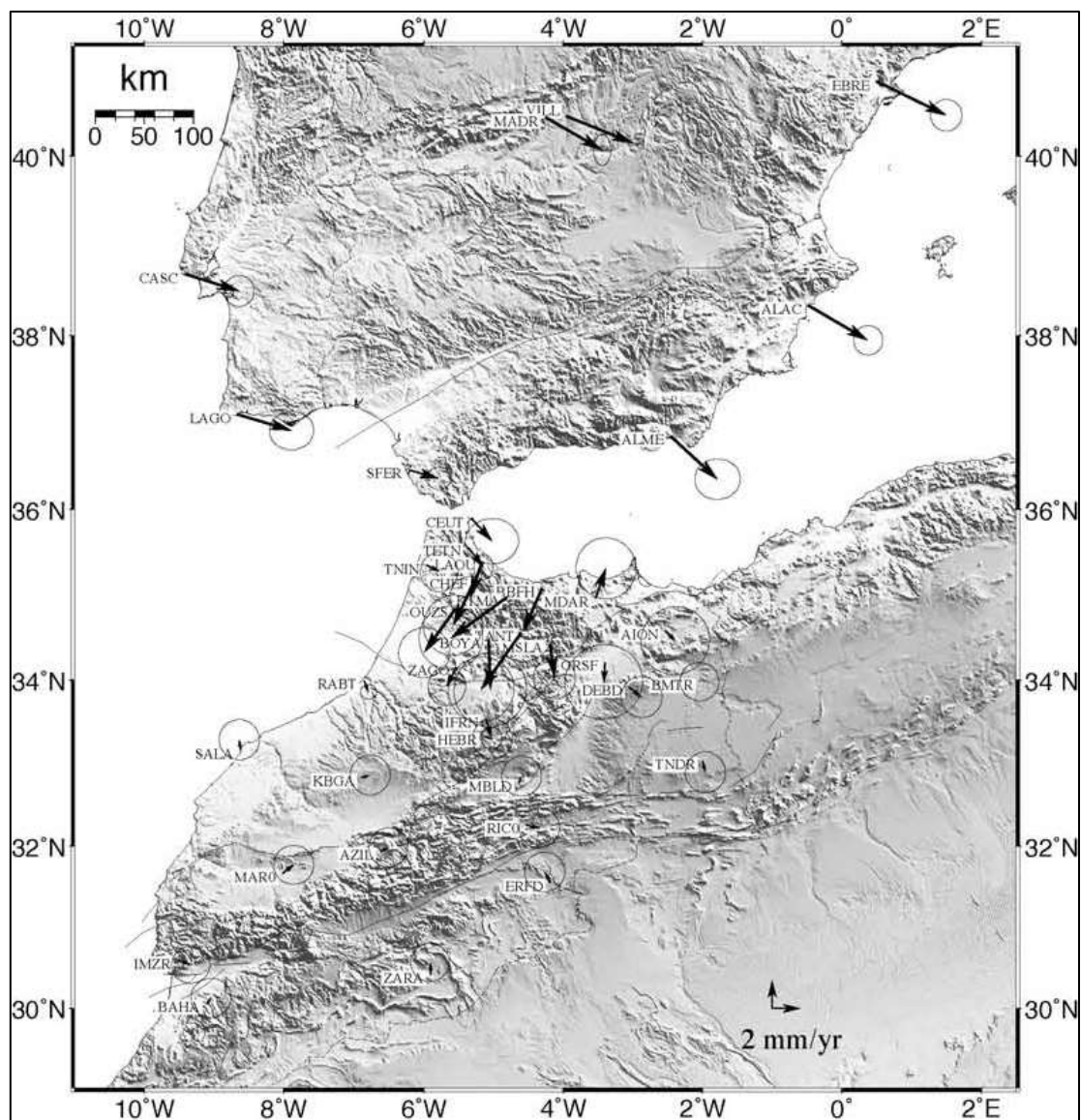


Figure II-9 : Champ de vitesses GPS par rapport à l'Eurasie. Les ellipses montrent les incertitudes avec 95% de confiance, Tahayt et al., 2008.

1.5. Conclusion du chapitre 2

L'état de structuration de la chaîne met en contact des formations géologiques variées (Figure II-1, cf Chapitre 5, Figure V-1) avec de fréquentes alternances de matériaux de différents comportements mécaniques (calcaires, dolomies, grès, marnes, argiles...). La morphologie est caractérisée par des reliefs très accidentés et de fortes dénivellations. Les précipitations (cf Chapitre 5, Figure V-37) présentent une moyenne annuelle qui oscille entre 700 mm en basse altitude et plus de 1000 mm sur les crêtes et les chaînons calcaro-dolomitiques de la Dorsale calcaire.

Cette situation est essentiellement la conséquence de l'activité tectonique de la chaîne Rifaine perdurant jusqu'à aujourd'hui. Cette activité résulte de l'effet conjugué - de la convergence Afrique-Europe, et - de phénomènes de réajustement isostatique qui ont accentué du Pliocène à l'Holocène des mouvements verticaux différentiels, essentiellement le long des principaux accidents à activité récente N – S, N040 – 070 et N090 – 120 (Ait Brahim et al., 2002 ; Ait Brahim, 1991 ; Chaouni, 1999). Selon le même auteur, l'évolution néotectonique du Rif, voire même du Maroc, ne doit pas être conçue à partir du schéma structural classique, mais à partir de blocs morphostructuraux toujours en cours de déformation au niveau de leur bordures comme en atteste la localisation de la sismicité (cf Chapitre 5, section 2). Ces blocs peuvent acquérir une autonomie relative de mouvement et développer des contraintes à caractère local (Ait Brahim et al., 2002). L'activité tectonique et sismique qui se manifeste par le jeu récent de failles semble être induite par le blocage des plaques Europe et Afrique dans un état de contrainte où σ_1 (*Sigma*) prend une direction N – S à NNW – SSE et σ_3 une direction E – W (Ait Brahim et al., 1990, Ait Brahim, 1991). Ces directions sont confirmées par les mécanismes au foyer de quelques séismes de la région (Tahayt, 2008 ; Tahayt et al., 2008).

Des travaux récents en géodésie GPS (Fadil et al., 2006 ; Fernandez et al., 2007 ; Tahayt et al., 2008), ont révélé un champ de vitesse des blocs tectoniques inattendu dans le Rif Marocain et la cordillère Bétique, globalement expliqué par la convergence des deux plaques Eurasie-Afrique. Les vitesses mesurées par GPS, associées aux données de sismologie, permettent de confirmer que l'arc Bético-Rifain (Maroc et Ibérie) est un domaine toujours en surrection, 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 (Figure II-9).

Ce système compressif (surrection) résulte en grande partie de la position du secteur d'étude (et tout le Maroc) situé en zone de collision, là où les deux plaques continentales Afrique-Europe se rapprochent l'une de l'autre. Cette position particulière se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète la poursuite de la convergence entre ces deux plaques lithosphériques, et dont les contraintes sont principalement absorbées par la chaîne atlasique et le Rif où les différentes unités géologiques se trouvent fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation ce qui les rend très susceptibles aux mouvements de terrain. L'activité des rivières et oued se trouve cependant exacerbée en s'enfonçant et incisant d'avantage les pieds des versants et en favorisant le déclenchement d'instabilités de ces derniers.

Mise à part un caractère sismotectonique très actif de la chaîne rifaine, le climat (double influence marine atlantique et méditerranéenne) y reste un des facteurs déterminants dans le déclenchement des mouvements de terrain.

CHAPITRE III : ANALYSE MORPHO-TECTONIQUE DU SECTEUR D'ETUDE

Résumé du chapitre

Ce chapitre traite de la cartographie de la fracturation récente au niveau de la province de Chefchaouen, en se basant sur l'analyse morphostructurale de la topographie à partir du MNT ainsi que des perturbations et anomalies du réseau hydrographique, qui ont permis de mettre en évidence des discontinuités d'origines lithologique, structurales et même anthropiques (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de transport d'énergie, etc.). Après confrontation avec les cartes géologiques, les photos aériennes, les cartes topographiques, et surtout la couverture satellitaire haute résolution disponible, nous n'avons retenu sur la carte de synthèse que les discontinuités qui ont une valeur de fracturation. Le résultat de cette cartographie sera rassemblé avec la fracturation issue de données satellitaires, bibliographiques et du terrain (Cf. Chapitre 5) pour la construction de la carte de fracturation synthétique de la province de Chefchaouen.

1. Généralités

1.1. Présentation de la technique

Pour comprendre les processus tectoniques qui affectent une région donnée, une chaîne de montagnes ou un massif, il est nécessaire d'analyser les structures géologiques et la morphologie du relief terrestre à différentes échelles, depuis l'image satellitaire (1/100000, 1/50000) jusqu'au terrain (1/10000) en passant par la photo aérienne (1/50000, 1/10000). L'analyse couplée des objets structuraux et géomorphologiques est basée sur l'analyse morphotectonique. Elle étudie les caractéristiques morphologiques et topographiques du relief terrestre consécutif de l'interaction entre des processus tectoniques (failles et plis...) et surfaciques (érosion, transport, dépôt). Elle décrypte les escarpements de failles, des décalages de rivières ou de crêtes, des étagements de terrasses alluviales...etc. L'observation de la morphologie de ces objets alias "marqueurs morpho-tectoniques", plus particulièrement d'âges récents (ici Mio-Plio-Quaternaire), permet de mettre en évidence et de quantifier les mouvements tectoniques qui se sont produits dans une région. Elle permet également de déterminer la géométrie et la cinématique des failles actives au cours des derniers millions d'années. La morphotectonique est donc un outil fondamental pour la compréhension du rôle de la tectonique active dans l'évolution structurale d'un secteur donné.

1.2. Finalité de la technique pour notre approche

L'objectif de cette partie est la cartographie de la fracturation récente tout au long du couloir faillé de Jebha au niveau de notre secteur d'étude, en se basant sur l'analyse morphostructurale du secteur d'étude, et l'analyse du réseau hydrographique en termes d'anomalies et perturbations tectoniques. Néanmoins, parce que les processus tectoniques sont spécifiques, il est possible de lister un certain nombre de marqueurs morphotectoniques caractéristiques tels que:

- Les escarpements de failles (actives) : Ils peuvent être définis comme des reliefs topographiques affectant une même surface ou objet morphologique (isochrone) dont l'origine est clairement produite par l'activité d'une faille oblique, normale ou inverse.
- Les vallées linéaires : ces vallées sont alignées selon les tracés principaux des failles. Celles-ci se développent souvent parce que le mouvement continu le long des traces récentes de faille écrase la roche, la rendant plus vulnérable à l'érosion. Les rivières suivent généralement ces zones de faiblesses (Deffontaines, 1990 ; Deffontaines et al., 1992).
- Les drainages linéaires décalés : il s'agit de rivières qui entrent dans une zone faillée sous un certain angle par rapport à la direction de la faille, puis coulent parallèlement à la faille sur une certaine distance, avant de reprendre leur direction originelle d'écoulement. Ces rivières peuvent être décalées par un rejet dextre ou sénestre. Elles indiquent donc le sens du décrochement qui les affecte (Nazari, 2006).
- L'excentrage d'apex de cônes alluviaux : dans le cas de faille limitant un relief, on peut observer le décalage de cône alluviaux à l'exutoire des bassins versants et l'incision des cônes suivants dans les dépôts antérieurs (Deffontaines, 1990 ; Deffontaines et al., 1992 ; Nazari, 2006).

- Rides ou interfluves décalées : Il s'agit du déplacement avec une forte composante horizontale de rides topographiques ou interfluves
- Alignements de sources et de résurgence: les zones faillées peuvent être une barrière efficace à l'écoulement des eaux sous-terraines puis favoriser leur résurgence en surface.

2. Analyse morphostructurale du Modèle Numérique du Terrain (MNT)

2.1. Introduction

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).

Après cette brève introduction, il est important de définir même succinctement le MNT, ainsi qu'énumérer rapidement les différentes techniques permettant son élaboration. A la suite de ce chapitre l'analyse morphostructurale du MNT permettra de déceler les différentes discontinuités morphostructurales (fracturation récente) de la province de Chefchaouen. Le même MNT sera réutilisé dans le chapitre 7 pour l'extraction des paramètres géomorphologiques intervenant dans la genèse des mouvements de terrain (gradient de pente, expositions, et élévations).

2.2. Le MNT : Définition

Un MNT est une représentation numérique de la surface topographique, c'est à dire un ensemble de points de coordonnées tridimensionnelles (X, Y, Z) connues (Figure III-1) ; destiné à visualiser la morphologie seule. Pour des raisons pratiques, ces données sont le plus souvent stockées avec une structure particulière. Par exemple sous forme d'une grille à maille carrée. Le MNT correspond à une grille d'altitude du relief correspondant à une interpolation de données discrètes sur une grille régulière généralement sous forme d'un développement polynomial $Z = f(x, y)$, f étant bijectif, continue et dérivable. Ainsi chaque « pixel » (pictural élément) du MNT représente l'hypsométrie (> 0) ou la bathymétrie (< 0).

2.3. Richesse des MNT et multiplicité de leurs utilisations

Le MNT fournit les informations nécessaires à la visualisation, l'analyse et la modélisation de phénomènes liés en relation avec le relief et l'évolution de la surface terrestre, en occurrence les mouvements de terrain. Dans ce sens, de nombreux paramètres peuvent être extraits à partir du MNT comme étant des éléments de base pour la construction du modèle conceptuel. Le calcul de dérivées premières permet de définir plusieurs paramètres qui peuvent avoir une incidence sur le déclenchement des mouvements de terrain tels que : le gradient de pente et l'exposition', ceux de dérivées secondes permet de définir les plans de courbure de pentes. Des calculs plus complexes peuvent également permettre d'extraire des cartes thématiques tels que les crêtes, les talwegs, les bassins versants, le réseau

hydrographique (traité dans ce chapitre), ou de mener des calculs d'inter-visibilité⁷ ou d'ensoleillement. C'est grâce à cette richesse que les MNT sont utilisés dans de multiples domaines nécessitant une connaissance approfondie du relief et qu'ils sont intégrés dans des SIG⁸ (Système d'Information Géographique).

Les SIG offrent depuis plusieurs dizaines d'années de nouveaux moyens pour intégrer, analyser et visualiser des données spatialisées, dont le MNT. Il faut remarquer qu'au sein d'un SIG, l'échelle est virtuelle : la représentation sous forme numérique d'une donnée géographique permet de modifier fictivement la résolution spatiale de la représentation par les fonctions de zoom avant et arrière. Ce type de fonctions permet à l'œil humain de distinguer avec plus de finesse les objets représentés, sans que les résolutions spatiale et altimétrique des données de base demeurent invariables.

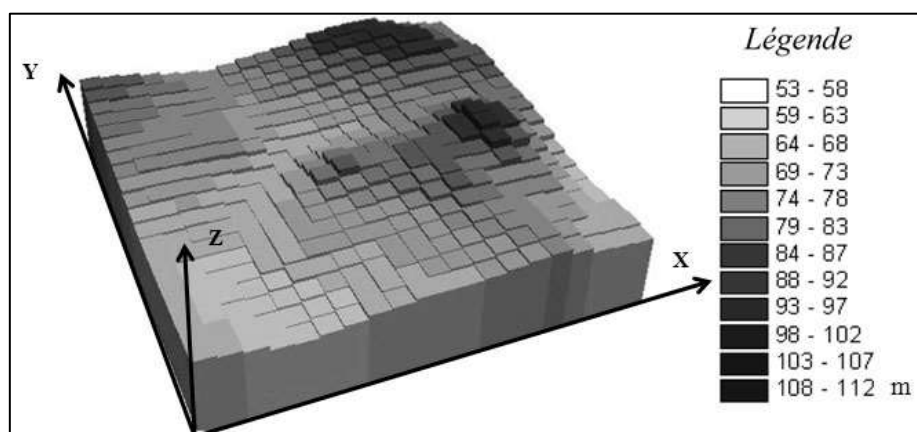


Figure III-1 : Vue perspective (tridimensionnelle, X Y Z) d'un MNT raster (Altitudes en mètres, codées en palettes de gris), modifié de [Mastere, 2008](#).

2.4. Elaboration du MNT

Il existe plusieurs méthodes pour la construction des MNT. Celles-ci, dépendent de la source, la technique de saisie des données de référence, de la méthode d'interpolation et du format final du MNT. La diversité des documents-source, des capteurs et des techniques de positionnement des points permet de choisir théoriquement la technique de construction du MNT à l'échelle la plus appropriée pour une utilisation spécifique. Le Tableau I-1, résume des ordres de grandeur de résolution spatiale et de précision altimétrique (très variable puisqu'elle dépend de nombreux facteurs tels que l'échelle des données sources, le relief, la végétation de la zone observée), et montre que les MNT sont généralement engendrées, soit à partir de cartes d'isocontours issues des cartes topographiques ; soit par analyse photogrammétrique stéréoscopique des photographies aériennes, soit actuellement par autocorrélation numérique de couples stéréoscopiques de données satellitaires stéréoscopiques (Spot par exemple), soit par interférométrie ou radargrammétrie.

⁷ Inter-visibilité : zone qui permet de visualiser une étendue définie dans une unité quelconque autour d'un objet ponctuel ou linéaire en prenant en compte la composante verticale (Z) du MNT.

⁸ SIG : Système d'Information Géographique. Il peut être défini comme étant un programme informatique de gestion de données spatiales ([Boham-Carter, 1994](#)).

	Résolution planimétrique	Estimation de la précision altimétrique
Cartes topographiques + Digitalisation	10-100 m	5-50 m
Photos aériennes + Photogrammétrie	2-30 m	< 4m
Images SPOT + Photogrammétrie	20-40 m	10-20 m
Images Radarsat + Radargrammétrie	30 m	15-25 m
Images radar ERS + Interférométrie	30-40 m	5-20 m

Tableau III-1 : Caractéristiques des MNT suivant les données source et les techniques utilisées (Dupont et al., 1998).

2.5. MNT de la zone d'étude

Le MNT de la zone de Chefchaouen a été calculé automatiquement à partir des données Radar ASTER⁹ GDEM¹⁰. Ces derniers sont directement téléchargeables sur le site officiel de la NASA (<http://www.nasa.gov/>), et correspondent parfaitement à la finalité souhaitée, du moment que la taille d'un pixel est de 25 mètres (échelle bien adaptée à l'étendue de la région d'étude), et que la totalité de la région est disponible.

La construction de ce dernier est passée par plusieurs phases. Nous avons tout d'abord mosaïqué quatre scènes dont les coordonnées sont présentées dans la Figure III-2, et dont notre secteur d'étude se situe au centre (Figure III-2). Ensuite, les données sont rééchantillonnées en une image matricielle codée sur 16-bits et dont la résolution spatiale est de 25x25m. Finalement, avant de produire la carte hypsométrique (Figure III-5) qui servira de base pour l'analyse morphostructurale de notre secteur d'étude, le MNT (Figure III-3) a fait l'objet d'un certain nombre de traitements (filtrages). Ces derniers ont permis de corriger les artefacts dus à la nature du capteur ASTER et d'améliorer sa qualité visuelle.

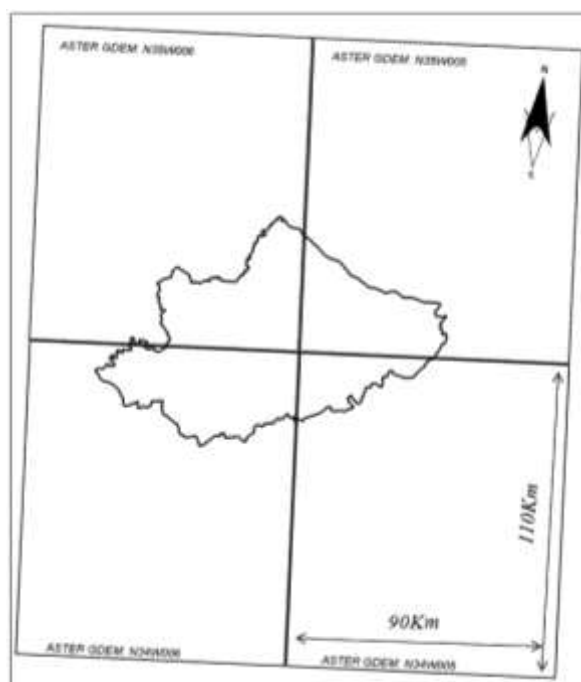


Figure III-2 : Canevas des scènes ASTER GDEM utilisées.

⁹ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

¹⁰ GDEM : Global Digital Elevation Model

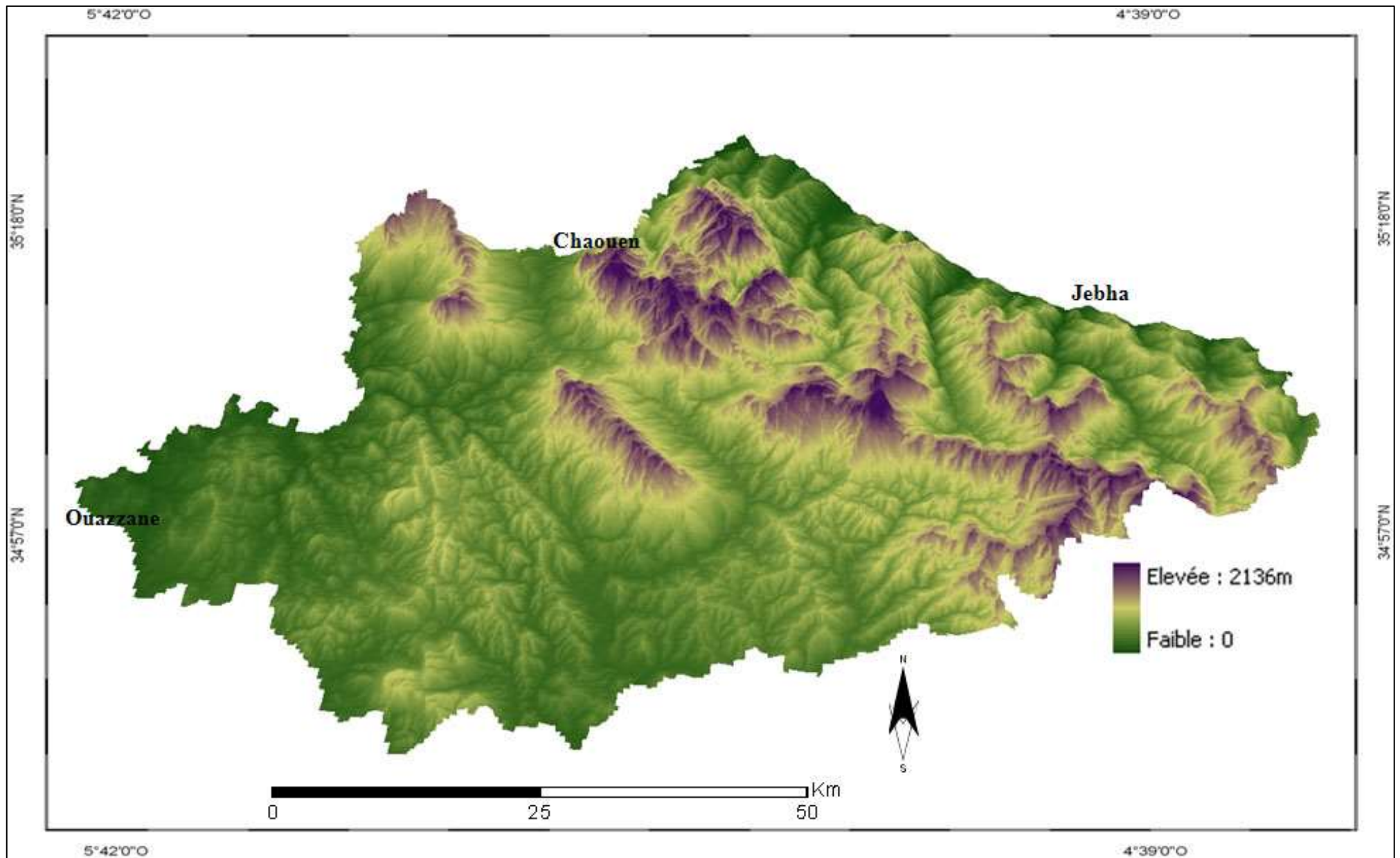


Figure III-3 : Modèle Numérique de terrain de la province de Chefchaouen obtenu à partir des données Radar ASTER GDEM (élévation en m).

2.6. Choix des ASTER GDEM à la place des SRTM

L'utilisation des dalles ASTER GDEM comme données de bases, au lieu des SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponibles gratuitement sur le site officiel de l'USGS est un choix pour 2 raisons majeurs. Primo, les images SRTM présentent l'inconvénient d'avoir une résolution moyenne dans toutes les zones se situant géographiquement en dehors des USA (30 m), et plus particulièrement l'Afrique en plus de la présence d'artefacts sous forme de trous. Secundo, ce type d'imperfections est moins important sur les images ASTER GDEM (également gratuites) mais avec une résolution de 30 à 25 m, y compris l'Afrique. Les deux images suivantes (Figure III-4), mettent en évidence les principales différences entre les terrains SRTM et ASTER GDEM.

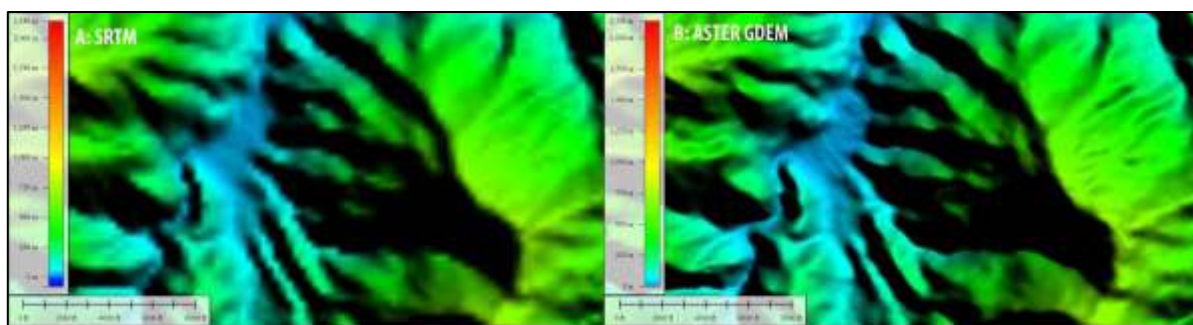


Figure III-4 : Deux types de MNT avec des résolutions différentes ; A : SRTM à 90m, B : ASTER GDEM à 25m.

2.7. Estompage du MNT et anomalies morphostructurales

Une autre application des MNT qui permet une appréciation morphostructurale d'un secteur donné est possible via la réalisation d'un estompage. Il correspond à un mode d'expression du relief en appliquant un ombrage sur la zone d'intérêt, puisqu'il s'agit d'une perception qui nous est familière car les ombres font partie du paysage et que les couleurs masquent les caractéristiques spatiales de haute fréquence. Dans le même sens, l'estompage ou l'ombrage du relief permet de combiner entre la vision synoptique du secteur d'étude afin de déceler les caractéristiques générales de ce dernier, mais aussi une bonne signification géomorphologique et plus précisément les discontinuités morphostructurales qui sembleraient avoir une valeur de fracturation. La figure III-5 montre l'état initial de notre MNT, et l'estompage effectué par l'application d'un filtrage convolutif passe-haut (*high pass*) réalisé à l'aide du programme ERDAS IMAGINE 9.3, avec un gradient d'éclairage venant NW.

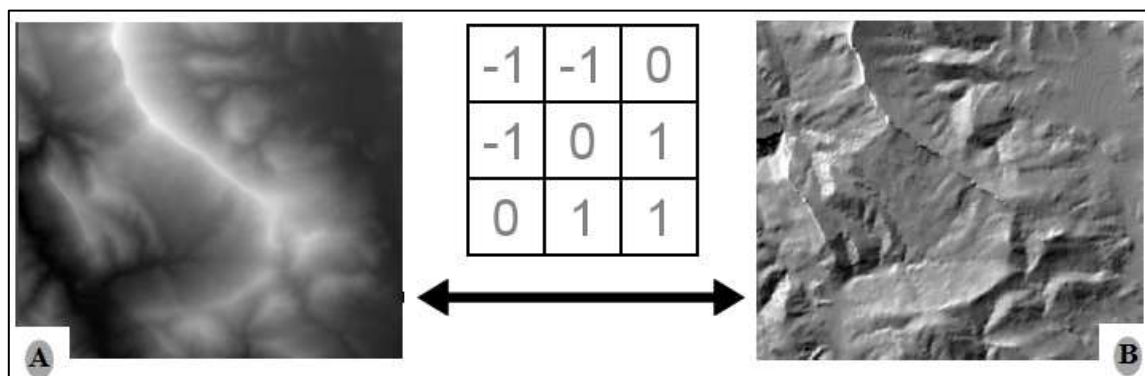


Figure III-5 : MNT (ASTER GDEM) avant (A) et après estompage (B) par l'application d'un filtre convolutif et ombrage directionnel.

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

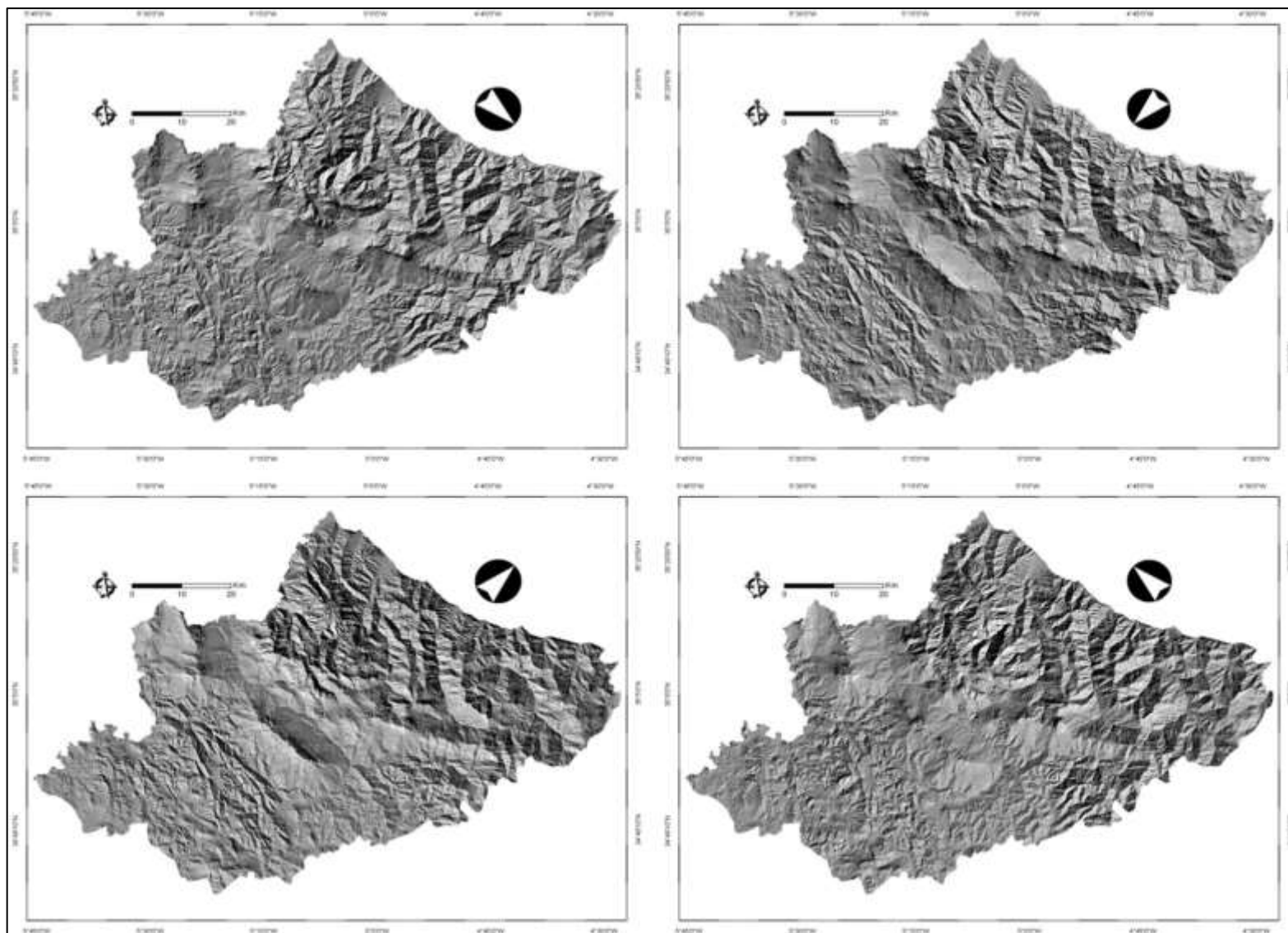


Figure III-6 : Série d'estompages effectuée sur le MNT (ASTER GDEM) de la province de Chefchaouen. La flèche encerclée en noir indique le sens de l'éclairage. Du haut en bas et de gauche à droite les azimuts sont : N315, N045, N135, et N225 ; avec un angle d'incidence de 45° et sans exagération de relief.

Les filtres convolutifs sont basés sur le calcul de la première dérivée de l'élévation combinant à la fois la direction et la valeur de la pente. La valeur de chaque pixel correspond théoriquement à l'intensité de la lumière réfléchiée. Pour un éclaircissement donné, l'estompage est matérialisé par un ombrage ou noircissement de la surface topographique inversement proportionnelle à la quantité d'énergie reçue en tout point par ce terrain. Ainsi, nous avons réalisé une série de quatre estompages pour la province de Chefchaouen (Figure III-6).

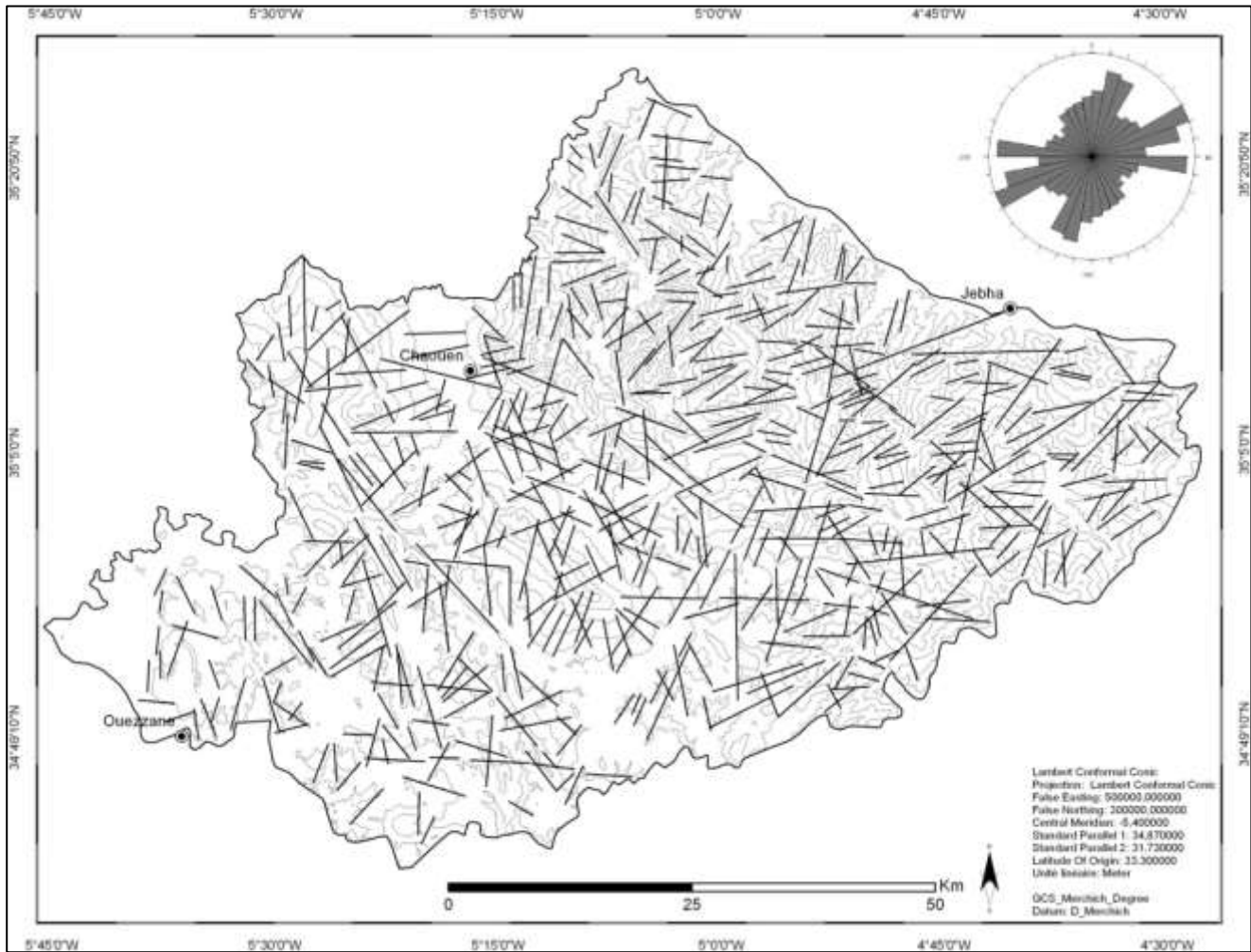


Figure III-7 : grandes anomalies morphostructurales (alignements) extraites manuellement à partir du Modèle Numérique de Terrain.

L'analyse morphostructurale combinée du MNT et de ses estompages par interprétation visuelle assistée par ordinateur, a permis de recensé 613 alignements (Figure III-7) avec une longueur totale de 2523 Km. Ils sont regroupés par classes de 5° en 5° en direction sur un diagramme polaire (rosace, Figure III-7 en haut à droit) où ils sont représentés en nombre par rapport au nombre total. On remarque l'existence des quatre directions majeures : ENE-WSW, NE-SW, E-W et N-S avec une dominante nette de la direction ENE-WSW (direction du couloir de Jebha) (161 linéaments représentant 26% des mesures) dont les valeurs sont comprises entre l'intervalle N060°E à N080°E. La deuxième direction en fréquence qui apparaît représentative, est la direction NE-SW (104 alignements représentant 17% des mesures), les valeurs sont comprises entre N010°E et N030°E où les plus fréquentes sont celles de direction N010-015°E. Les

alignements topographiques de direction E-W et N-S sont les moins fréquents et représentent successivement 16% et 13% du nombre total des alignements. Les alignements E-W ont des directions comprises entre N080-100°E, tandis que les linéaments N-S ont des directions comprises entre N170-10°E avec une dominance de la direction N005°E.

Les 613 alignements obtenus, en plus de ceux qui seront issus à partir de l'analyse du réseau hydrographique seront comparés et validés par les données auxiliaires (cartes géologiques, photogéologiques...) afin d'attester la validité des résultats. Lorsque l'origine anthropique d'un alignement est prouvée par superposition sur les images satellitaires, cartes géologiques et topographiques disponibles (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de transport d'énergie, etc.), il est supprimé de sorte que tous les alignements cartographiés ont une valeur de fracturation.

3. Analyse du réseau hydrographique en termes d'anomalies et perturbations structurales

3.1. Introduction

Le réseau hydrographique correspond à tout écoulement linéaire concentré sur la surface topographique qu'il entaille progressivement. Il représente un état du cycle d'eau et il est en équilibre relatif subinstantané à l'échelle géologique. Les rivières s'écoulent en suivant le chemin le plus facile, minimisant sans cesse leur entropie (Deffontaines, 1990). Le réseau hydrographique est principalement guidé par la lithologie (alternances de roches dures et tendres) et la fracturation. Le long des fractures et des zones broyées, l'érosion et l'altération sont facilitées. Un cours d'eau peut alors se développer rapidement, capturer facilement d'autres cours d'eau, ou bien s'adapter en utilisant des directions structurales. Ainsi, une faille peut bloquer et dévier un cours d'eau ou modifier son régime en augmentant ou diminuant sa pente (Deffontaines et Chorowicz, 1988). Il est donc possible, en étudiant le réseau hydrographique de mettre en évidence une partie de la fracturation, certaines structures géologiques et des critères de déformations de la surface topographique.

3.2. Principes et applications de la méthode

En partant du principe, que tout cours d'eau s'écoule nécessairement d'une zone haute vers une zone basse, selon la direction de la plus grande pente, il est possible, en étudiant le réseau hydrographique de mettre en évidence les discontinuités qui l'affectent. Nous avons appliqué cette méthode au réseau hydrographique de la province de Chefchaouen. Les résultats de l'analyse sont ensuite rassemblés avec ceux issus de l'analyse morphostructurale du MNT pour constituer la carte de fracturation récente de la province de Chefchaouen.

3.3. Facteurs de contrôle de forme du réseau hydrographique

Le tracé du réseau hydrographique résulte des interactions simultanées des facteurs internes, externes et composites (Deffontaines et chorowicz, 1988 ; Deffontaines, 1990). Parmi les facteurs internes on peut citer la lithologie, (épaisseur, dureté, compétence, perméabilité, porosité,

dissolution, diagénèse, etc...), et la structure qui peut se manifester de différentes manières (l'agencement des roches, l'épaisseur des bancs, leurs pendages, les alternances lithologiques, les discordances, et le diaclasage, etc...). Quant aux facteurs externes, ils se résument en l'action du climat, de la couverture végétale et de l'action anthropique. Ces trois facteurs peuvent agir considérablement sur la forme, le sens d'écoulement, et le débit des réseaux hydrographiques. Pour les facteurs composites, ils consignent les effets précédemment décrits des facteurs internes et externes.

3.4. Perturbation du réseau hydrographique

Elles sont représentées par les rectilinéarités majeures, les grands alignements de cours d'eau, de coudes des rivières, de confluence mais aussi par les modifications de grande amplitude de types de réseau hydrographique : radial (centripète ou centrifuge), ou annulaire (Howard, 1967). Elles peuvent recouper indistinctement les différentes zones subhomogènes et peuvent aussi correspondre aux limites d'ensembles subhomogènes. Elles correspondent à l'action de la structure ou de la lithologie (Defontaines, 1990).

3.5. Anomalies du réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est souvent affecté par des discontinuités structurales dont la représentation sur le terrain recouvre différentes réalités. Le plus souvent, les perturbations du réseau hydrographique sont constituées par un alignement de segments de cours d'eau, de coudes de rivières ou de sources. Ces perturbations correspondant essentiellement à l'influence de la structure de la lithologie ou de l'action anthropique. Ils peuvent aussi correspondre aux limites des ensembles subhomogènes.

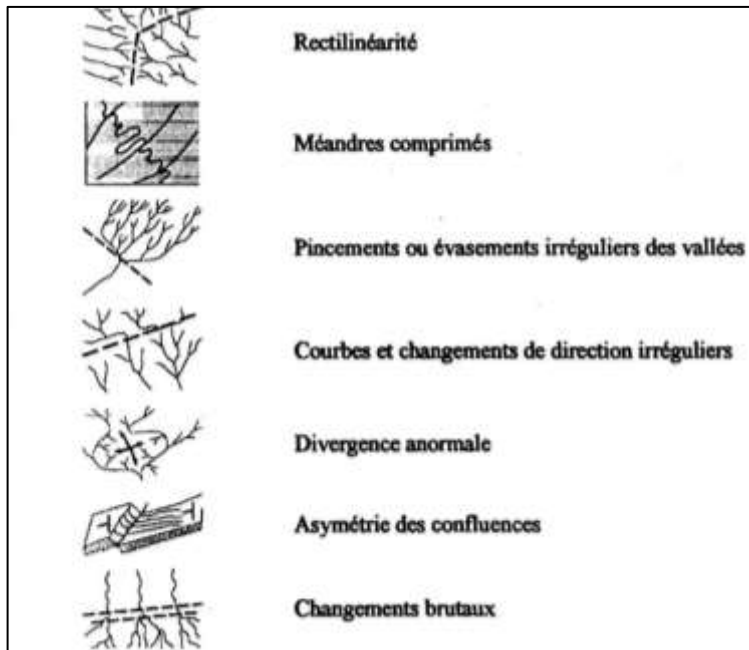


Figure III-8 : Principales anomalies de drainages, d'après Le Pape, 1994.

L'anomalie de drainage traduit un écart entre un modèle théorique d'écoulement (du point le plus haut vers le point le plus bas suivant la direction de plus grande pente) et la réalité observée. Si le réseau d'entaille était seulement dirigé par la topographie, tous les drains suivraient la ligne de la plus grande pente. Beaucoup de réseaux présentent des tronçons obliques par rapport au drainage théorique, voir des directions opposées à celui-ci, par conséquent leur origine est donc à rechercher par une éventuelle influence lithologique et/ou structurale (Deffontaines et al., 1992). Les anomalies de drainage permettent, une fois analysées, d'avoir accès à des caractères structuraux souvent non détectables par d'autres méthodes. Les anomalies soulignent ainsi l'existence de caractères structuraux souvent cachés. Parmi la multitude d'anomalies proposées dans la littérature et pour lesquels des causes contrôlées au sol ont été reconnues (Deffontaines, 1990). Nous ne présenterons ici que les principales (Figure III-8).

3.6. Réseau hydrographique du secteur d'étude

3.6.1. Préparation des données

Pour construire le réseau hydrographique à l'échelle de la province de Chefchaouen, une étude du Modèle Numérique de Terrain (MNT) nous a semblé être incontournable. En effet, nous avons eu recours aux mêmes données Radar ASTER GEDM que nous avons corrigées précédemment et utilisées dans ce chapitre pour la cartographie des anomalies morphostructurale du secteur d'étude.

La première étape (réalisé dans la partie 1 de ce chapitre) a consisté en la construction d'une mosaïque de tous les DEM (Figure III-2) puisque notre région d'étude est répartie sur plusieurs DEM (quatre). Ensuite, les images ASTER telles que nous les avons téléchargées sont exprimées en WGS84, utilisant comme unités les degrés. Pour pouvoir les utiliser et effectuer les calculs sous ArcGis, il a fallu les transformer en système métrique, tout en gardant le même système de projection. Cependant, les calculs prévus sont lourds en temps et en ressources informatiques, raison pour laquelle nous avons jugé judicieux de nous limiter à la zone d'étude (matérialisée par un polygone comme montré dans la Figure III-2), et cela en réalisant un découpage par masque.

3.6.2. Traitement des données hydrographiques sous SAGA

SAGA est un logiciel libre et gratuit, téléchargeable sur le lien <http://www.saga-gis.uni-goettingen.de/html/index.php>. Il est spécialisé dans les traitements des MNTs, et présente plus de choix de logarithmes de calcul que d'autres logiciels tel que ArcGis, MapInfo ou Surfer, d'où notre choix pour ce logiciel. Dans cette présente démarche, nous n'allons présenter qu'une seule méthode, mais il est intéressant de signaler que ce logiciel présente pour le calcul du réseau hydrographique, plusieurs méthodes que nous avons toutes essayées et comparées, mais nous n'avons retenu que celle qui fournit des résultats proches de la réalité du terrain, par comparaison avec les cartes IGN qui couvrent notre région d'étude.

Dans un premier temps, nous avons transformé notre DEM en Format ASCII pour pouvoir l'importer (Figure III-9A) et l'exploiter sous SAGA. Nous avons cependant réalisé un prétraitement à l'aide du module *Terrain Analyst – Preprocessing/Fill Sinks* (Figure III-9B), afin d'éliminer les imperfections contenues dans le MNT. Ces dernières s'appellent "cuvettes" et faussent considérablement les calculs hydrographiques. Ensuite, l'extraction du réseau

hydrographique a été effectuée à partir du fichier « rempli » en utilisant la méthode MultiFlux. Le résultat obtenu est automatiquement nommé “Catchement Area” (Figure III-9C), et est exporté en format ASCII pour qu’on le finalise sous ArcGis.

3.6.3. Traitement des données sous ArcGis

Une fois sous ArcGis les données calculées ont été transformées au format Grid. À l’aide de la fonction *calculatrice raster* dans *Spatial Analyst*, on crée un raster (calcul) en utilisant la formule suivante : $[Catchement Area] > 1\ 000\ 000$ où le programme retourne une valeur de 1 pour chaque pixel du raster initial possédant une valeur supérieure à un million, et 0 pour ceux qui sont inférieures à la valeur fixée. À ce stade, le réseau hydrographique est mis en exergue, reste à le comparer avec les cartes IGN.

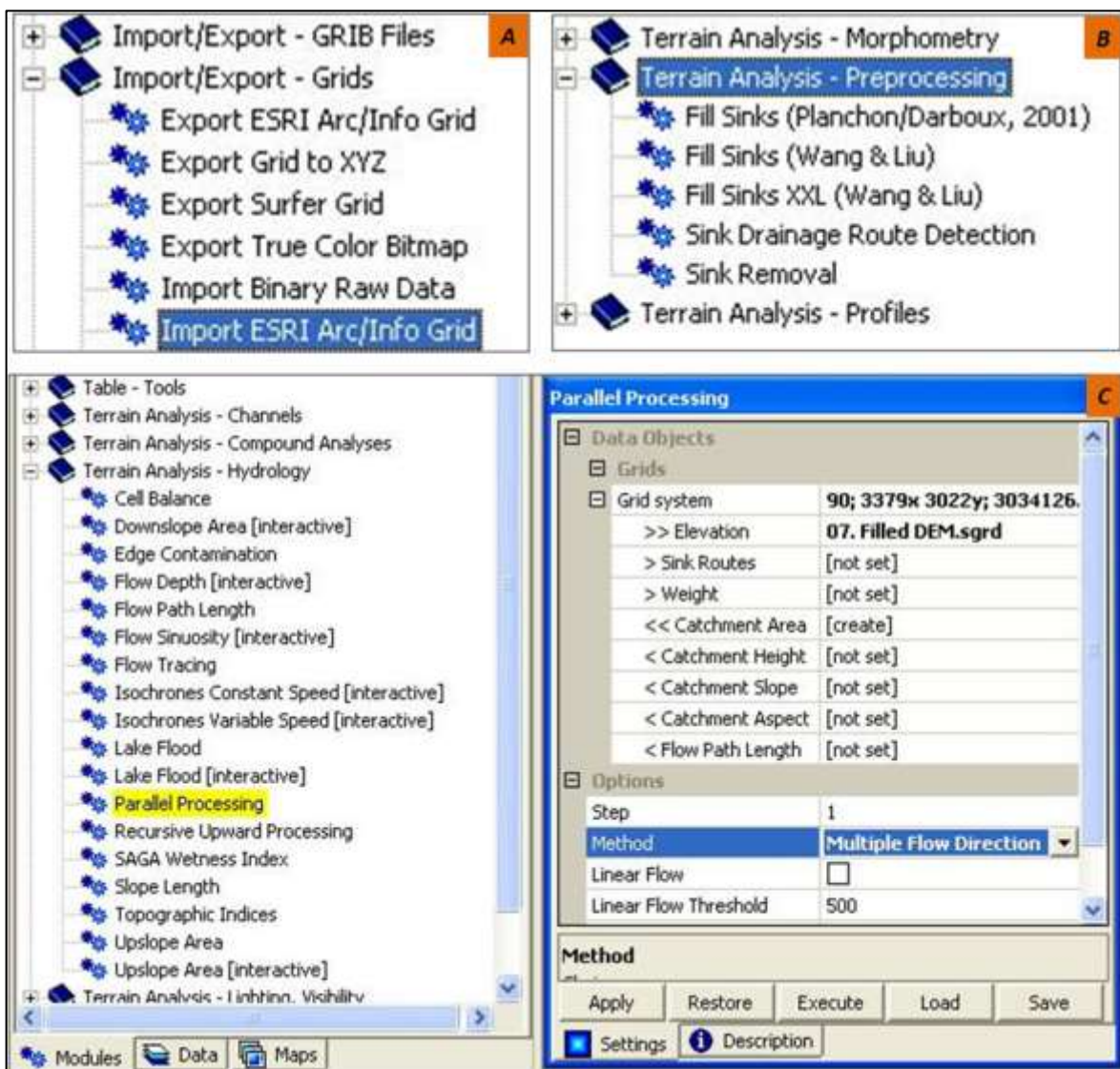


Figure III-9 : illustration de la démarche menée sous le programme SAGA pour les calculs hydrographiques à partir du MNT.

Ensuite, nous avons affecté la couleur bleu pour les pixels ayant une valeur 1, et aucune couleur pour la valeur 0. Ensuite on superpose les cartes et le raster calcul. On remarque qu'il existe un décalage constant et homogène, ce qui nous a laissé penser que cette différence est due à la différence des deux systèmes de projection. Cette hypothèse est vite vérifiée vue que l'écart a diminué en ramenant les deux fichiers au même système de projection. Le petit décalage peut s'expliquer par le caractère « ancien » des cartes IGN de notre secteur d'étude qui datent des années soixante-dix. Ceci nous a permis de conclure que c'est tout à fait normal qu'il y ait de légères différences morphologiques et altitudinales et que la configuration du réseau hydrographique a évolué modérément durant 30 ans. Nous avons donc opté pour un lissage et puis un recalage manuel, pour minimiser au maximum les écarts observés entre le fond topographique IGN et le MNT afin d'obtenir la carte du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen (Figure III-10).

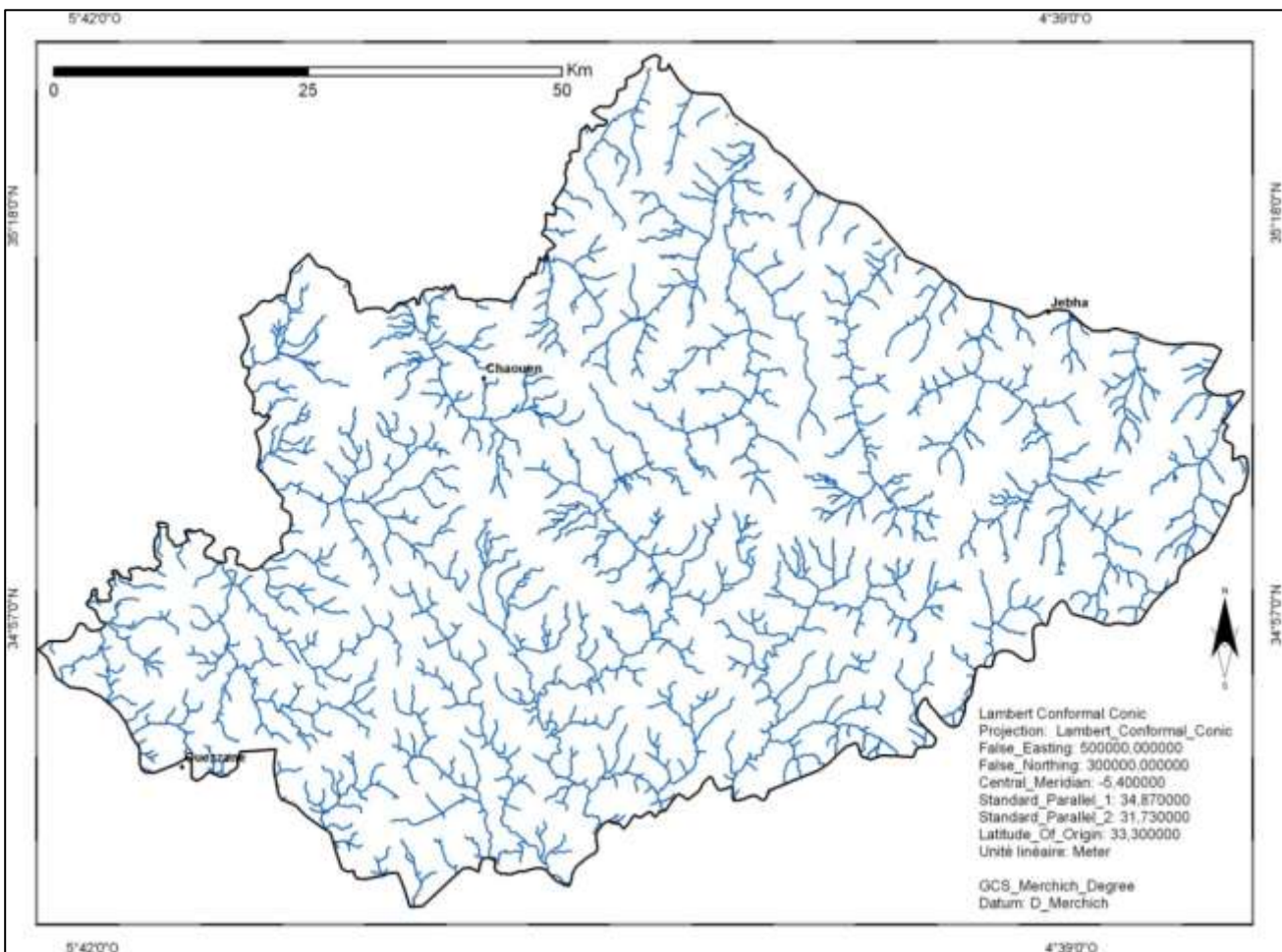


Figure III-10 : Carte du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen obtenue sous SAGA et ArcGis 10.

3.7. Anomalies de drainage dans le secteur d'étude

L'analyse du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen nous a permis le recensement de 409 anomalies avec une longueur totale de 930 Km (Figure III-11), qui montrent deux directions majeures qui, respectivement par ordre d'importance sont : NE-SW, et NW-SE,

auxquelles sont associées deux directions secondaires E-W et N-S. Ces anomalies sont d'origine lithologique ou structurale. Nous n'avons retenu que les anomalies d'origine structurale, que nous rassemblerons avec les anomalies issues de l'analyse morphostructurale. Ceci nous a permis de dresser une carte synthétique de la fracturation récente du secteur d'étude (Figure III-11). Celle-ci, met en évidence les principales failles qui ont une influence directe sur le réseau hydrographique. Certaines failles se superposent parfaitement aux failles à activité néogène et quaternaire décrites précédemment par nos prédécesseurs (Morel, 1988 ; Aït Brahim, 1991 ; Deffontaines et al., 1992 ; Chaoui, 1996) et d'autres, détectées pour la première fois et peuvent avoir une origine néotectonique.

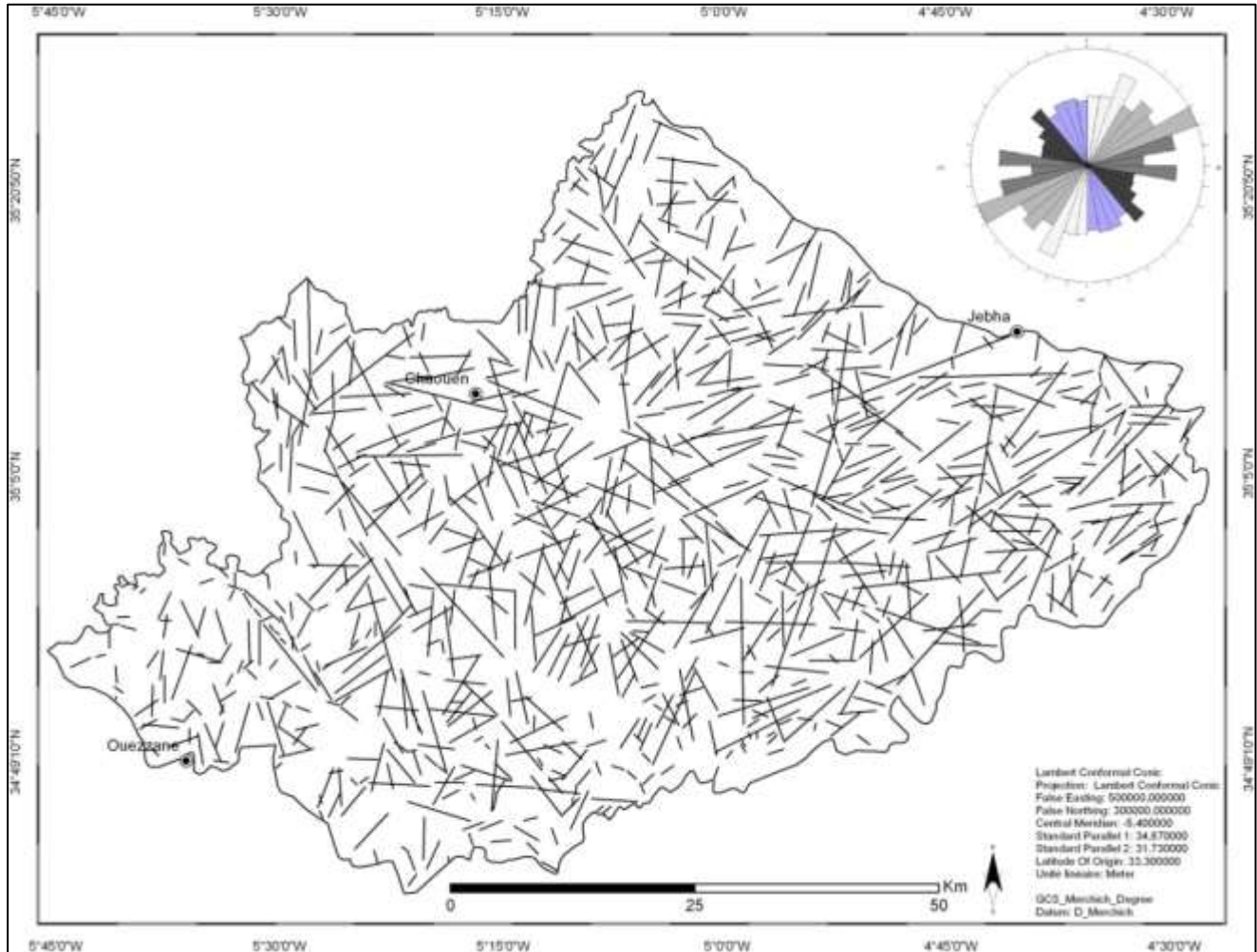


Figure III-11 : Carte des alignements de la province de Chefchaouen extraits du réseau hydrographique.

4. Conclusion du chapitre 3

L'analyse de la surface topographique à partir du MNT ainsi que des perturbations et anomalies du réseau hydrographique, nous ont permis de mettre en évidence des discontinuités d'origines lithologiques, structurales et même anthropiques (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de transport d'énergie, etc.). Après confrontation avec les cartes géologiques, les photoaériennes, les cartes topographiques, et surtout la couverture satellitaire

haute résolution disponible sous Google Earth Pro...etc, nous n'avons retenu sur la carte de synthèse (Figure III-11) que les discontinuités qui auraient une valeur de fracturation. Ces discontinuités à activité néotectonique ou actuelle ayant entraîné ces perturbations dans le secteur d'étude s'organisent en quatre grandes familles : une famille N-S, une autre NE-SW, une E-W et une dernière NW-SE (Figure III-11). Les discontinuités qui se superposent ont été éliminées, pour éviter la redondance de données.

Le réseau NE-SW est très bien représenté au niveau de tout le secteur d'étude à l'exception de la partie NNW de ce dernier. Il est caractérisé par des navettes tectoniques de taille kilométrique. Il est représenté par l'accident majeur de Jebha et son prolongement vers le SE accompagnée des fractures dispersées constituant un couloir de faille. Le réseau de direction E-W est présent dans la quasi-totalité du secteur d'étude notamment au niveau des petites plaines tels que : le Beni Mathar, Dkhissa, Bab Bared, Ouazguita...etc. Le réseau NW-SE est le moins important dans tout le secteur d'étude, en effet il la traverse sur quelques dizaines de kilomètres (failles bordières des Ghomaarides). Quelques-unes de ces failles semblent présenter un caractère récent, en effet, elles traversent les terrains Quaternaire (Post-Ouljien). Le caractère juvénile d'un grand nombre de ces structures est attesté par le fait qu'elles traversent les différents domaines du secteur d'étude en recoupant et décalant les autres directions. Finalement, le réseau N-S qui est essentiellement néoformé comme c'est le cas pour l'ensemble des domaines morphostructuraux du Rif septentrional ([Aït Brahim, 1991](#) ; [Aït Brahim et al., 2002](#) ; [Deffontaines et al., 1992](#) ; [Chaoui, 1996](#) ; [Chalouan et al., 2008](#)).

Cette néofracturation résultant de l'analyse du MNT et du réseau hydrographique sera intégrée à la carte de la fracturation issue des analyses directionnelles et non directionnelles des données de télédétection spatiale, en plus de celle obtenue par synthèse bibliographique. Ceci, afin d'établir la carte de fracturation totale qui est un facteur conditionnant lors de la cartographie de l'aléa (et/ou la susceptibilité) aux mouvements de terrain.

CHAPITRE IV : LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : CLASSIFICATION, INVENTAIRE, DESCRIPTION ET ANALYSE

Résumé du chapitre

Le quatrième chapitre, dresse un état d'art sur les méthodes de classification des mouvements de terrain. Cela a permis de définir une typologie générale et pragmatique des mouvements de terrain rencontrés dans le domaine Rifain. Ensuite, après avoir exposé la méthodologie et les différentes techniques utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain de notre secteur et leur caractérisation, il a été prouvé que les bases de données antérieurement utilisées sont erronées ou incomplètes. L'inventaire effectué a permis de reconnaître cinq grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit, des glissements, des écroulements, des coulées de débris, des sapements de berges et de routes, et des badlands. Ensuite, les facteurs qui peuvent affecter la qualité d'un inventaire de mouvements de terrain ont été discutés. Dans le même sens la qualité de la carte établie dans le cadre de ce chapitre a été comparée avec d'autres cartes, avant de procéder finalement à la description détaillée de trois cas particuliers et représentatifs des mouvements de versants du secteur de Chefchaouen : Amtrass, Bou Halla et Chrafate. La dernière partie de ce chapitre a porté sur l'analyse de la représentativité, l'abondance, et la densité des phénomènes inventoriés.

1. Typologie et classification des mouvements de terrain

1.1. Typologie

1.1.1. Etat de l'art

Les mouvements de terrain peuvent être définis comme étant une manifestation d'instabilité de la partie superficielle de la croûte terrestre sous l'effet d'agents gravitaires et hydrauliques (Figure IV-1). Etant donnée la diversité des mouvements rencontrés dans la nature, le terme le plus adéquat pour réunir tout mouvement en masse, du sol ou de la roche, sur une pente par glissement, coulée, chute ou par simple reptation est celui de "mouvement de versants" (*slope movements*) au sens de [Varnes, 1978](#). L'expression "glissement de terrain" ("ou landslides"), couramment étiquetée à tout mouvement affectant les versants, est réservée pour désigner un type bien particulier de mouvement. Depuis les premières classifications des MT ([Sharp, 1938](#); [Varnes, 1958](#); [Varnes, 1974](#); [Nemcok et al., 1972](#); [Hutchinson, 1988](#); [Sassa, 1988...etc](#)), on constate qu'une grande variété de mouvements gravitaires a été reconnue en fonction de leur nature, de leur cinématique ou de leur dynamique. Ce sont : les éboulements, les effondrements, le fauchage, les glissements, le fluage, les affaissements et les effondrements...etc. Le lecteur pourra s'étonner de voir ici rassemblés sous le même titre des phénomènes aussi différents que chutes de pierres et glissements. La plupart de ces phénomènes sont discrets dans le temps (Tableau IV-1). Ils présentent souvent des phases d'évolution lentes, imperceptibles pour l'homme, malgré la stabilité apparente mais trompeuse du versant. Parfois, ils peuvent passer des phases d'évolution lentes à des accélérations brutales suite à des précipitations intenses ou à des sollicitations sismiques, pouvant déclencher des catastrophes plus ou moins graves.

Cependant, la typologie et la terminologie pour classer les différents types de MT restent très ambiguës ; et jusqu'à l'heure actuelle elle n'existe aucune classification standard gérant tous les types de mouvements de terrain. Cela se justifie par le fait que les conditions géologiques et géomorphologiques, les conditions climatiques, l'occupation des sols et, la vitesse des phénomènes changent d'un contexte à un autre. Pour cette raison, pour un même type de phénomène, il est possible de distinguer plusieurs d'autres sous-types si l'on veut détailler la description. [Millies-Lacroix, 1981](#) et [Flageollet, 1989](#) n'ont pas manqué de signaler les confusions existantes entre les différentes appellations pour définir ces processus. [Colin en 1846](#) (in [Cruden, 1996](#)) a différencié entre des mouvements superficiels, et des mouvements profonds. Ensuite, [Dana en 1862](#) (in [Cruden, 2003](#)) définit trois types de mouvements de terrain, à savoir : les coulées de débris (*debris flow*), les étirements de sols (*earth spreads*), et les glissements rocheux (*rockslide*). Depuis, de très nombreuses classifications ont été proposées. Basées sur des critères différents, ces classifications considèrent tantôt les caractéristiques du matériau affecté par le MT, tantôt les caractéristiques de ce dernier telle que sa morphologie ou encore les conséquences qui en résultent.

1.2. Classification

Les nombreux auteurs ayant travaillé sur les MT au Maroc ([Millies-Lacroix, 1968](#); [Azzouz et al., 2002](#); [Fares, 1994](#); [El Khatabi et al., 2004](#); [El Khatabi 2001](#); [El Kharim 2002](#); [Mansour 1998](#); [Mansour et Ait Brahim, 2005](#); [Sossey Alaoui 2005...](#)); ont généralement tous fait appel à la classification et aux définitions de [Varnes \(1978\)](#), ou à la version reprise et améliorée de celles-ci par [Cruden et Varnes \(1996\)](#).

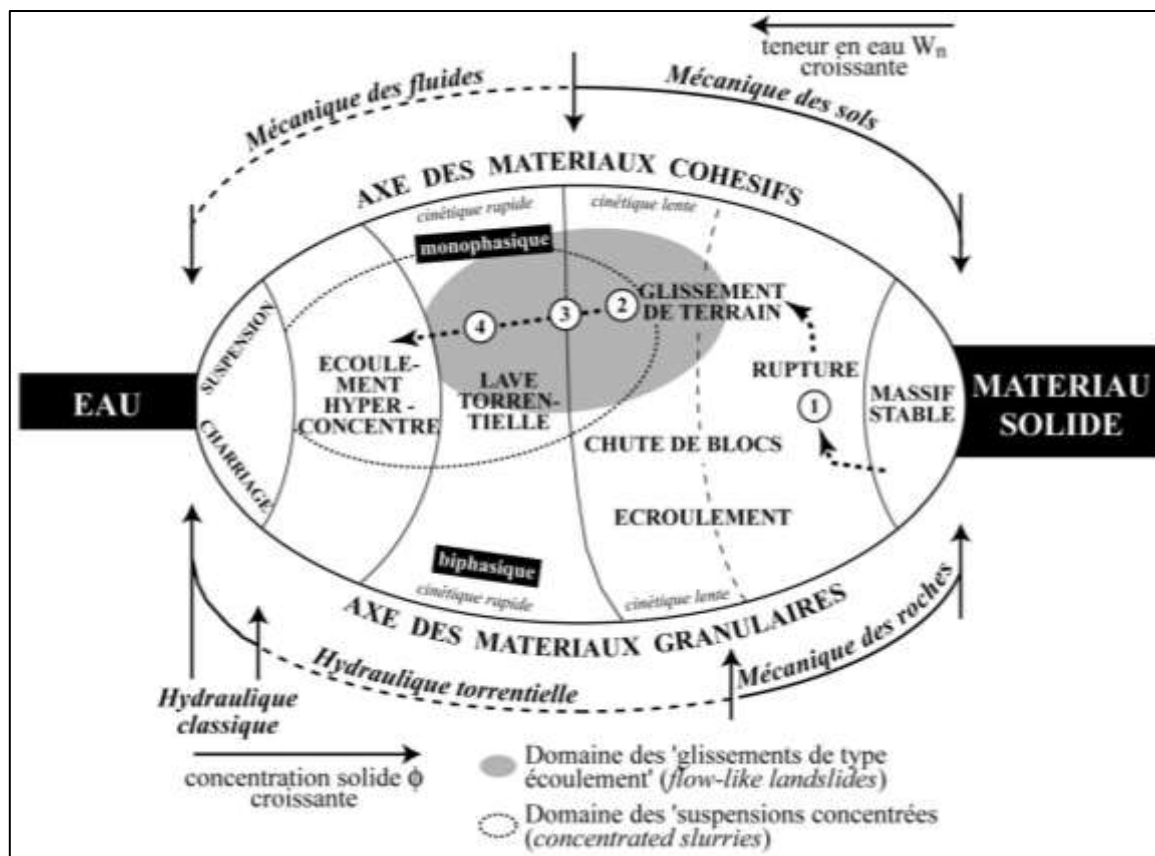


Figure IV-1 : Répartition des phénomènes hydrogravitaires et domaines de comportement, d'après Meunier, 1991 ; modifié par Malet, 2003.

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

Tableau IV-1 : classification des MT selon des critères cinématiques, d'après Varnes, 1978 et Crozier, 1986. E.R. : extrêmement rapide, T.R. : très rapide, R. : rapide, M. : modéré, L. : lent, T.L. : très lent, E.L. : extrêmement lent, adaptée par Campina, 2005.

De cette dernière découle celles de Corominas (1989) et de Corominas et Garcia Yagüe (1997). Les géologues ingénieurs francophones optent pour la classification de Colas et Pilot (1976) qui dérive de celle proposée par Nemock et al., (1972). Une vue d'ensemble sur ces travaux permet de conclure que trois types de classification peuvent être distingués. La première fondée sur la morphologie et la géométrie des mouvements de terrain (Tableau IV-2). Une deuxième basée sur la cinématique ou la dynamique des phénomènes (Tableau IV-1). Et finalement une troisième qui combine les critères de la plus part des précédentes classifications.

Type de mouvement			Type de matériau		
			Roche	Sols	
				Grossiers	Fins
Chutes			Ecroulement rocheux <i>Rock fall</i>	Ecroulement de débris <i>Debris fall</i>	Écoulement de terrain <i>Earth fall</i>
Basculements			Basculement rocheux <i>Rock topple</i>	Basculement de débris <i>Debris topple</i>	Basculement de terrain <i>Earth topple</i>
Glissements	rotation	Peu d'unités	Affaissement rocheux <i>Rock slump</i>	Affaissement de débris <i>Debris slump</i>	Affaissement de terrain <i>Earth slump</i>
			Masse rocheuse en glissement <i>Rock block slide</i>	Débris en glissement <i>Debris block slide</i>	Terrain en glissement <i>Earth block slide</i>
	translation	Unités multiples	Glissement rocheux <i>Rockslide</i>	Glissement de débris <i>Debris slide</i>	Glissement de terrain <i>Earth slide</i>
Etalements latéraux			Etalement de roche <i>Rock spread</i>	Etalement de débris <i>Debris spread</i>	Etalement de terrain <i>Earth spread</i>
Ecoulements			Avalanche de roches <i>Rock flow</i>	Lave torrentielle <i>Debris flow</i>	Coulée de terrain <i>Earth flow</i>
Complexes			Combinaison de deux ou plusieurs types de mouvements principaux		

Tableau IV-2 : classification des mouvements de terrain selon des critères morphologiques et géométriques, d'après Varnes, 1978, adaptée par Campina, 2005.

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

Cela nous a permis de retenir quatre grandes familles de phénomènes, simple à cartographier et à reconnaître d'un point de vue morphologique sur photos aériennes, à savoir:

- i. Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs.

- ii. Les glissements.
- iii. Les écoulements, ou coulées de masses.
- iv. Les mouvements complexes, ou mixtes.

Etant donné le mode de cartographie que nous avons utilisé et qui est basé essentiellement sur la photo-interprétation des photosatellites du programme Google Earth, cette classification s'est révélée à l'usage la plus appropriée, en la couplant à un paramètre de caractérisation de fonctionnalité des mouvements (actif, non actif, fossile). Quant aux images utilisées par le programme Google Earth, il faut signaler que leur résolution n'est pas homogène sur toute la région. Pour notre secteur d'étude la globalité des images a une très bonne résolution, puisqu'elles sont composées en grande partie par des scènes Spot5 d'une résolution de 2.5m. Certains endroits sont encore plus précis, notamment au niveau des grands villages et douars.

1.2.1. Les éboulements, les chutes de pierres et de blocs

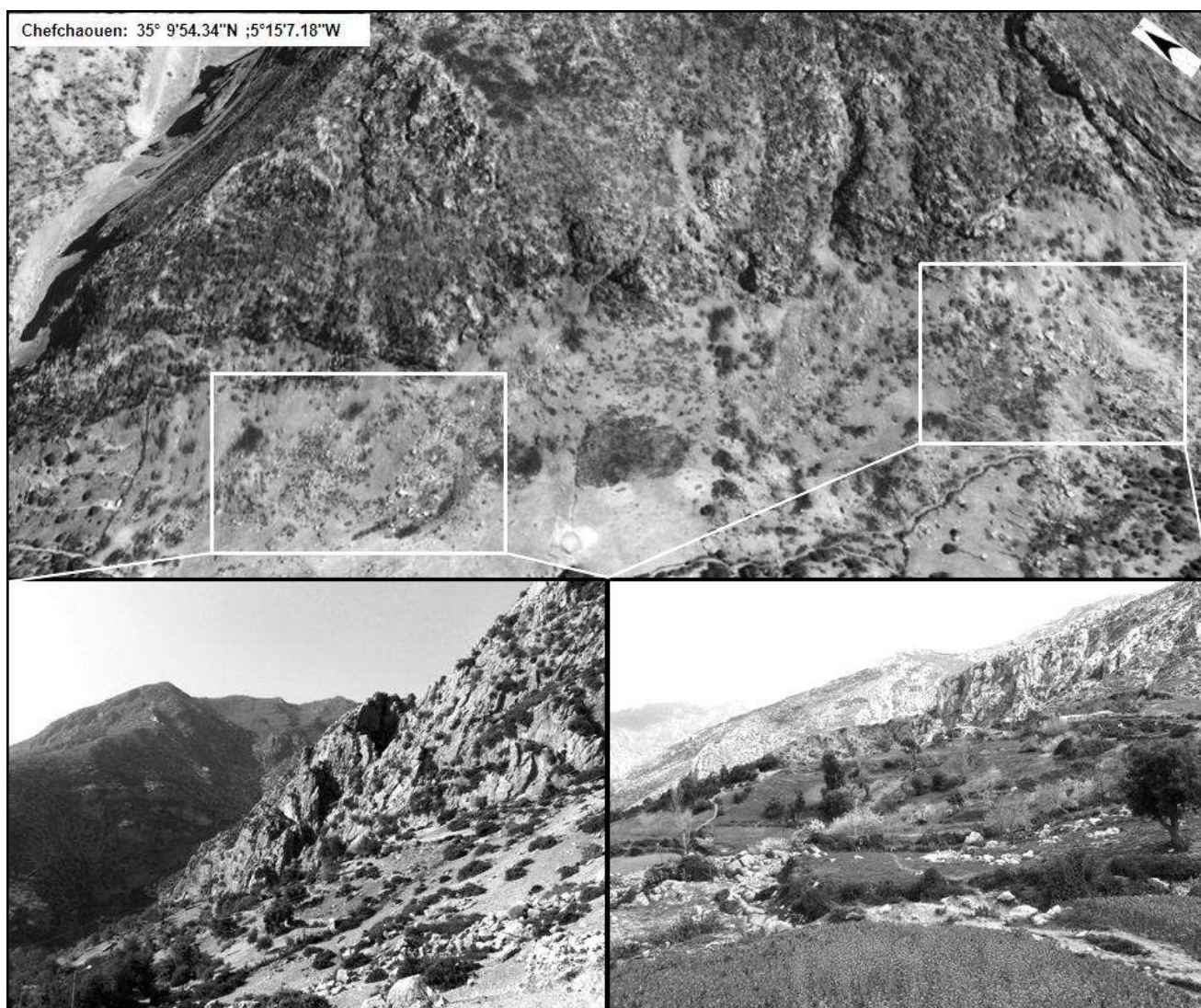


Figure IV-2 : exemple d'éroulements de la Dorsale Calcaire bordant longeant l'Est de la commune urbaine de Chefchaouen ; sur un extrait satellitaire (en haut) THR (2.5m de Spot 5), avec détails de terrain (en bas).

Cette classe regroupe un ensemble de phénomènes rapides et brutaux qui affectent généralement des roches rigides et fracturées tels que les calcaires, les grès, ou les roches

crystallines, etc. Dans le cas des roches sédimentaires, les joints de stratification et le diaclasage accroissent le nombre de discontinuités dans la roche et donc sa prédisposition à l'instabilité. La phase de préparation de la chute d'éléments rocheux est longue, et difficile à déceler (altération des joints de stratification, endommagement progressif des roches qui conduit à l'ouverture limitée des fractures, etc.). La phase d'accélération qui va jusqu'à la rupture est brève (Selby, 1993 ; Flageollet et al., 1996...) ce qui rend ces phénomènes très difficilement prévisibles. Les facteurs naturels favorisant leur déclenchement sont nombreux. On peut citer par exemple les fortes variations de températures (thermoclastie, cycle gel/dégel), la croissance de la végétation (disjonction racinaire) ou au contraire sa disparition, les pressions hydrostatiques imposées par la pluviométrie et la fonte des neiges, les séismes...etc (cf. chapitre 6).

Le volume total éboulé permet de différencier les différents phénomènes entre eux (Whalley et al., 1983 ; Whalley, 1984) : on parle de chutes de pierres et de blocs lorsque ce volume est inférieur à la centaine de m³, d'éboulement lorsqu'il est compris entre quelques centaines de m³ et quelques centaines de milliers de m³, et d'éboulement (Figure IV-7) en grande masse (ou écroulement) lorsqu'il est supérieur au million de m³.

La figure IV-2 montre un exemple d'écroulement de barre rocheuse au niveau des terrains de la Dorsale Calcaire qui constitue la limite Est de l'extension urbaine de Chefchaouen. Ce phénomène se rencontre essentiellement sur les terrains calcaires massifs (UG4, cf. Section 1 Chapitre 5), mais sur les autres massifs rocheux gréseux ou quartzitiques du secteur (UG8, cf. Section 1 Chapitre 5), notamment à Ouazzane, Beni Ahmed, et El Jebha. Les écroulements deviennent moins fréquents dans les secteurs de Bab Barred et Tamorot, voire quasi inexistants comme à Zoumi où nous n'en avons dénombré qu'un seul, sur un secteur d'environ 630 Km² de superficie. D'autres écroulements bien connus ont été largement décrits (Chawki, 1991, Mansour et Ait Brahim, 2005 ; Sossey Alaoui, 2005 ; Mastere, 2008 ; El Fahchouch, 2008 ; Mastere et al., 2009) tels que ceux du Jbel Akroud, Jbel Khizana, ou le massif de Cherafate.

1.2.2. Les glissements

Les glissements de terrain correspondent à des déplacements lents d'une masse de terre généralement cohérente, surtout dans le cas des sols et des formations tendres. Quand il s'agit de formations rocheuses compétentes, les glissements se manifestent généralement par une très grande vitesse, de l'ordre de 3m/s (Tableau IV-2). La formation d'un glissement de terrain implique l'existence initiale d'une surface de rupture généralement courbe ou plane.

Les glissements de terrain se répartissent sur la totalité du secteur d'étude. Il est à noter cependant, que les plus importants d'entre eux, se concentrent au niveau des principaux fronts de chevauchement, comme dans le cas pour le glissement de Bou Halla qui sera abordé en détail plus loin dans ce même chapitre, et qui prend naissance en faveur d'un contact anormal, entre les terrains de la Dorsale Calcaire externe et l'unité de la nappe de flysch de Tanger – Kétama. Selon leurs types, les glissements de terrain peuvent présenter des caractéristiques très différentes et atteindre des dimensions très variables (Figure IV-3D, Beni Ahmed). Dans le secteur d'étude, les glissements se rencontrent essentiellement dans les unités géotechniques et géomorphologiques UG5, suivie de l'UG3 et puis l'UG6 (Cf. conclusion Section 1 Chapitre 5). Finalement, d'une façon simple on peut distinguer deux types de glissements.

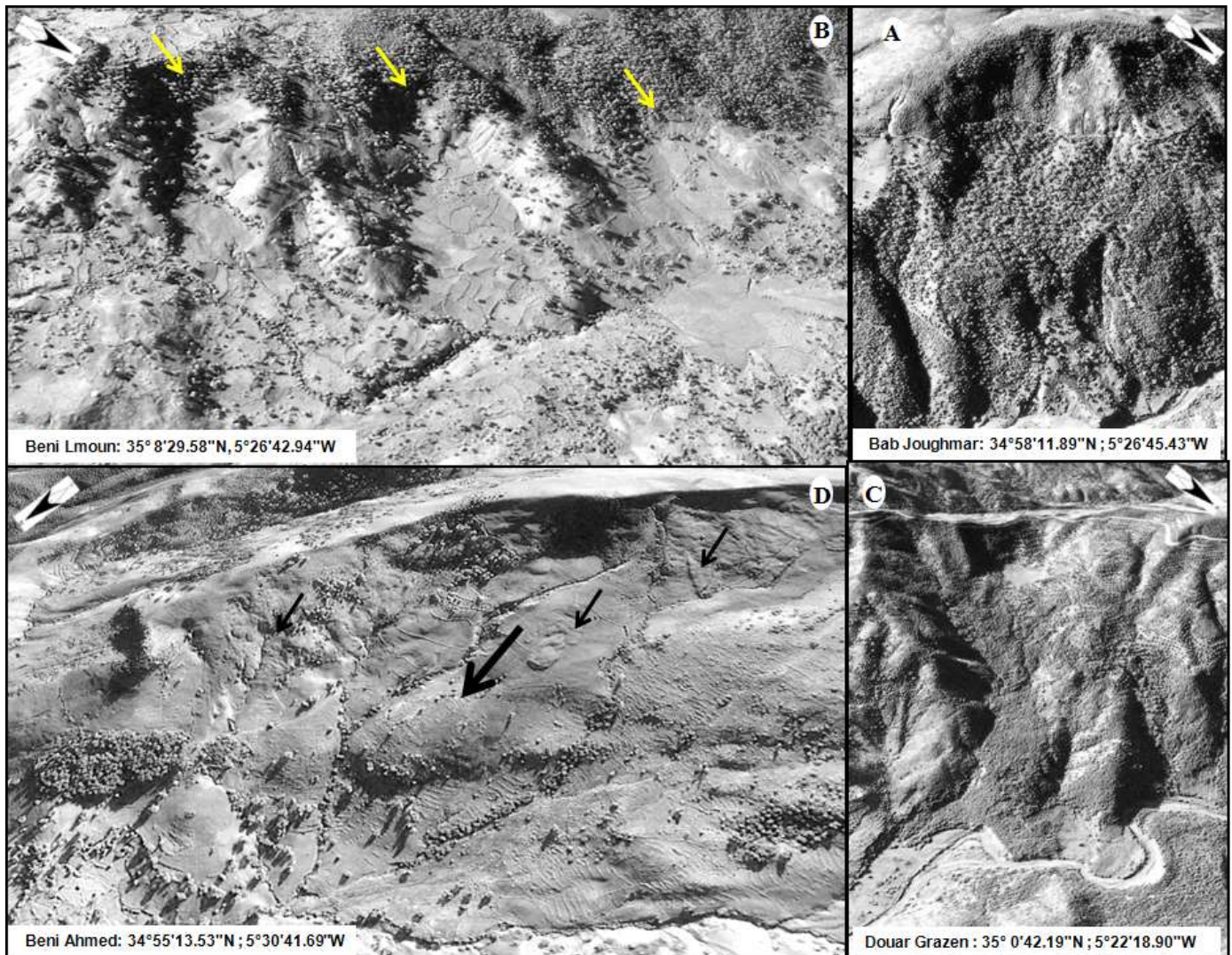


Figure IV-3 : exemples de glissements de terrain repérés sur l'imagerie satellitaire THR Spot5 (base de données Google Earth Pro). A : glissement translationnel ; B : glissements superficiels, les flèches indiquent les zones de départ ; C : glissement translationnel ; D : glissements superficiels, la grande flèche indique la zone de départ du glissement principale, alors que les petites flèches montrent des glissements secondaires à taille réduite.

1.2.2.1. Glissement plan ou translationnel

Prend naissance sur une surface de discontinuité relativement plane (Figure IV-7), qui peut correspondre soit à la surface de stratification, soit à une ancienne surface de rupture (faille), ou même à une couche géologique tendre appelée communément couche savonneuse.

1.2.2.2. Glissement circulaire ou rotationnel

Par opposition au glissement plan, la surface de glissement adopte une forme approximativement circulaire (Figure IV-7). Le mouvement est caractérisé en général par l'existence d'une zone de départ nette et par un bourrelet frontal plus ou moins marqué. Le remaniement externe dépend de la nature des terrains et de l'importance du déplacement.

Etant donné les nombreux oueds qui sillonnent le secteur d'étude, il est fréquent de rencontrer des glissements initiés par la dynamique érosive des oueds (sapement latéral) comme montré dans la figure IV-3.

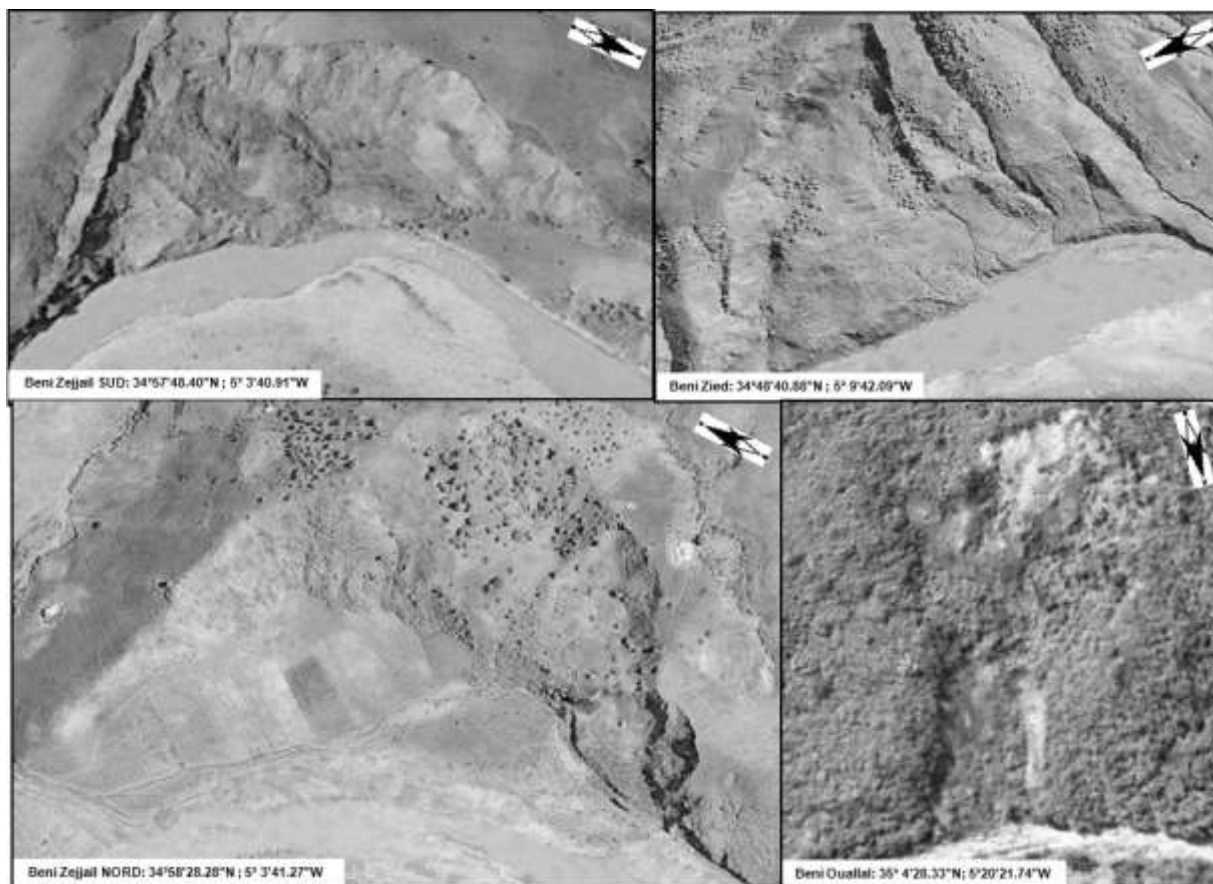


Figure IV-4 : exemples de glissements par sapement de rivière repérés sur l'imagerie satellitaire THR Spot5.

1.2.3. Les écoulement, ou coulées de masses

Ce genre de processus se manifeste par un mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, de tailles très variables, à forte teneur en eau, et de consistance plus ou moins visqueuse (Radbruch-Hall et al., 1976 ; Varnes, 1978 ; Selby, 1993 ; Corominas et al., 1996 ; ...etc). Ces coulées sont très souvent la conséquence de la déforestation, là où couche superficielle du sol, soumise à de fortes précipitations, se décroche et glisse en masse ou en tapis sur un plan lubrifié le long de la pente. Dans le cas le plus courant les coulées de masses résultent de l'évolution de grands glissements et prennent naissance dans leur partie amont (Selby, 1993).

Selon la nature des matériaux mobilisés, la teneur en eau, et la vitesse de déplacement, on peut noter plusieurs types d'écoulements (Figure IV-7), mais de façon à simplifier, nous définissons les trois types les plus souvent rencontrés dans la nature, à savoir :

1.2.3.1. Coulée boueuse ou coulée de débris

Initiées par une venue inhabituelle d'eau, et ce par plusieurs façons. Il peut s'agir de précipitations intenses, une fonte de la neige très rapide, ou plus rarement de fonte de glaciers

ou le débordement de lacs (Innes, 1983 ; Hutchinson, 1988 ; Selby, 1993). Les coulées boueuses (debris flow), sont le plus souvent formées par un matériel argilo-sableux ou limono-sableux.

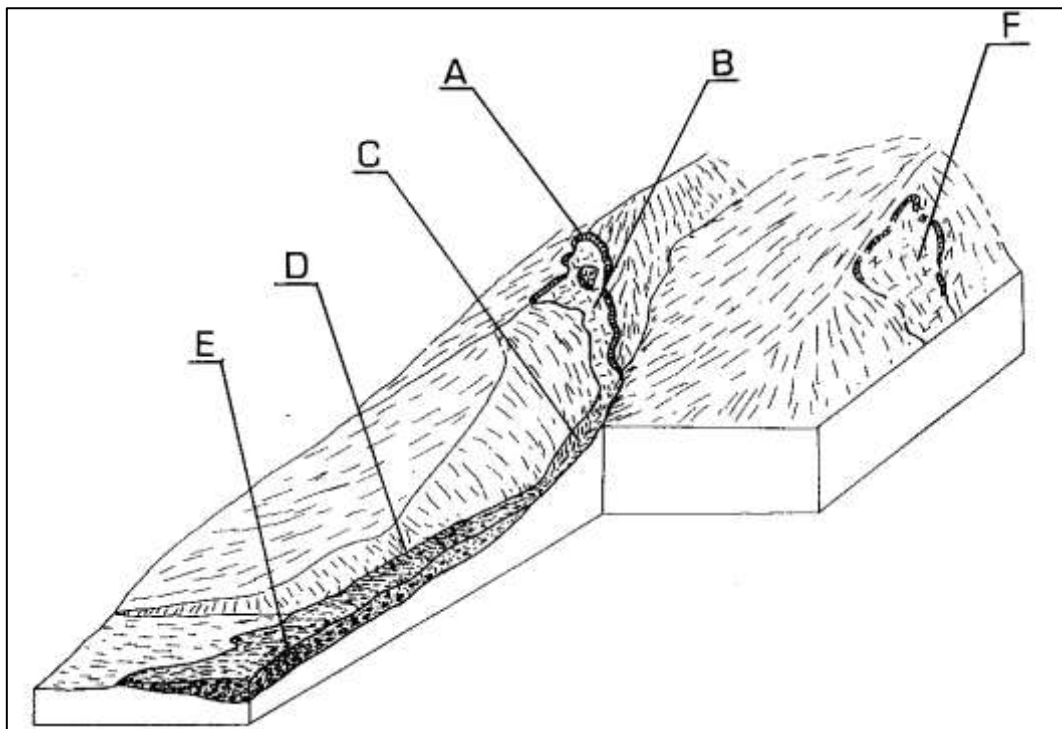


Figure IV-5 : Morphologie d'une coulée boueuse. A : Escarpement ; B et F : Zones de ruptures ; C : Chenal d'érosion ; D : Digue ; E : Zone d'accumulation. D'après Corominas et al., 1996 ; adaptée.

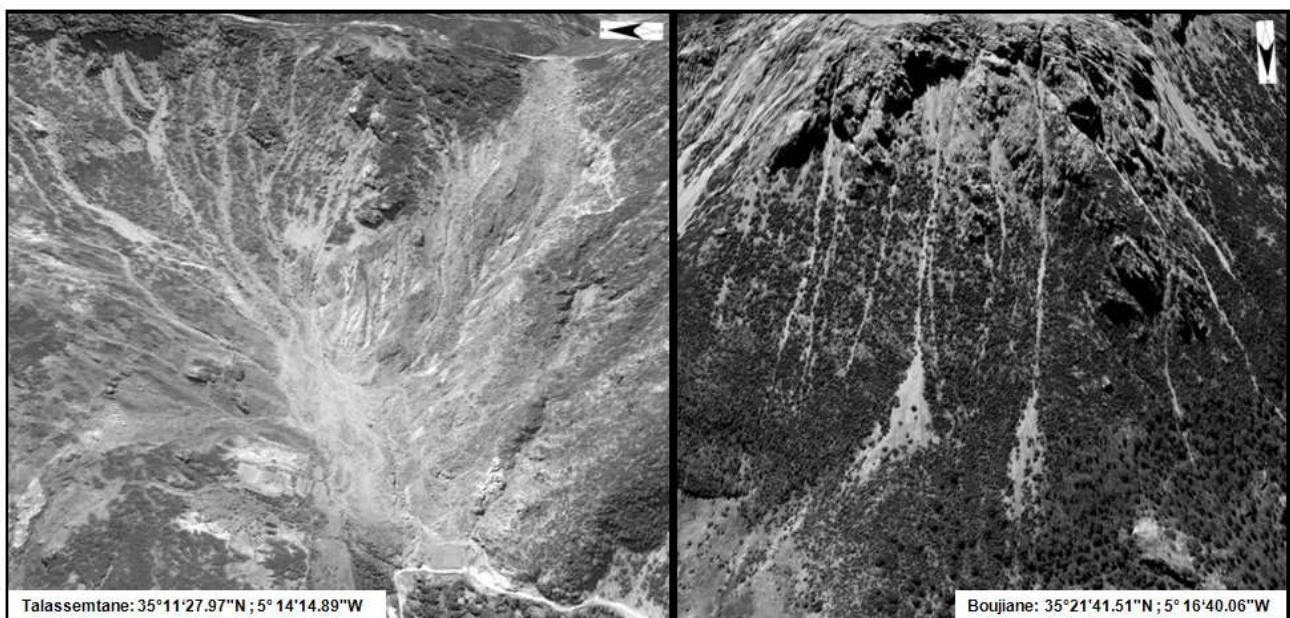


Figure IV-6 : exemples de coulées boueuses repérées sur l'imagerie satellitaire THR Spot5.

Ce sont des mouvements très rapides, et très soudains qui se déclenchent en masses de grande ampleur à condition qu'il y existe une masse de matériaux meubles mobilisables dans la zone de concentration des eaux (Selby, 1993). Morphologiquement les coulées boueuses sont caractérisées par des escarpements au niveau des zones de départ des matériaux, et une

zone de dépôt ou d'accumulation dans la partie aval (Figure IV-4). Dans le secteur d'étude (Figure IV-6), les coulées boueuses se localisent d'avantage au niveau des massifs calcaires et leurs alentours. Elles sont plus répandues dans la région de Bab Taza, Chefchaouen et Bab Barred (UG, et deviennent peu fréquentes voire absente comme c'est le cas pour le secteur de Zoumi.








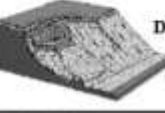











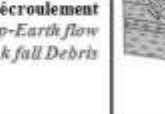
TYPES DE MOUVEMENTS		TYPE DE MATERIAU		
		ROCK BEDROCK	DEPOTS MEUBLES - ENGINEERING SOILS	
			GROSSIERS - COARSE	FINS - FINE
EBOULEMENTS - FALLS		 Chute de bloc Rock fall	 Eboulis de débris Debris fall	 Eboulis de sol Earth fall
FAUCHAGE - TOPPLES		 Fauchage de bloc Rock topple	 Fauchage de débris Debris topple	 Cracks Fauchage de sol Earth topple
GLISSEMENTS SLIDES	Rotationnel	 Décrochement de bloc Rock slump	 Décrochement de débris Debris slump	 Décrochement de sol Earth slump
	Translationnel	 Glissement de bloc Rock slide	 Glissement de débris Debris slide	 Glissement de sol Earth slide
TASSEMENTS LATERAL SPREADS		 Tassement de blocs Rock spread	 Tassement de débris Debris spread	 Tassement de sol Earth spread
ECOULEMENTS FLOWS		 Ecoulement de blocs (Ecoulement profond) Rock flow (Deep creep)	 Ecoulement de débris Debris flow	 Ecoulement de sol Earth flow
COMPLEXES		 Glissement-Ecoulement de sol avec écroulement Slump-Earth flow with Rock fall Debris		 Glissement composite Partie rotationnel et une partie translationnel Composite landslide Rotational/ Translational part

Figure IV-7 : Tableau récapitulative des différents types de mouvements de terrain, British Geological Survey (<http://www.bgs.c.uk>), modifiée.

1.2.3.2. La reptation

Correspond à un déplacement lent sur le versant d'une mince couche de débris de roches et de sa couverture (quelques cm à quelques m). Elle ne provoque pas de grands désordres dans le profil topographique; c'est un phénomène lent et saisonnier qui se manifeste d'une manière assez lente, sur des versants saturés en eau et qui ne présentent pas une surface de rupture décelable. Les mécanismes en jeu sont la reptation thermo-hydrrique et la reptation induite par gel-dégel. Elle n'est généralement pas repérable sur les images satellitaires même à haute résolution.

1.2.3.3. Le fluage

Il s'agit ici d'un phénomène de déformation d'un terrain plastique en grand, qui subit des contraintes de façon continue (pente ou tectonique). Ce type de déformation se traduit sur le terrain par des bombements du matériel sous contrainte. Le bombement se produit dans la zone où la contrainte s'exerce le moins, le plus souvent en bas de versant (*valley bulging*) (Fares, 1994 ; Margaa, 1994). C'est un phénomène qui n'est pas souvent détectable sur les images satellitaires même à haute résolution, surtout dans un contexte à lithologies contrastées comme le Rif.

1.2.4. Les mouvements complexes, ou mixtes

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 (Figure IV-7). 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 comme c'est aussi le cas pour les versants du Jbel Akroud qui sera détaillé plus loin dans ce même chapitre.

2. Inventaire des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen

2.1. Données de base et cadre théorique de l'inventaire cartographique des MT

Toute étude de cartographie et d'évaluation du risque et/ou de l'aléa mouvements de terrain pour un secteur donné, doit inévitablement être précédée par la collecte d'un maximum d'information sur la position des mouvements de terrain hérités et actuels, ce qui revient à leur cartographie. L'inventaire de ces derniers représente la forme la plus simple de leur cartographie (Hansen, 1984) permettant d'enregistrer leurs emplacements qui constitue l'élément de base pour toute modélisation ou prédiction de l'aléa, et définir leurs types dans la mesure où des traces perceptibles existent toujours (Varnes, 1984). Pour effectuer un inventaire de mouvements de terrain plusieurs techniques peuvent se présenter, et dépendent de la tailles des phénomènes, l'étendue de la zone d'étude, les échelles des cartes de base, des images satellitaires et des photoaériennes, la qualité et la précision des informations accessibles, et les ressources disponibles pour mener à bien un tel travail (Guzzetti et al., 2000).

Etant donné, l'étendue de la zone d'étude (5086 Km²), et la fréquence des mouvements de terrain, l'inventaire et la caractérisation de ces derniers sont basés presque essentiellement sur l'interprétation visuelle des images satellitaires haute et très haute résolution, complétée par des traitements numériques sous SIG. Cette approche était motivée par le fait que, la majorité des traces laissés par un mouvement de terrain sont d'ordre morphologique et peuvent résulter de changements de forme, de position ou d'apparence de la surface topographique, permettant ainsi leurs cartographie et leur classification à partir de l'interprétation et l'analyse des données spatiales (Varnes, 1978; Hansen, 1984 ; Hutchinson, 1988). Nous avons eu la chance d'avoir accès enfin 2010 à une couverture d'image relativement récente (2003 – 2010) et à très haute résolution (Spot5). Cela était conditionné par des observations et la vérification de certains cas de glissements observés sur

le terrain. Ensuite, nous avons généralisé dans la mesure du possible les critères sur au reste des phénomènes. Puisque d'une part, la signature morphologique d'un mouvement de terrain dépend de la dynamique de la masse glissée et du volume déplacé et que, d'autre part, un même type de mouvement implique une réponse morphologique analogue (Varnes, 1978; Hansen, 1984; Hutchinson, 1988 ; Cruden et Varnes, 1996), le cartographe peut se baser sur la forme topographique pour en déduire des informations qualitatives sur – le degré d'activité, - l'âge, et - la profondeur de rupture du versant.

2.2. Techniques et données utilisées

2.2.1. Etude bibliographique

Une étude bibliographique a constitué la première étape pour l'inventaire et l'analyse des mouvements de terrain dans notre secteur d'étude, mais les références sont rares. Celles-ci se limitent essentiellement aux conclusions de Maurer, 1968, qui ont porté sur l'évolution géomorphologique (Figure IV-8B) des versants du Rif central comme nous l'avons précisé dans le premier chapitre de ce mémoire. Cependant, le travail de Maurer à lui seul ne permet pas d'identifier réellement les facteurs générant des mouvements de terrain dans le Rif. Par ailleurs, d'autres travaux dans des secteurs voisins au sein de la chaîne rifaine ont été consultés (Azzouz et al., 2002 ; Fares, 1994 ; Margaa, 1994 ; El Khatabi et Carlier., 2004 ; El Khatabi, 2001 ; El Kharim, 2002 ; Mansour, 1998 ; Mansour et Ait Brahim, 2005 ; Sossey Alaoui, 2005...).

2.2.2. Les documents cartographiques existants et leur validité

Les cartes topographiques à l'échelle de 1/100 000^{ème} et 1/50 000^{ème} couvrant le secteur d'étude ont été consultées simultanément. 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. 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 gréseux ou calcaires. Elles sont souvent dues à des arrachements marqués sur des escarpements importants. Ces corniches sont également affectées par les éboulements et les écroulements (voir Figure IV-8A). **La carte géomorphologique** du Rif central établie par Maurer, 1968 a été également consultée puisqu'elle couvre presque la totalité du secteur étudié et illustre une activité morphologique très intense. On peut y distinguer différents phénomènes, ainsi que des signes morphologiques (niches d'arrachement) sans attribution de fonctionnement actuel ou fossile. Cette carte présente une grande densité d'indices liés à une dynamique plutôt superficielle ; elle n'a cependant pas servi de base pour l'inventaire des MT de notre secteur. Néanmoins, elle a servi de base pour la vérification de la qualité d'inventaire des MT que nous avons effectué, ainsi que pour l'analyse de la persistance spatiale de ceux-ci (voir plus loin dans ce même chapitre). Aux données géomorphologiques se rajoutent **les cartes géologiques** existantes à l'échelle de 1/500 000^{ème} et 1/50 000^{ème}, où on relève un certain nombre d'informations, notamment sur la lithologie et la structure des formations. En particulier, des formations superficielles de type 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 plus part des cas, ils coïncident avec une activité hydrologique importante.

2.2.3. Les images satellitaires

Les données de **l'imagerie spatiale** et aéroportée ont été consultées tout au long de ce travail. Elles ont constitué le support principal pour la cartographie et l'inventaire des mouvements de versants de la province de Chefchaouen.

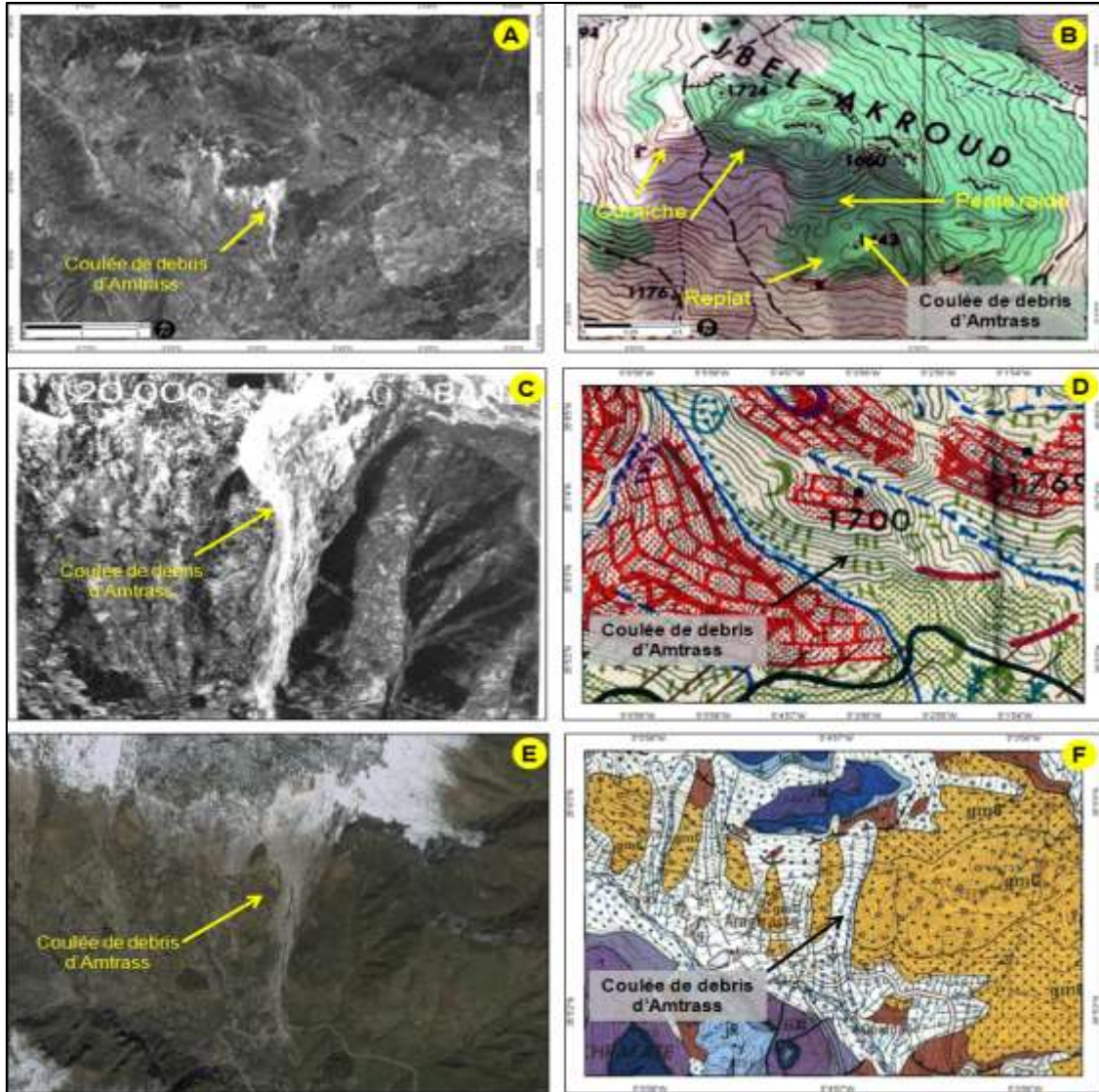


Figure IV-8 : Données utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain avec le positionnement du même exemple "le debris flow" d'Amtrass sur ; A : Extrait de l'image Landsat 7 ETM+ (<http://glcf.umiacs.umd.edu>) ; B : Extrait de la carte topographique IGN ; C : Extrait de la Photoaérienne d'une partie du secteur d'étude D : Extrait de la carte géomorphologique d'après Maurer, 1968 ; E : Extrait d'image satellite THR Spot5 (Google Earth Pro) ; F : Extrait de la carte géologique d'une partie du secteur d'étude d'après Wildi, 1976.

Elles ont révélé la grande partie des sites instables, comme elles en ont confirmé d'autres. Trois types d'images satellitaires ont été utilisées ; la première Landsat7 ETM+ acquise le 06 Juin 2001 et téléchargeable en libre droit sur le site de l'université de Maryland <http://glcf.umiacs.umd.edu>, la deuxième Spot5 acquise le 22 Aout 2007 (Figure V-3), et le troisième type qui est le plus important présenté par les images du satellite Spot5 (2003 – 2010) avec une résolution spatiale de 2.5m et provenant de la base de données du programme Google Earth Professionnel.

2.3. Méthodologie cartographique pour l'inventaire des MT de la province de Chefchaouen

La cartographie de synthèse (Figure IV-9A et B) que nous avons réalisée présente cinq grandes familles de mouvements, à savoir : -1° les glissements, aussi bien des glissements rotationnels que translationnels, sans oublier une troisième catégorie formée par les glissements – sapements ; -2° les écroulements ; -3° les coulées boueuses ; -4° les sapements : - ceux de berges générés par l'action mécanique des oueds, alias sapements de berge, - ceux générés par l'intervention humaine telle que la construction des routes, alias sapements de route ; et -5° les badlands qui correspondent à des phénomènes de ravinement et de dégradation des sols, dont les plus intenses et les plus actifs ont été pris en considération, puisqu'ils peuvent constituer un risque aussi important que les mouvements de masses tels que les glissements superficiels.

Ces différentes familles de mouvements ont été représentées en deux temps, avec une carte (Figure IV-9A) présentant le groupe des glissements, les glissements – sapements, les écroulements, et les coulées de débris. Le second groupe, correspond aux phénomènes liés essentiellement au mode de ravinement intense et à l'action mécaniques des cours d'eau, sans oublier celle de l'homme. Le deuxième groupe (Figure IV-9B) est représenté par, les badlands, les sapements de berges, et les sapements de routes. Cependant, un souci de lisibilité de la carte des mouvements de terrain, la totalité des phénomènes a été représentée par des points ronds de différentes couleurs, étant donné l'étendue du secteur d'étude (échelle du travail) et le nombre important des mouvements de terrain.

2.4. Les limites de la méthode : facteurs affectant la qualité d'inventaire

Les cartes d'inventaire des MT connaissent plusieurs limitations, résidant essentiellement dans leur subjectivité intrinsèque et, dans la difficulté pour évaluer leur exhaustivité (Van Westen, 1993 ; Van Westen et al., 2006 ; Guzzetti et al., 2000 ; Malamud et al., 2004). Une carte est déjà en soi un document interprétatif. Il est donc, primordial de se poser toujours la question de sa qualité, sa fiabilité et de sa résolution, avant la réalisation et lors de la consultation d'une carte d'inventaire de MT, leur nature interprétative pouvant largement impacter la carte finale d'aléa et/ou du risque mouvements de terrain. Cependant, il est admis que les cartes d'inventaire de mouvements de terrain établies à partir des images haute et très haute résolution (satellites et aériennes), en couplage avec des observations de terrain même limitées, relèvent d'une qualité relativement fiable (Guzzetti, 2005 ; Soeters et Van Westen., 1996) lorsqu'elles sont réalisées à la fois par photo-interprétation, mais également complétée avec l'assistance de traitements SIG. Toutefois, cette qualité est tributaire de plusieurs paramètres tels que -l'âge ou la fraîcheur du MT, - la persistance de sa signature morphologique en relation avec le contexte morphobioclimatique régional, - le type et la résolution des images satellites et des photoaériennes ainsi que les cartes de base utilisées pour l'inventaire, - le cadre morpho-géologique du secteur d'étude ; et l'occupation des sols. **Mais le paramètre le plus important, est le degré de l'expérience de l'analyste menant l'inventaire** (Castellanos et Van Westen, 2008 ; Castellanos, 2008 ; Thiery, 2007 ; Guzzetti, 2005 ; Ardizzone et al., 2002 ; Maquaire, 2002 ; Carrara et al., 1992 ; Hansen, 1984...etc). En outre, un MT, une fois reconnu sur photoaérienne ou sur le terrain, doit être dessiné sur la carte d'inventaire, sous une forme qui va traduire ses caractéristiques (échelle, taille...) et sa position à une époque donnée. Ce passage, purement interprétatif, est le plus souvent accompagné par une quantité d'erreurs, d'autant plus que le géomorphologue se base sur des cartes topographiques (IGN) suffisamment anciennes (50 ans dans notre cas).

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

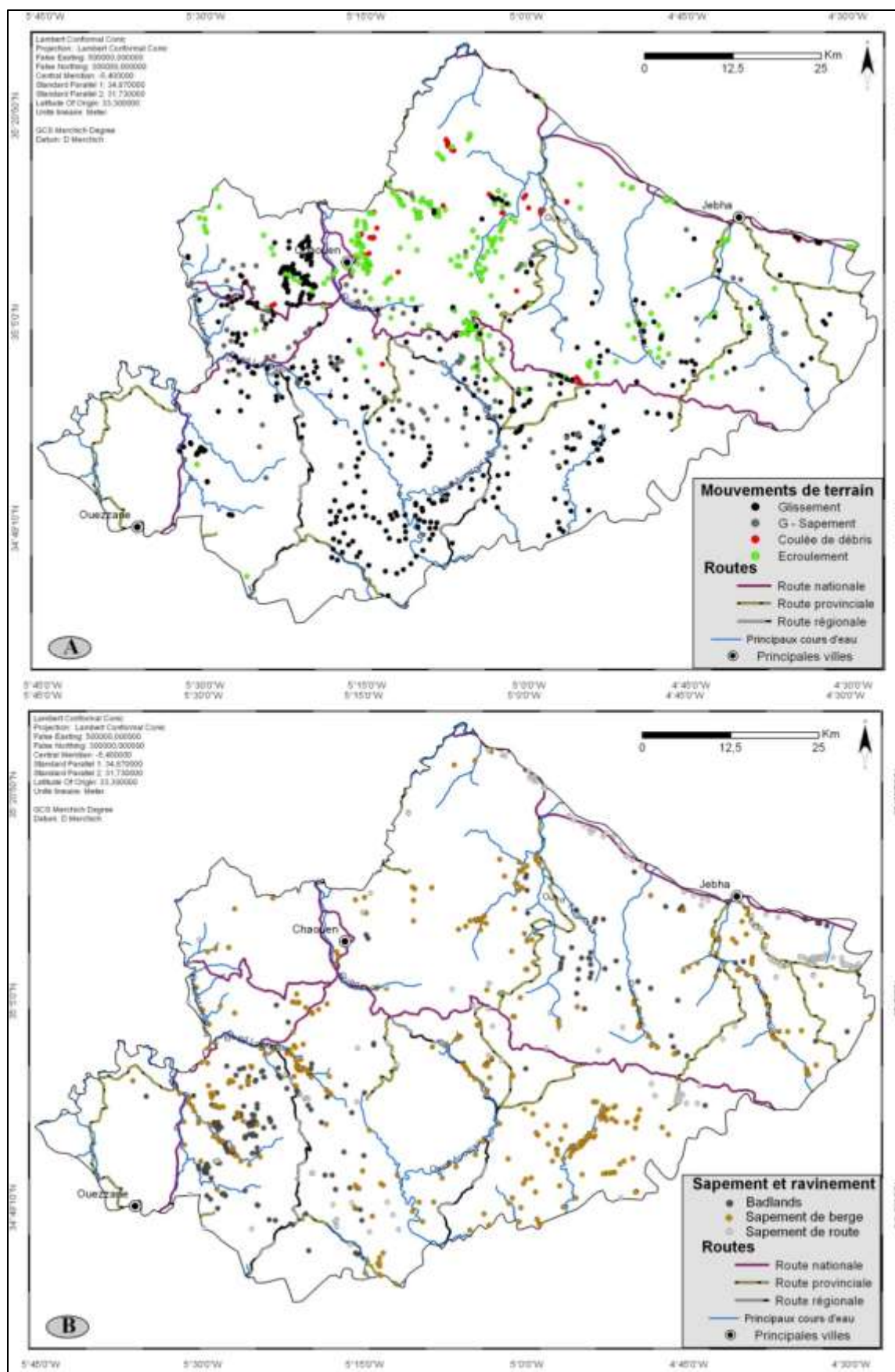


Figure IV-9 : Cartes d'inventaire des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen par PIAO des images THR (Spot5) de la base de données Google Earth Pro ; A : mouvements purs ; B : sapements et ravinement.

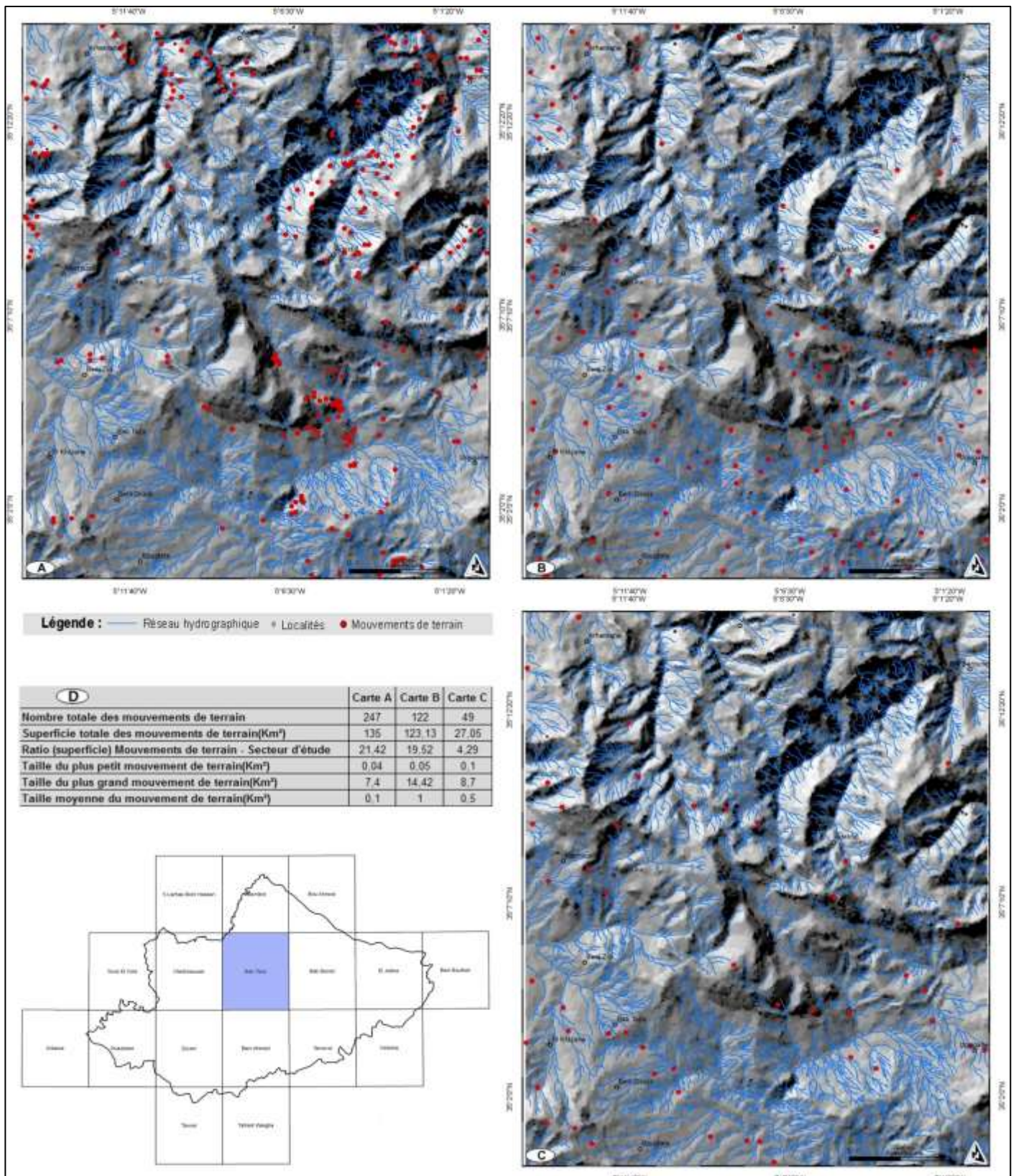


Figure IV-10 : Comparaison de trois cartes d'inventaire de mouvements de terrain pour une partie de notre secteur d'étude (Bab Taza, voir localisation en bas à droite) ; A : inventaire basé sur des images satellite haute résolution ; B : inventaire basé sur la cartographie géologique et géomorphologique de Wildi et al., 1976 à l'échelle de 1/ 50 000ème ; C : Inventaire basé sur la cartographie géomorphologique à l'échelle de 1/ 300 000ème de Maurer, 1968 ;et D : principales caractéristiques des trois cartes d'inventaire de mouvements de terrain pour la zone de Bab Taza.

Ces cartes anciennes contiennent déjà des erreurs concernant les valeurs absolues des coordonnées géographiques ce qui pose des problèmes pour reporter les MT inventoriés. En revanche si l'on dispose de cartes topographiques relativement récentes (positionnement GPS) et traduisant la morphologie actuelle avec une exactitude raisonnable, l'incertitude liée à l'inventaire des MT et leur positionnement sera minimisé.

2.5. Qualité de la carte d'inventaire des MT

D'après Carrara et al., 1992 ; Guezzeti et al., 1994 ; Guezzeti, 2005 ; Galli et al., 2008 ; Blahut et al., 2010 , il est clair qu'il n'existe aucune méthode standard permettant d'évaluer la qualité d'une carte d'inventaire de MT. Toutefois, il est possible de procéder en une telle analyse par comparaison (Figure IV-D) de la carte d'inventaire obtenue (Figure IV-10A) avec les autres cartes disponibles pour une même zone donnée (Figure IV-10B et C). Pour ce faire, nous avons effectué une comparaison entre trois types d'inventaire de MT région de Bab Taza. Il en ressort, que le nombre de MT recensés s'accroît avec la grandeur de l'échelle du travail. Par exemple, dans la cartographie géomorphologique de Maurer, 1968 à l'échelle de 1/ 300 000ème, seuls 49 mouvements ont été inventoriés. Ces derniers deviennent 122 par la cartographie géologique et géomorphologique effectuée par Wildi et al., 1976 à une échelle de 1/ 50 000ème, et 247 mouvements à partir des données satellitaires haute résolution (1/ 10 000ème). Le détail par rapport aux autres caractéristiques des trois cartes d'inventaire est reporté dans la figure IV-10D. Mis à part l'échelle et la résolution des données de bases utilisées pour l'inventaire des MT, d'autres facteurs peuvent influencer la qualité d'une telle procédure. C'est le cas de la finalité de l'étude (reconnaissance globale, géomorphologique, évolution spatio-temporelle...etc) ; des moyens disponibles (financiers et humains), du temps consacré, et l'expérience mise en œuvre.

3. Etude de cas

Le rebord SW de l'accident de Jebha – Chrafate est caractérisé par la présence de trois versants qui sont du NE au SW, le versant d'Amtrass d'exposition généralement SW qui domine le flanc SW de la Dorsale calcaire ; le versant de Chrafate qui est orienté NE et en contact avec l'unité d'Amtrass à l'aide d'un franc de chevauchement à vergence SW ; et le versant de Bou Halla qui constitue le pont de jonction entre les formations calcaires du domaine interne et l'unité de Kétama – Tanger externe représentant le domaine des nappes de flyschs.

3.1. Le debris flow du Jbel Amtrass

3.1.1. Introduction et description de l'état actuel

Parmi tous les types de mouvements de terrain répertoriés, classifiés et définis avec précision dans le nord du Maroc (Fares, 1994 ; Margaa, 1994 ; Mansour, 1998 ; El Khatabi, 2001 ; Azzouz et al., 2002 ; El Kharim, 2002 ; El Khatabi et Carlier., 2004 ; Mansour et al., 2004 ; Mansour et Ait Brahim, 2005 ; Sossey Alaoui, 2005 ; Mastere, 2008 ; Mastere et al., 2009) la coulée de débris (debris flow) du Jbel Amtrass constitue un cas particulier et complexe. Cette coulée de débris, est située au Nord – Ouest du Maroc (Rif central), plus précisément au niveau du village d'Amtrass (Figure IV-11). Ce mouvement remonte au moins jusqu'à la fin du 19ème siècle et à chaque reprise cause du préjudice au village.

Ce mouvement de versant, est facilement reconnaissable sur les données spatiales qu'elles soient satellitaires (haute et faible résolution) ou aéroportées. Il est présent aussi sur les cartes géologiques et géomorphologiques de la région Rifaine (Figure IV-8). Comparé à celui de Chrafate qui lui fait face au Sud, il s'agit ici d'un versant relativement assez long (environ 1800m) et large (Figure IV- 12) caractérisée par une pente moyenne de l'ordre de 40° qui passe à une valeur de 75° au niveau des terrains calcaires sommitaux et à partir desquelles prennent naissance d'importants détachements de blocs. Ces derniers constituent de grands éboulements, juste au pied des formations calcaire qui correspond à un petit replat calqué sur le passage du couloir de la faille de transfert de Jebha – Chrafate dans le sens d'El Hatimi, 1982 et Olivier, 1981-1982 (Figure IV-14).

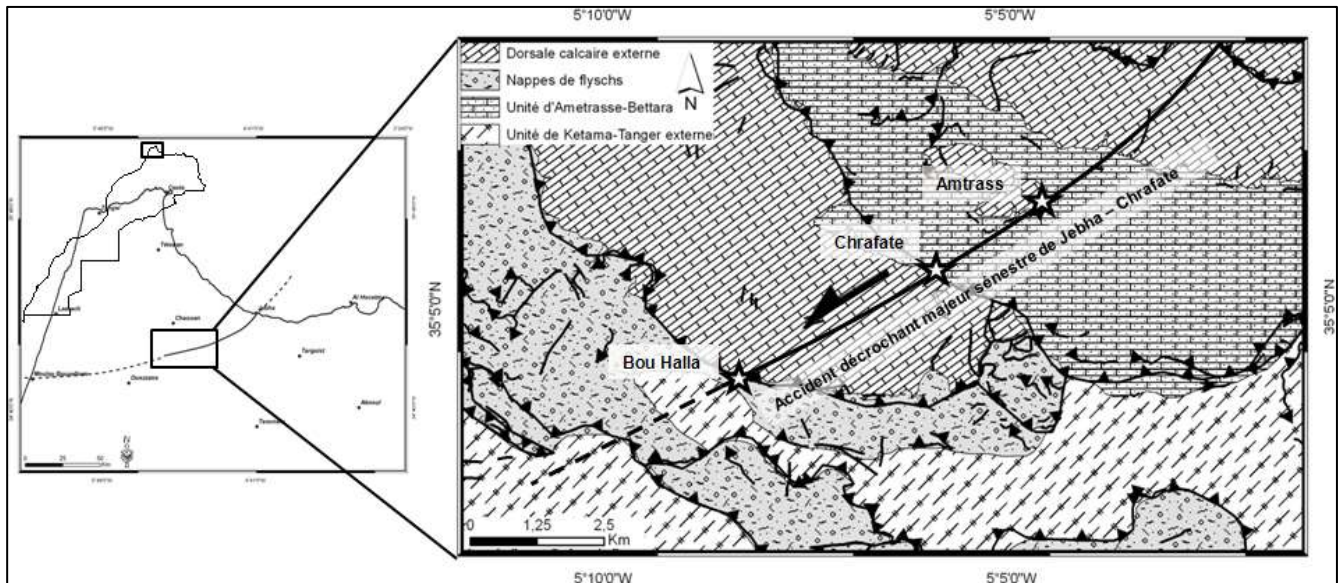


Figure IV-11 : Contexte géologique des localités d'Amtrass et Bou Halla. Les trois étoiles représentent les situations respectives de la coulée de débris d'Amtrass, les écroulements du massif de Chrafate, et le glissement de Bou Halla.

La série stratigraphique de ce versant est constituée du bas en haut par les marnes de base d'âge Eocène terminal – Oligocène basal, suivies d'une épaisse série de grès à intercalations gréso-conglomératiques datées de l'Oligocène supérieur – Miocène inférieur, ensuite la série est bouclée par la succession de dolomies, calcaires à silex et des calcaires massifs blancs, l'ensemble date du Lias inférieur à moyen. Le fait que le sommet de la série est occupé par des formations plus anciennes (Lias) que celles de la base (Eo – Oligo – Miocène) s'explique par l'existence du front de chevauchement, ici subhorizontal, mettant en contact les Dorsale calcaire externe avec les terrains des nappes de flyschs. Il s'agit en apparence d'une coulée de débris surdimensionnée.

Cette coulée débute à l'altitude de 1720m; son matériel est composé essentiellement de blocs calcaires et de dolomies alors que le versant est composé de grès, marnes et conglomérats. Ce mélange contraste par sa blancheur avec le reste du paysage et avec les blocs anciennement écroulés. Il est apparemment canalisé à l'état boueux par un ancien ravin délimité par de petits escarpement et dans lequel coulait l'eau d'une source, ce qui a permis à la coulée de débris de s'étendre sur tout le versant jusqu'à arriver au niveau de l'oued Amtrass (Figure IV-14) à l'altitude 760m où il est possible d'évacuer l'eau en excès pour que processus de la coulée s'arrête (Figure IV-13 et 14).

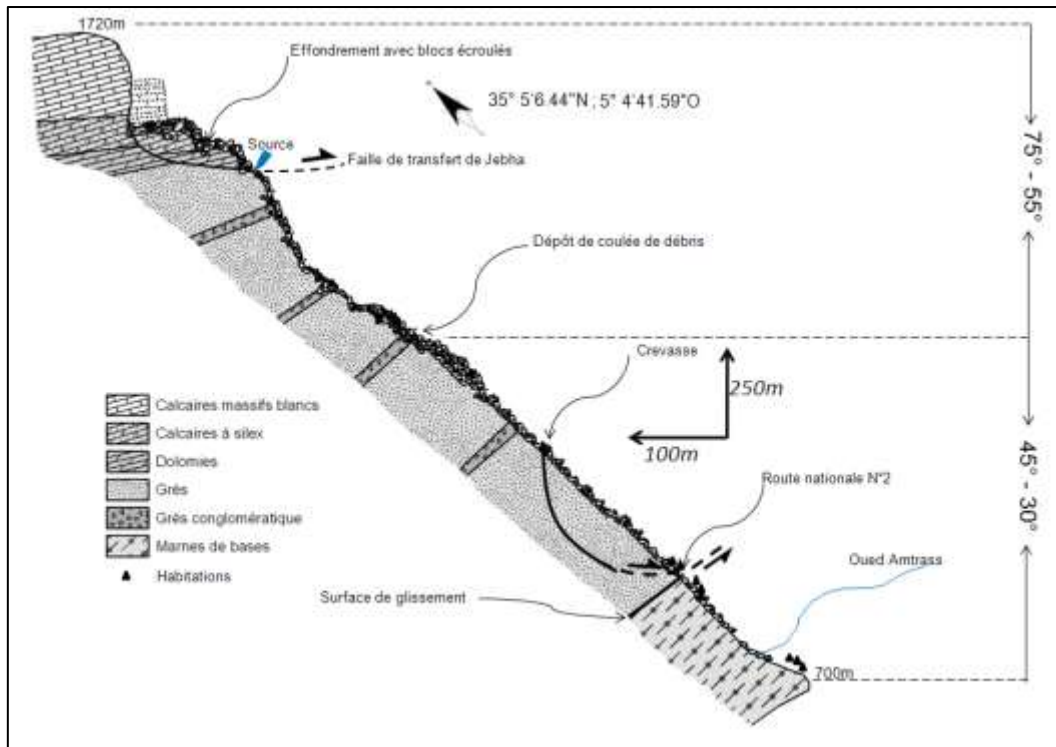


Figure IV-12 : coupe schématique de la coulée de débris d'Amtrass, *Chaouki, 1991* ; modifiée.



Figure IV-13 : La coulée de pierre d'Amtrass dans son contexte géologicomorphologique (vue d'ensemble, Photo prise à l'entrée du village d'Amtrasse). ESA : écaille sommitale de la nappe d'Akroud, CA : contact anormal entre, FCS : formations des calcaires sommitaux, et SGC : séries grés-conglomératiques, EP : escarpement principal, S : source, RGC : ravinement dans les formations grés-conglomératiques, Rlr : replat intermédiaire, VA : village d'Amtrasse, RI : replat inférieur, OA : oued Amtrasse, FC : front de la coulée, R : route, *Master et al., 2009*.

Si l'on raisonne à l'échelle de la partie amont du versant et si l'on tente de classifier ce mouvement de versant il s'agirait d'un écoulement ou un éboulement en masse, puisque la taille des blocs dépasse largement les deux millions de m³ ; mais si l'on raisonne à l'échelle de tout le versant du Jbel Akroud, il conviendrait de qualifier ce mouvement de versant de coulée de débris plutôt que d'éboulement en masse, puisqu'il réunit les trois conditions de base pour la formation d'une coulée de débris à savoir (Selby, 1993) - la présence d'une pente relativement importante, - l'existence de matériaux facilement mobilisable - et finalement la présence de quantité importante d'eau qui peut provenir de plusieurs origine. En outre, plusieurs clichés (Cf. 4.1.1) pris respectivement en 1961, 1975, 1976, 1995, et 2010 montrent d'autres phénomènes de petits glissements ou de légères reptations s'associent au mouvement principal sur le même versant.

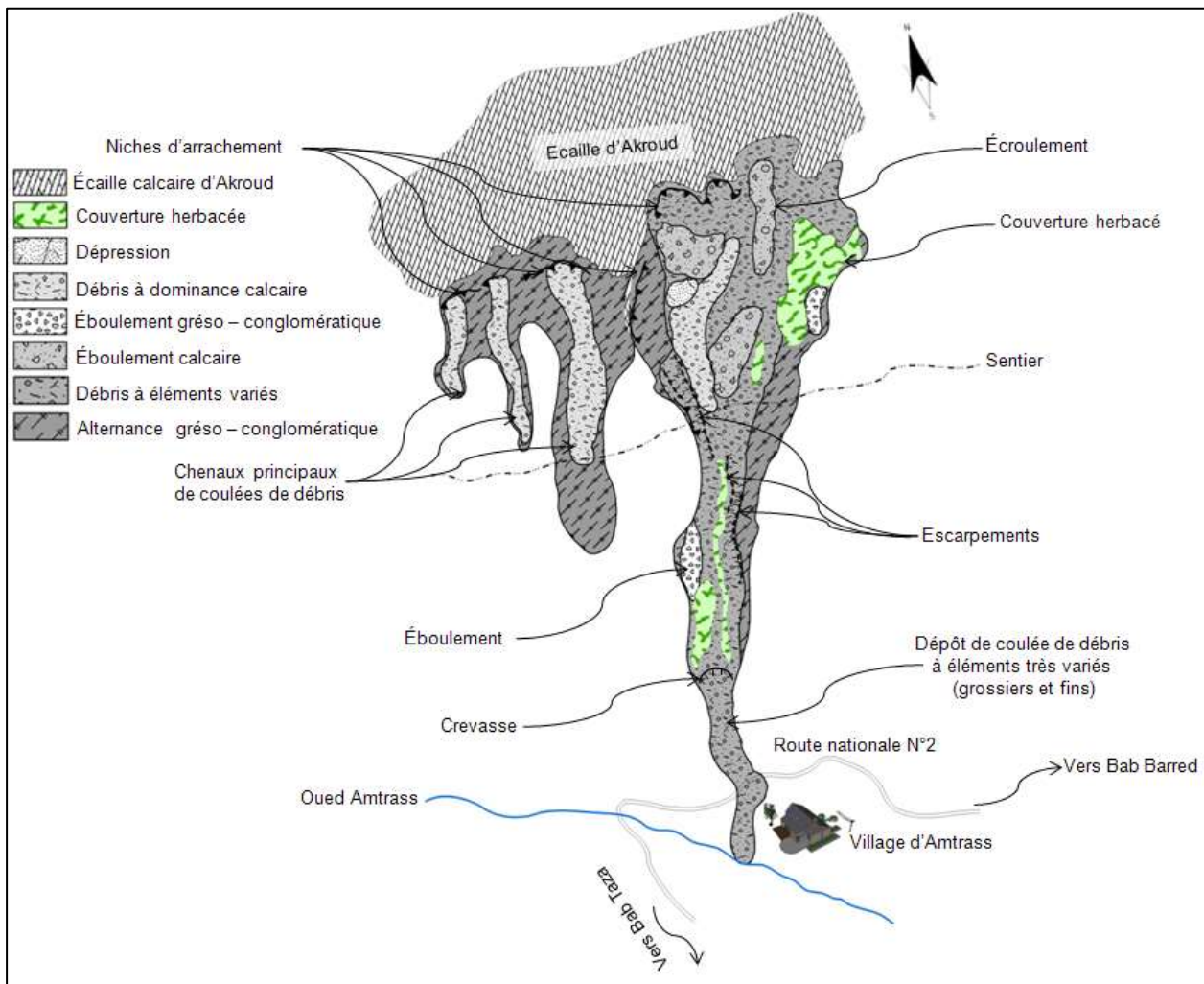


Figure IV-14 : Plan montrant l'état actuel des coulées de débris du Versant d'Amtrass établi à partir de l'image satellitaire haute résolution de Spot5 (Base de données Google earth Pro, 2011).

3.1.2. Mécanismes de contrôles : Action conjointe de la fracturation, de la source d'eau et de la gélifraction

La fracturation est l'un des paramètres intrinsèques régissant en grande partie l'évolution géomorphologique du versant du Jbel Akroud. Ce dernier, de par sa position dans le couloir de l'accident majeur de Jebha à caractère sismique actif même de faible amplitude qui ne cause pas un déclenchement direct de ce mouvement, se trouve en revanche fragilisé de

et prédisposer pour des mouvements ultérieurs. En plus de la faille de Jebha, il est important de rappeler que la Dorsale calcaire dans sa totalité est affectée par une grande densité de fracturation (Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003 ; Adraoui, 2007 ; Chalouan et al., 2008) qui laisse apparaître 2 grandes familles de directions NW-SE et NE-SW (Figure IV-15) au niveau de la région de Bab Taza (y compris la zone d'Amtrass) (Mansour et al., 2004 ; Sossey Alaoui, 2005 ; Mastere 2008, Mastere et al 2009). Ces différentes familles de fractures ne sont pas seulement favorables à la dislocation du massif et au déclenchement de mouvements de grande ampleur, mais aussi responsables d'une circulation importante des eaux souterraines qui refont surface en faveur d'une source située à la base des formations calcaires et qui est caractérisée par un débit important.

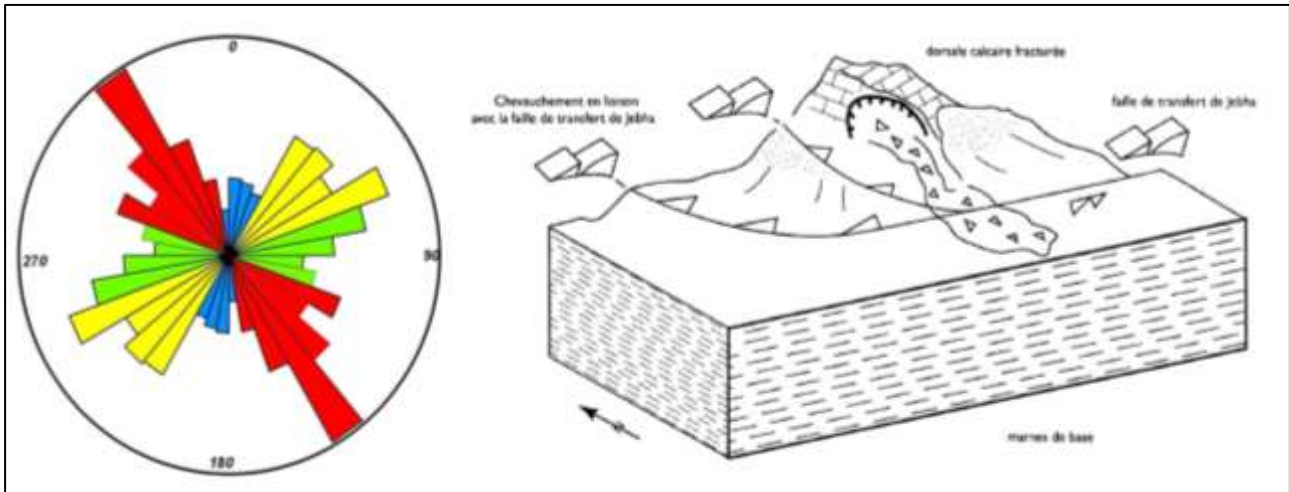


Figure IV-15 : Schéma interprétatif de la coulée de débris d'Amtrass en relation avec la faille majeure de Jebha (Mansour et al., 2004) (à droite) ; et la rosace issue de l'analyse statistique des directions des failles en longueur cumulée pour le secteur d'Amtrass – Bou Halla. (Mastere et al., 2009).

La présence de l'eau de cette source perturbe la cohésion du matériel et s'avère être responsable de la diminution de la résistance au cisaillement interne des matériaux meubles issus des éboulements et, nous le verrons plus loin, de la gélifraction, en leur conférant un comportement comparable à celui d'un écoulement cohésif, ce qui explique la grande distance parcourue par les gros blocs. Cette eau, - celle issue de la fonte de neige sur la dorsale calcaire et, - les pluies hivernales (Cf. chapitre 5, section 5) induisent lors d'un apport anormalement abondant, une augmentation de la pression interstitielle au sein du stock de débris qui se forme continuellement au pied de la dorsale calcaire. Cette situation favorise le déclenchement de sa mise en mouvement.

L'autre paramètre important à Amtrass est la gélifraction du massif calcaire. Ce mécanisme n'opère que si l'eau pénètre dans la roche et gèle à l'intérieur de celle-ci, ce qui est favorisé par la densité de fracturation sous toutes ses formes (failles, fractures, fissures, diaclases, vides interstitielle, zone de broyage...etc). Il est à savoir aussi, que la gélifraction est proportionnelle au nombre des cycles de gel/dégel (Lautridou, 1983), et affecte toutes les sortes de roches avec une susceptibilité variable. Cependant, la gélifraction peut intervenir à plusieurs échelles sur les roches en les rendant susceptibles au glissement, créant des éboulis par écaillage (Letavernier et Ozouf, 1987), ou par la formation d'une fraction fine interstitielle dans les fissures de la roche (Van Vliet-Lanoë, 1987) augmentant la susceptibilité au gel de la roche et sa capacité à fluer. Cette fraction fine produite par gélifraction (Lautridou, 1983) est indispensable pour la mise en mouvement de la coulée de débris (Van Steijn, 1988 ; Van

Steijn, 1996 ; Van Steijn, 1999 ; Decaulne, 2002), et c'est cette mobilisation qui nous intéresse puisque.

Une partie de la fraction fine du matériel semble provenir de la décarbonatation subie par les formations calcaires dolomitiques. Ce phénomène définit par Van Vliet Lanoë, 1995, aboutit à la désagrégation et la déconsolidation des roches et des parois calcaires par la disparition de la calcite (dissolution différentielle). Ce phénomène couplé à la gélifraction aboutit à une production importante de limons et des silts de dolomie mêlés aux gélifractions des éboulis. Une autre partie peut résulter tout simplement de la particularité lithostratigraphie du versant caractérisée par la présence de micro-lits marneux, déjà microfissurés et facilement délités par le gel et les alternances thermo-hydriques au niveau des formations calcaires à silex et calcaires dolomitiques. Ces derniers niveaux se trouvent rapidement dégradés, à cause de leur différence de perméabilité avec les calcaires dolomitiques sus-jacents, et vu leur qualité géotechnique très médiocre, et forment l'essentiel des matériaux fins en aval. Ces derniers, sont à l'origine de la formation de phénomènes d'éboulis au pied des formations calcaires. Cet ensemble alimenté par la source ou la fonte brutale de neige constitue une masse initiale gorgée d'eau favorable au déclenchement de coulées de débris (Figure IV-16A&B).

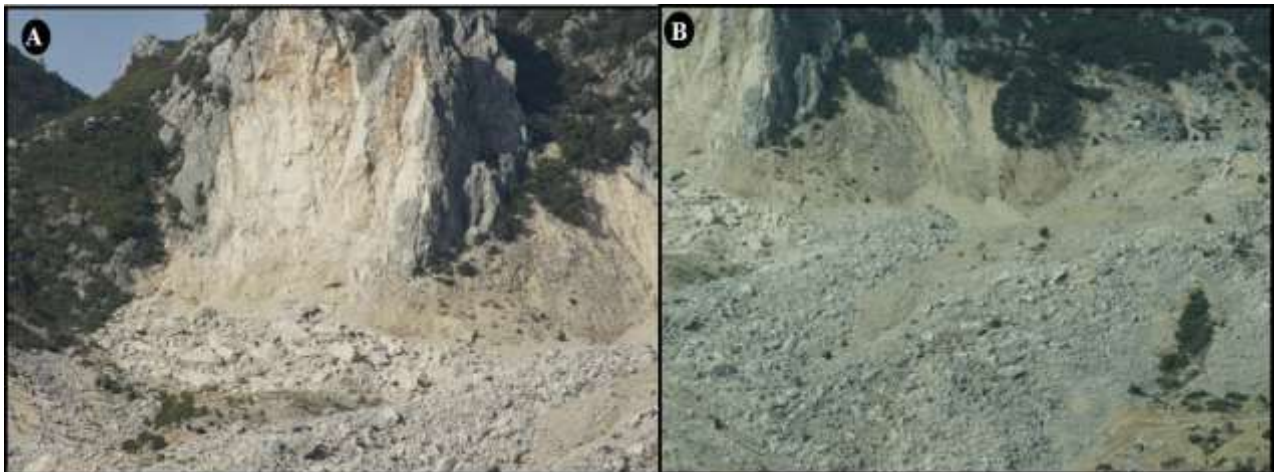


Figure IV-16 : A : Photo montrant la production du matériel ; B : Zone de fluage de l'accumulation de gélifractions et matériel fin alimentée par les éboulis, Clichés de Van Vliet-Lanoë, 2010, téléobjectif 300mm.

3.1.3. Evolution spatio – temporelle de 1965 à 1995

Une analyse spatiotemporelle générale de cette coulée de débris été menée par Mastere et al, 2009 par photogrammétrie numérique, où quatre MNTs et clichés orthorectifiés correspondants ont été effectués à la maison de la télédétection de Montpellier (France). Cette analyse, a permis d'obtenir plusieurs informations sur l'évolution géomorphologique de la coulée de pierres d'Amtrass qui sont résumées dans la figure IV-17, en permettant notamment de situer les différentes périodes de réactivation du Jbel Akroud, et par conséquent les périodes de déclenchement des écroulements sur ce versant entre 1965 et 1995 (Figure IV-17 et IV-18A&B), et qui se résument comme suite :

a) Les photographies aériennes de 1965 ont permis de repérer un secteur qui a été affecté par plusieurs écroulements successifs déjà déclenchés. Cependant les accumulations de matériaux principalement gréseux-marneux n'allait pas en deçà de la côte 750m (Figure

IV-17 et IV-19A), alors que les blocs calcaires et dolomitiques à l'amont de la route, étaient largement représentés (Figure IV-18B et IV-19C).

b) Sur les photos aériennes de 1978 une nouvelle reprise du mouvement et ainsi représentée, et qui serait déclenchée en hiver de 1970 comme l'avait confirmé les habitants du village. Le lien entre le rôle des précipitations et le déclenchement de l'écroulement de cette période, n'a pas pu être établi puisque que la station météorologique de la région était hors service. Toutefois, il est possible de faire le lien entre cette réactivation du versant d'Amtrass et le séisme de magnitude 7.3 sur l'échelle de Richter enregistrée le 28 Février 1969 à plus de 400 Km de la côte marocaine. Ce dernier a été provoqué par le déplacement de plaques au niveau de la faille des Açores – Gibraltar. Ce séisme a été ressenti dans la totalité de la péninsule de Tanger et toute la partie sud l'Ibérie. Il a été aussi l'élément générateur d'un tsunami de faible amplitude qui a atteint les côtes de Casablanca

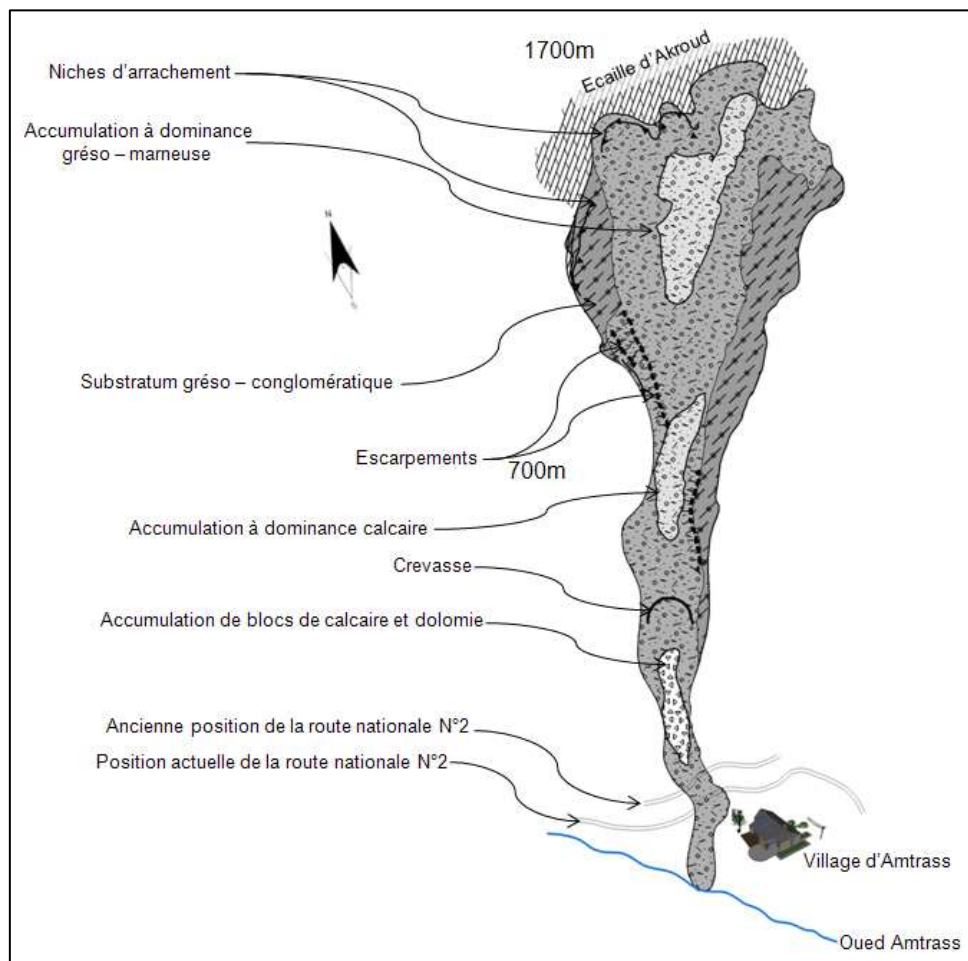


Figure IV-17 : Schéma montrant l'évolution du versant d'Amtrass entre 1965 et 1995, reprise de [Mastere et al., 2009](#).

c) Les écroulements successifs de paquets de calcaires dolomitiques et des séries marneux-gréseuses se sont produits à l'intérieur d'un *khandek* (ravine) (Figure IV-19C) que l'on peut toujours voir. Ces paquets se sont disloqués à cause de la faible cohésion de ses matériaux. Ces paquets disloqués ont ensuite flué en pente assez élevée et recouvert une grande partie des matériaux marneux-gréseux anciennement déstabilisés. Suite à ce ci, une crevasse est apparue au pied du Jbel (Figure IV-17) au contact avec une discontinuité (faille).

- d) En comparant les MNTs et les orthophotos de 1978 et 1988, une stabilité apparente du versant est retenue.

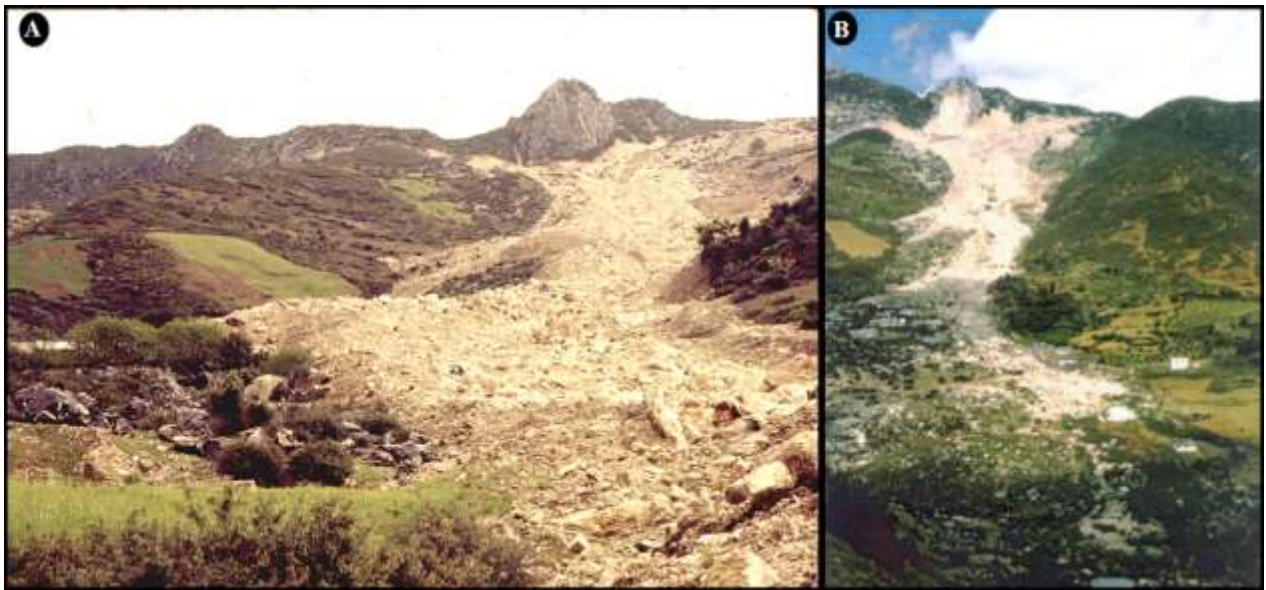


Figure IV-18 : A : Vue d'ensemble du versant du Jbel Akroud montrant le comportement en coulée de débris (bourrelet latéral) ; B : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1995 ; A : Cliché de [Hoepffner, 1975](#) ; B : Clichés in [Mansour, 1998](#) et [Mansour et al, 2004](#).

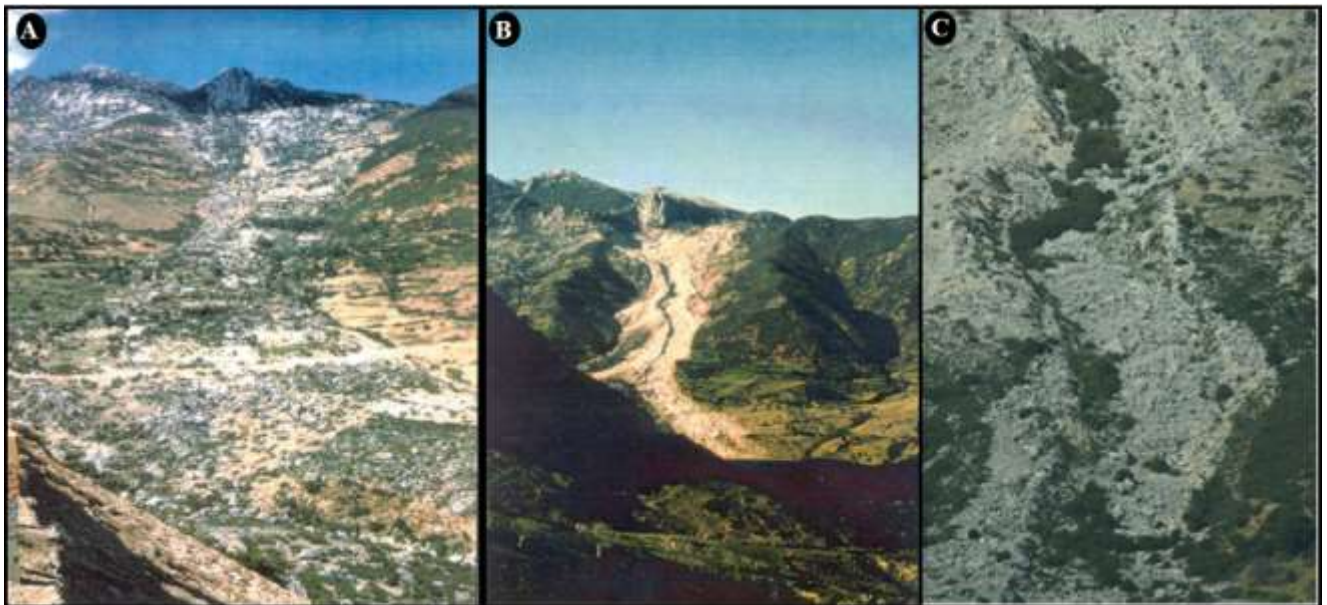


Figure IV-19 : A : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1961 ; B : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1976 ; F : Vue d'ensemble du versant du Jbel Akroud montrant le comportement en coulée de débris ; C : couloir de la coulée de débris (activité probable 1970 – 1978) et qui est actuellement végétalisé ; A et B : Clichés in [Mansour, 1998](#) et [Mansour et al, 2004](#) ; C : Cliché de [Van Vliet-Lanoë, 2010](#), téléobjectif 300mm.

- e) Les photos aériennes de 1995, montrent une nouvelle phase de réactivation du versant instable du Jbel Akroud. Cette réactivation se matérialise par le détachement d'un nombre important de pans calcaires (Figure IV-17 et IV-18B) accompagnés d'un semi-glissement rotationnel affectant les séries marneux-gréseuses de basse, ce affecte clairement la route.

En raison du contrôle de la dynamique de ce versant par les précipitations, nous avons tenté de vérifier l'existence d'éventuelles corrélations entre les différentes phases de réactivation évoquées ci-dessus et la variation de la NAO (Cf. Chapitre 5, Figure V-44). Il en ressort que l'évolution du versant est globalement dépendante d'un épisode NAO négatif, donc très humide, voire neigeux et froid pour la période entre 1960 et 1970 où il est passé par un « maximum » (1968). Cette période avec d'intenses précipitations aurait induit une décompression du massif rocheux et l'ouverture des joints hérités résultant d'une histoire tectonique très complexe, entretenue par le contexte tectonique compressif actuel (surrection). Depuis 1977 et jusqu'à 2009 les variations du versant ne sont pas directement corrélés au taux de précipitation et de la NAO, ce qui suggère un impact indirect de la sismicité. Depuis 2009 et jusqu'aujourd'hui le massif d'Akroud témoigne d'une certaine stabilité qui risque d'être perturbée à n'importe quel moment d'autant plus que nous sommes apparemment entrés dans une période de 30 ans dominée par une NAO négative (Cf. Chapitre 5).

Pour conclure, le versant d'Amtrass est le siège d'une évolution géomorphologique particulière combinant plusieurs phénomènes simultanés (éboulis, fluage et reptation, écroulement, coulée de débris, en plus d'un comportement en glissement rotationnel dans la partie aval) témoignant d'une grande complexité sismotectonique (domaine en surrection et faille à caractère sismique) structurale et climatique. Cela, nous pousse à garder dans l'esprit la possibilité de réactivation à grande ampleur de ce massif, et rendre indispensable de mener des études permettant la caractérisation géométrique et cinématique, très détaillées et à différentes échelles de ce versant et de tous les cas similaires pour mieux comprendre leur dynamique. Nous pensons cependant, qu'une instrumentation et une modélisation de ce genre de mouvements de versant sont assurément appelées à être essentielles pour la détermination des seuils d'alerte et de recommandation pour la construction et les ouvrages dans le cas d'une future réactivation.

3.2. Le glissement de Bou Halla

3.2.1. Introduction

Situé à environ 10 Km au SW du village d'Amtrass (Figure IV-11), le douar de Bou Halla compte quelques centaines de maisons et est installé à la tête d'un ensemble d'anciens mouvements coalescents, très évolués et bien estompés, rendant ainsi la circonscription des mouvements difficile.

Le contexte géologique du glissement de Bou Halla est le même que celui de la coulée de débris d'Amtrass, puisque tous les deux se situent dans le prolongement SW du couloir faillé de Jebha, et en même temps prennent naissance au pied de la Dorsale calcaire mais avec une différence de quelques centaines d'altitude. Plusieurs formes de glissement s'y combinent et s'enchevêtrent (Chaouki, 1990 ; Mansour, 1998 ; Mastere et al., 2010), ce qui donne un paysage extrêmement confus et instable, enregistré par les désordres subis par la section de la route nationale 2 traversant ce douar (Figure IV-20).

Actuellement, trois zones dynamiques peuvent être dégagées (Figure IV-21):

-1° une zone de départ du glissement en amont du versant, avec une pente comprise entre 30 et 50°. Cette zone d'ablation de grande envergure est comprise entre la base de la Dorsale calcaire avec une altitude de 1170m et l'emplacement de la route à l'altitude de 900m.

-2° une zone d'accumulation drainée, d'une pente allant de 10° à 30°, très cultivée et suffisamment irriguée. Ses bourrelets sont effacés par la répétition des précipitations intenses et irrégulières qu'a connu cette région (ruissellement en nappe) d'une part, et par la répétitivité des pratiques agricoles tels que le labour et le pacage d'autre part.

Et -3° une zone basse constituée de matériaux flués étalés avec résurgence d'eau en filets parallèles, canalisée dans un couloir assez large.



Figure IV-20 : A : Vue générale de la route nationale N°2 affectée par le glissement de Bou Halla, avec la route actuelle (1), et l'ancienne route détruite et déplacée par le glissement de Bou Halla sachant que la 2 avait comme ancienne position la 1 ; B : Détail de la route détruite par une des phases du glissement ; C : Panneau signalétique déplacé avec la section de la route d'environ 20m lors de la réactivation du glissement en hiver (2010) ; D : Mur de soutènement disloqué par la poussée continue du glissement de Bou Halla, de [Mastere et al., 2010](#), adaptée.

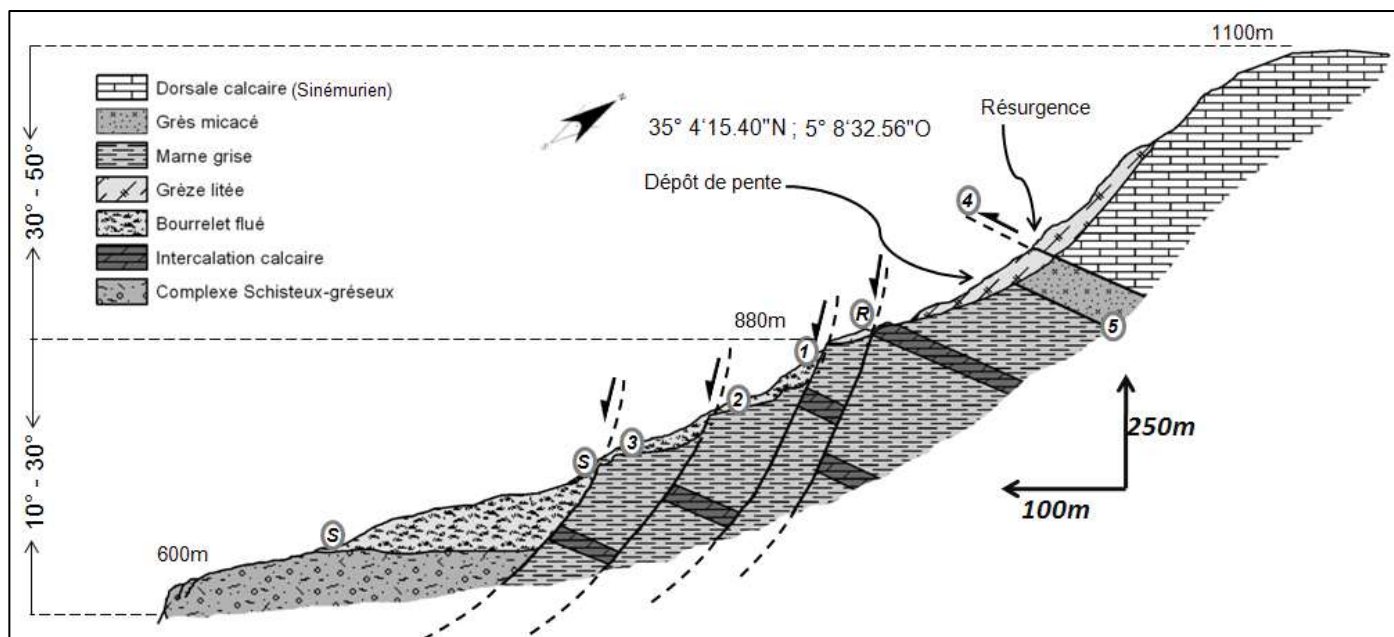


Figure IV-21 : Coupe géologique schématisique du versant de Bou Halla : R : Position de la route sur le versant ; S : Source d'eau ; 1 : Escarpement principal ; 2, 3 : Escarpements secondaires ; 4 : Contact chevauchant ; 5 : Surface de discordance.

3.2.2. Cadre lithologique et rôle de l'infiltration

La qualité de l'infiltration de l'eau est la clef de ce système complexe. Il existe deux systèmes de source d'eau, un dans la partie amont et un autre aval du glissement (Figure IV-23A&B). Comme schématisé dans la figure IV-23A, la partie amont est dominée beaucoup plus par un écoulement et érosion en surface puisque les dépôts de pente formés par les grèzes litées et s'étalant sur cette partie du versant de Bou Halla empêchent la percolation de l'eau et son infiltration. En revanche, la partie aval qui est dominée par des failles semi-circulaires est le siège d'une grande infiltration (Figure IV-23B). A la base de la série géologique de ce versant, affleurent les terrains constitués par une alternance de couches schisto-argileuses et des couches sableuses, toutes les deux appartiennent à l'unité de Tanger Externe avec une épaisseur de 200m environ.

Les observations de terrain permettent de retenir que cette formation (**UG5** dont 60% des argiles) est très sensible aux processus d'érosion et d'altération, ce qui provoque des phénomènes de transport par glissement de panneaux complexes (grèzes et éboulements) et l'initiation de plusieurs mouvements superficiels au sein du glissement et que l'on qualifierait de coulées boueuses superficielles. L'unité sus-jacente est formée par un important complexe de marnes grises (300m) avec des intercalations calcaires (Figure IV-21). Cette formation est en contact avec les calcaires massifs d'âge Sinémurien de la Dorsale calcaire par l'intermédiaire d'une couche de flyschs gréseux-sableux imperméable correspondant à une grande surface décrochante à faible composante inverse. Il s'agit d'un contact tectonique majeur qui canalise le drainage du réseau karstique du plateau, et à partir duquel le glissement de tout le versant de Bou Halla prend naissance. Il est censé permettre l'infiltration des eaux superficielles. Or ce n'est pas le cas si l'on compare le degré d'écoulement de surface de ce versant aux zones avoisinantes, tapissées de dépôts de pentes périglaciaires stratifiés intacts et que l'on qualifie de grèzes litées. Ces dépôts stratifiés constitue une série de barrières capillaire naturelles (Van Vliet Lanoë et al., 1993 ; Van Vliet Lanoë, 1995 ; Meilliez et Van

Vliet Lanoë, 2008) canalisant l'écoulement superficiel parallèlement à la pente grâce à la présence de lits fins (grèzes litées) (Figure IV-22).



Figure IV-22 : A : Photo montrant les carrières exploitant les formations de grèzes à l'aplomb du glissement de Bou Halla ; B : Ecoulement de l'eau de la résurgence qui se fait parallèlement à la pente du versant ; C : Ecoulement de l'eau de source canalisé artificiellement ; D : Photo montrant les formations des grèzes litées.

L'exploitation des grèzes par les carrières (Figure IV-22), à l'aplomb du glissement de Bou Halla est un premier facteur aggravant, puisqu'il favorise une infiltration directe des eaux sur les plans de décrochement probablement anciens réactivant le glissement. Un second facteur aggravant est la route nationale N°2 (vibrations du trafic) qui entaille le versant en le déstabilisant. Mis à part l'effet de l'infiltration provoquée, il y a aussi les caractéristiques géotechniques (UG5 dont 60% des argiles et l'UG4) totalement différentes des deux dernières formations (Dorsale calcaire et les marnes grises) qui sont en contact induisant un comportement hydrogéologique anormal à l'origine de plusieurs phénomènes. L'unité marneuse étant imperméable favoriserait d'avantage des changements en surface par solifluxion ou écoulement à grande densité de matériel, alors que la formation calcaire et celle des flyschs très fracturées facilite l'infiltration et la circulation de l'eau et en sub-surface et en profondeur.

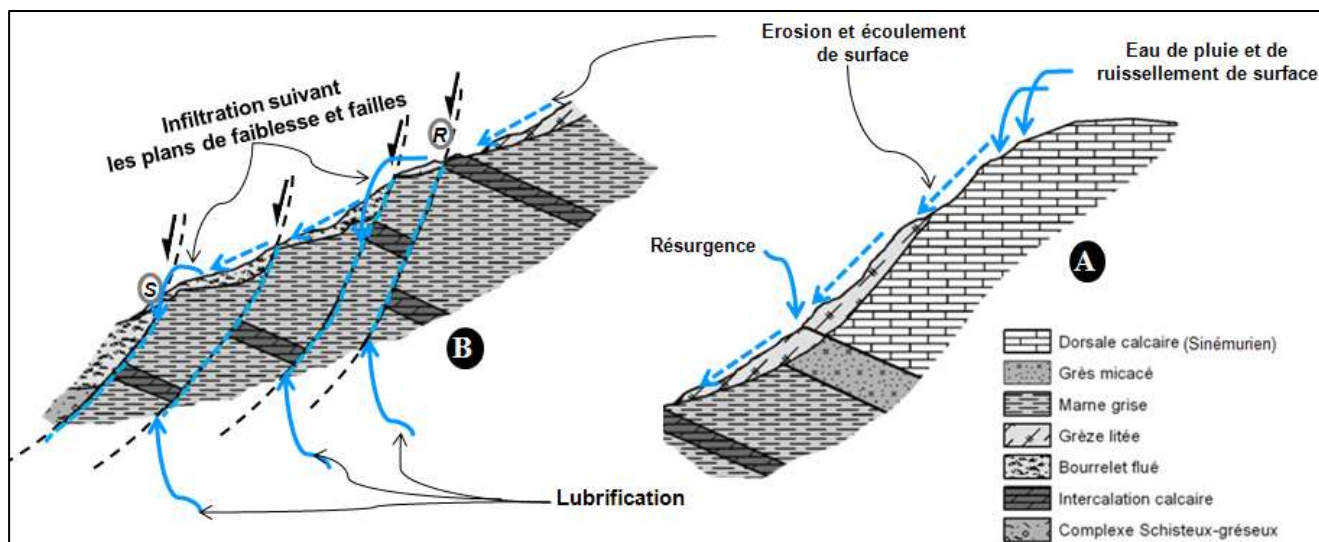


Figure IV-23 : A : Processus d'érosion et d'écoulement de surface dans la partie amont du versant de Bou Halla ; B : Processus d'infiltration, d'écoulement et d'érosion en surface et de lubrification dans la partie aval du versant de Bou Halla.

3.2.3. Phases de réactivation

La superposition des phénomènes décrits plus haut est responsable de la désorganisation du versant de Bou Halla, avec une part d'héritages. D'après nos observations (Mastere et al., 2010), il est vraisemblable que l'évolution chronologique (périodes de réactivation) du versant de Bou Halla s'inscrit dans le même contexte géodynamique et géomorphologique régional du versant d'Amtrass, où la fracturation récente, le régime contrasté des précipitations (NAO négative) et l'activité sismotectonique persistante à bas niveau de l'accident de Jebha, jouent un rôle déterminant dans l'évolution des versants de toute la région. Dans ce sens, la phase de 1970 où le glissement de Bou Halla a été précédé à la veille par un grand écroulement en masse au niveau du village d'Amtrass (14 Janvier 1970, selon le témoignage des habitants), suggérant un contrôle co-sismique et/ou climatique. Deux autres phases de réactivation du massif de Bou Halla ont été mise en évidence et semblent être liées à l'intensité des précipitations des deux hivers : de 1°- 1984, comme cela été confirmé par les témoignages du villageois et les notes de la direction des travaux publiques de la région ; et 2°- novembre 2010 (inondations au N du Maroc), où nous étions sur place trois jours après, en remarquant le mur de soutènement qui a été complètement emporté avec une partie de la route.

3.3. L'écroulement de Chrafate

3.3.1. Introduction et cadre structural

Contrairement au versant long et à pente relativement importante d'Amtrass, celui de Chrafate qui lui fait face, est caractérisé par une pente forte (65 à 75°). Il est longé au Sud par l'Oued Chrafate, au Nord et à l'Est par l'Oued Amtrass. Le massif de Chrafate est le lieu de chutes et d'écroulements fréquents et potentiellement catastrophiques. Il s'agit d'une instabilité de versant rocheux complexe et de grande ampleur déjà répertoriée dans le passé et qui se trouve réactivée par les intempéries après une longue période de calme.

Il représente le prolongement vers l'Est du Jbel Bou Halla puisque tous les deux font partie de la même écaille tectonique. Il est caractérisé par une grande concentration, sur plusieurs dizaines de Km², d'un nombre important de klippes sédimentaires très fracturées. Les surfaces de contact de ces klippes grésio-quartzitiques de l'unité Prédorsalienne avec les formations de la Dorsale calcaire externe y sont presque toutes des discontinuités susceptibles de faciliter des chutes et des écroulements (Figure IV-24).

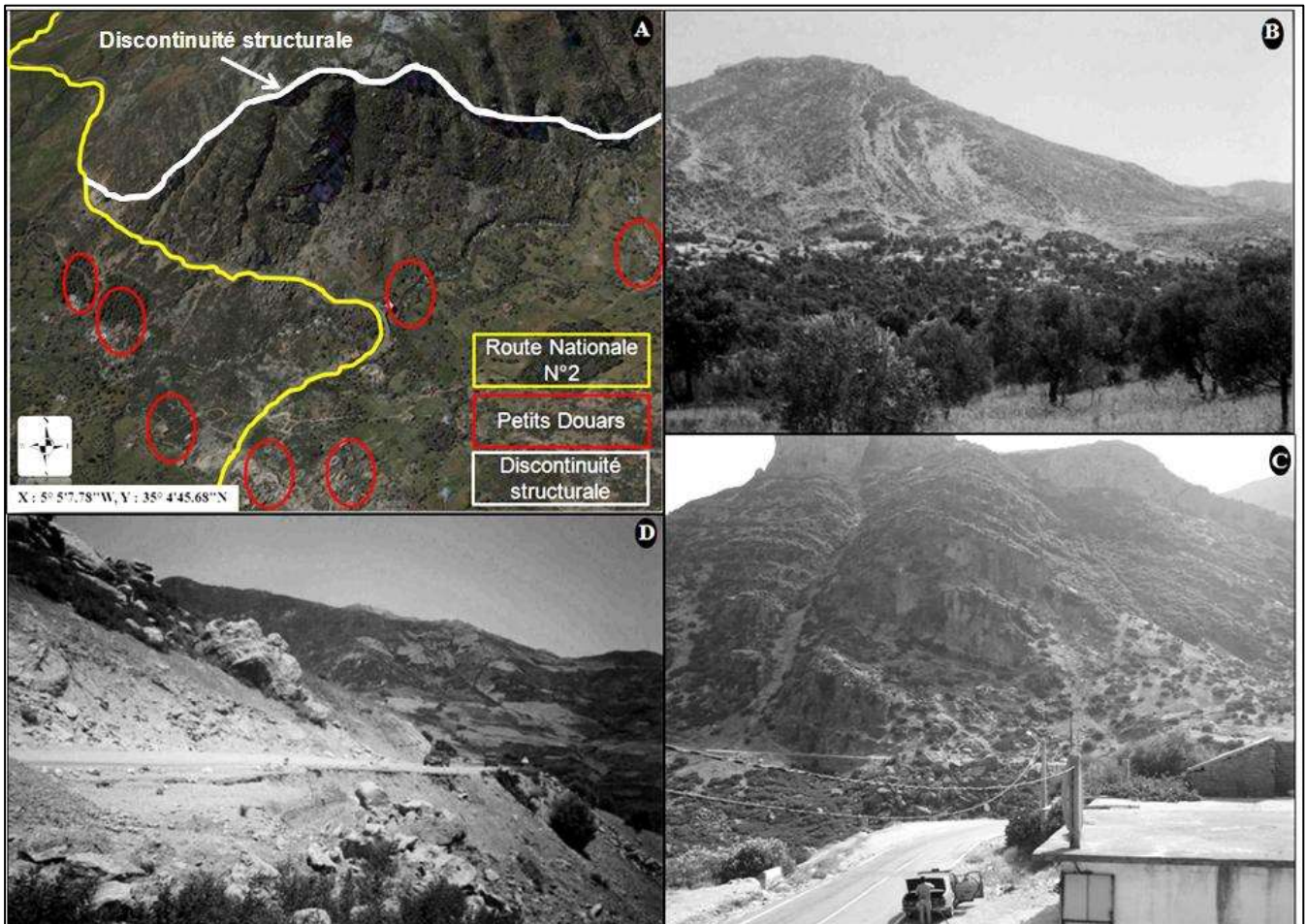


Figure IV-24 : A : Photosatellite haute résolution du versant de Chrafate ; B : Vue d'ensemble du côté Ouest du Jbel Chrafate, où on arrive à distinguer l'escarpement majeur de ce massif ; C : Partie Est du massif faisant face au versant d'Amtrass montrant les écroulements et les chutes qui atteignent la route ; D : L'entrée du village de Chrafate avec les blocs qui détériorent la section de la route nationale N°2 à chaque détachement de bloc.

Douar Chrafate est dominé par un escarpement de faille (Figure IV-24A et 25), de pente supérieure à 45°, et qui forme une branche de l'accident majeur de Jebha – Chrafate, représenté sur les cartes géologiques par un trait continu. Cet escarpement connaît d'une façon continue des chutes et des écroulements, où les blocs détachés forment un amas chaotique à l'amont du mur de sécurité construit, pour protéger la route et le village (Figure IV-24C), là où la pente n'est plus que de 15°. Ces blocs de toutes dimensions sont rencontrés partout à l'intérieur du village, jusqu'au talweg. Même actuellement, des blocs de grandes dimensions viennent de temps en temps s'arrêter à l'intérieur du village, à l'aval de la route (Figure IV-24C&D). Les plus gros de ces blocs proviennent des chutes ou des écroulements dans les formations carbonatées massives sus-jacentes, les autres résultent des chutes et écroulements dans les alternances calcaire-dolomitiques, après qu'ils aient subi des glissements bancs sur

bancs, à la faveur de la présence d'interlits marneux, de leur dislocation et de leur pendage légèrement incliné.

Quant au volume des blocs écroulés, il avoisine 1.5 Km³. De loin, on peut remarquer les grandes cicatrices dans la paroi de la formation calcaire laissées par les anciens éboulements en masse.

3.3.2. Rôle de l'héritage structural

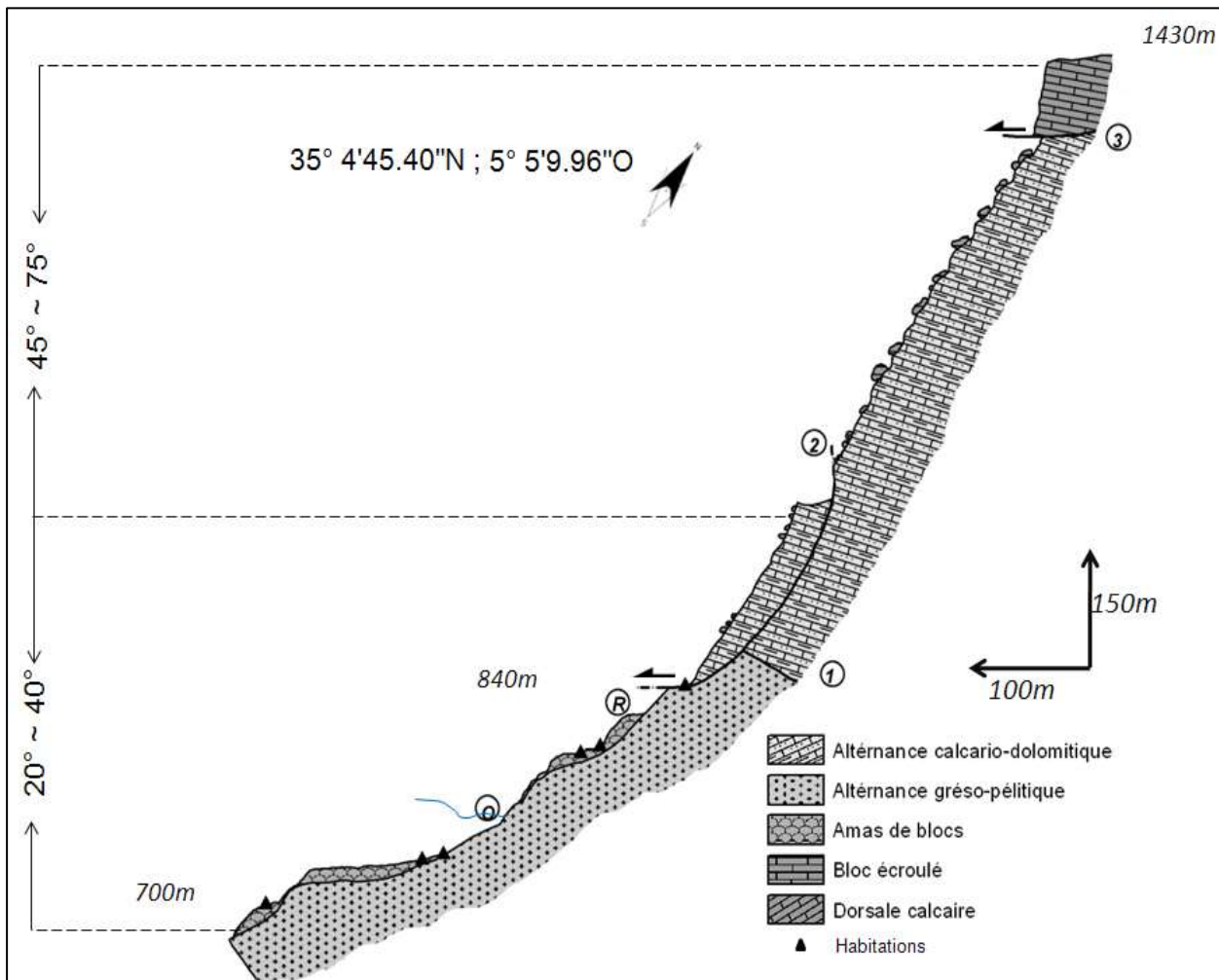


Figure IV-25 : Coupe schématique du versant de Chrafate ; 1 : surface de discordance ; 2 : faille circulaire ; 3 : contact chevauchant ; R : emplacement de la route nationale N°2 ; O : Oued Amtrass, [Chaouki, 1991](#) ; modifiée.

Le secteur de Chrafate, fait partie d'une zone qui est toujours active tectoniquement (chaîne en cours de surrection) et se situe dans le croisement tectonique formé par l'accident majeur de Jebha et par le front de chevauchement entre les formations de la Dorsale calcaire externe et les unités intrarifaines. L'activité tectonique persistante est enregistrée sous la forme d'écroulement et d'éboulis récents. Chaque année, des chutes de blocs de taille variable se produisent et des fragments de roches viennent s'accumuler sur le talus à la base de la montagne. A cet endroit la route nationale N°2 autrefois appelée RP39 a toujours connu et continue à connaître des perturbations. Dans ce même cadre structural, [Nold et al., 1981](#) proposent un grand glissement rotationnel qui affecterait tout le versant de Chrafate (Figure IV-24B et 25), surtout si l'on en croit à la morphologie en gradin de la montagne. Selon lui,

cette morphologie résulterait de la présence de failles superficielles d'arrachement en arcs de cercles, qui se rattachent à une faille plus importante et plus profonde responsable du glissement de tout le versant.

3.3.3. Evolution temporelle

Situé à quelques centaines de mètres du *debris flow* d'Amtrass et dont l'évolution spatiotemporelle a été abordée maintes fois (Chaouki, 1991 ; Mansour, 1998 ; Mansour et al., 2004 ; Mastere et al., 2009) le mouvement de versant de Chrafate, moins spectaculaire mais aussi important, n'a jamais été analysé dans cette optique. Cependant, de mémoire d'homme, les habitants du village de Chrafate et d'Amtrass, ainsi que leurs parents, affirment avoir toujours connu ces écroulements ou du moins une partie de ces amas rocheux. Il nous a donc été difficile d'avoir une idée sur les dates, puisqu'aucune trace écrite, aucun mémoire de chroniqueurs n'ont été trouvés, même s'il s'agit d'un fait considérable dans le paysage régional. En revanche, nous pouvons dire que cette activité est largement antérieure au début du siècle, puisque d'anciennes maisons qui datent au moins de la fin du 19^{ème} siècle étaient construites sur des blocailles qui résultent vraisemblablement de l'activité ancienne du même versant.

4. Synthèse 1

L'inventaire et la caractérisation des mouvements de terrain récents et actuels de notre secteur étude constituent une base de réflexion pour l'évolution l'aléa géomorphologique et notamment les mouvements de versants dans le Rif. Dans ce chapitre, après avoir fait un état d'art sur les méthodes de classifications et de la typologie de mouvements de versants, la quasi-totalité de ces derniers a été repéré par interprétation visuelle d'images satellitaires très haute résolution suivie d'observations de terrain. Ensuite, leur cartographie numérique (digitalisation) a été conduite directement au sein et à l'aide du programme ArcGis 10, pour construire une partie de la base de données d'une part, et pour compléter la métadonnée comportant les caractéristiques (cordonnées, superficie, périmètre, type...etc) des mouvements de terrain de notre secteur d'autre part.

L'inventaire effectué a permis de reconnaître cinq grandes familles de mouvements de versants, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit, des glissements, des écroulements, des coulées de débris, des sapements de berges et de routes, et des badlands. Ensuite, les facteurs qui peuvent affecter la qualité d'un inventaire de mouvements de terrain ont été discutés. Dans le même sens la qualité de la carte établie dans le cadre de ce chapitre a été comparée avec d'autres cartes, avant de procéder finalement à la description de quelques mouvements de versants du secteur de Chefchaouen.

Principales périodes de réactivation	Indices NAO, d'après Jim Hurrell (http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html)
1969	-4.89
1970	-1.89
1971 – 1988 (période généralement stable)	13 ans à indice positifs sur 4 ans à indices faiblement négatifs
1996	-3.96
2010	-4.64

Tableau IV-3 : corrélations entre les principales phases de réactivation des massifs d'Amtrass, Chrafate, et Bou Halla avec les variations NAO.

Les trois mouvements de terrain décrits, à savoir Amtrass, Bou Halla et Chrafate, permettent de retenir qu'il est vraisemblable que l'évolution cinématique de ces versant est assurée par la conjonction de phénomènes plusieurs types : **-1° climatiques** traduites par les variations NAO où les principales périodes de réactivation coïncident avec des indices NAO négatifs (Tableau IV-3), les fortes pluies, la fonte des neiges, l'alternance des cycles de gel/dégel, et les forts écarts thermiques. A l'action des intempéries s'ajoute l'effet mécanique des **-2° sollicitations sismiques** (vibrations), qui en dépit de leur faible magnitude (généralement ≤ 4.6) (Tableau IV-4) dans toute la province de Chefchaouen peuvent causer le basculement des pans des escarpements calcaires de la région ou même le basculement de toute une colonne rocheuse suite à la réactivation d'accidents hérités.

Date (Jr/Mois/Année)	Latitude (N)	Longitude (W)	Profondeur (m)	Magnitude	Référence
26/01/1969	35,1554	-5,0693	30	3	Cherkaoui, 1991
29/03/1969	35,1223	-5,0531	26	3,2	Cherkaoui, 1991
22/10/1969	35,155	-5,069	33	3,3	Cherkaoui, 1991
02/06/1970	35,178	-5,021	33	2,7	Cherkaoui, 1991
16/12/1970	35,065	-5,372	5	2,5	Cherkaoui, 1991
05/07/1975	35,16	-5,07	91,9	3	Cherkaoui, 1991
09/01/1975	35,06	-5,757	51	3,3	Palaez et al., 2007
02/02/1983	35,023	-5,169	5	3,5	Cherkaoui, 1991
18/05/1983	35,078	-5,067	33	3,1	Cherkaoui, 1991
03/08/1998	35,029	-5,194	99	4,2	Cherkaoui, en cours
04/11/2002	35,13	-5,182	14,5	3,4	Cherkaoui, en cours
06/04/2004	35,195	-5,11	7,4	2,8	Cherkaoui, en cours
19/05/2009	35,1215	-5,4667	5	3	Cherkaoui, en cours
12/08/2009	35,1197	5,3235	4	4	Cherkaoui, en cours
05/12/2010	35,0238	-5,4602	13	2,2	Cherkaoui, en cours

Tableau IV-4 : caractéristiques des séismes du secteur d'Amtrass – Chrafate – Bou Halla sur les dernières 50 années.

Sur les dernières quarante années huit séismes ont eu lieu dans le district d'Amtrass – Chrafate – Bou Halla, sans compter les centaines d'autres séismes enregistrés dans un périmètre de moins de 100 Km, ce qui nous rend compte de l'incidence de l'activité sismique dans l'évolution des versants en question ; **-3° l'héritage tectonique et géomorphologique** de la chaîne en cours de surrection et marqué par l'accident de Jebha qui au Burdigalien (Miocène inférieur) a fait décalé les terrains du domaine interne sur une distance de plus de 50 Km, et qui actuellement absorbe une grande partie de l'effet de la déformation induite par le rapprochement des plaques Afrique – Europe, d'où son caractère sismique (Cf. chapitre 3). **-4°** La facturation qui résulte de cet héritage est responsable de la présence d'une importante **circulation des eaux souterraines** qui jouent un rôle important dans le déclenchement des mouvements de terrain par la lubrification des zones de faiblesses, ou en surface par les eaux de sources (Tableau IV-5) et résurgences qui permettent la mise en mouvement de stocks rocheux grossiers ou fins. Cette tendance est expliquée par le fait les formations des nappes de flyschs de la province de Chefchaouen tout comme pour le reste de la chaîne Rifaine, sont formées essentiellement de marnes et d'argiles imperméables. Celle-ci va s'écouler en se concentrant selon la pente, en mettant un important ravinement des versants (badlands). Au niveau des replats, qui séparent le plus souvent des pentes très raides, on peut assister à une infiltration rapide qui permet à l'eau de saturer les formations sous-jacentes à la dorsale, où l'imbibition devient suffisante pour que les limites de plasticité voire de liquidité soient atteintes, ce qui catalyse le déclenchement d'un mouvement gravitaire comme c'est le cas pour le versant de Bou Halla ; **-5° la route nationale N°2** qui passe au pied des trois versant contribuant au changement du réseau de ruissellement superficiel en augmentant son débit d'une part, et l'intensification de

l'infiltration surtout en présence de fossés de drainage mal entretenus d'autre part. Il est utile aussi de rappeler le rôle joué par la lithologie qui est dominée par les terrains marneux et argilo – schisteux, ainsi que la pente et le dénivelé dans le secteur.

Versant	Mouvement principal	Mouvement secondaire	Dynamique des oueds	Présence de source	Variation de la pente	Exposition	Croisement tectonique
Amtrass	Coulée de débris	Eroulement, glissement, éboulis, et reptation	Oued Amtrass	Oui	30 à 75°	Sud	Croisement formé par le front de chevauchement entre la Dorsale calcaire externe et les unités intrarifaines et l'accident majeur de Jebha
Bou Halla	Glissement rotationnel	Eboulis, et coulées boueuses	Oued Bou Halla	Oui	10 à 50°	Sud	
Chrafate	Eroulement	Eboulis, et glissements	Oued Amtrass et Oued Chrafate	Oui	20 à 75°	Nord – Est	

Tableau IV-5 : résumé des caractéristiques des trois mouvements de versants décrits.

5. Représentativité des phénomènes inventoriés

5.1. Introduction

Une fois l'inventaire des MT est établi, il peut servir de base pour mener plusieurs types d'analyses dans le cadre de la prédiction de l'aléa (et ou susceptibilité) et du risque liés aux mouvements de terrain. Ces analyses se résument dans l'évaluation de la qualité de l'inventaire effectué en le comparant aux inventaires antérieurs ; l'appréciation de l'impact de la source et l'échelle des données utilisées, l'incidence des outils et moyens mis en œuvre pour une éventuelle amélioration, mais aussi l'analyse de la fréquence des phénomènes, leur abondance, leur taille et leur densité. Une carte de densité des MT correspond à une délimitation simplifiée de l'aléa, puisqu'elle permet de déterminer les secteurs (ou unités de terrain) où le plus grand nombre de MT est survenu. En d'autres termes, elle va délimiter les secteurs de plus grande densité (grande occurrence) et où les phénomènes sont les plus abondants, et, par conséquent, permettre une zonation préliminaire des aires susceptibles aux MT.

Les cartes obtenues matérialisent la densité des phénomènes par des zones d'isovaleurs (isodensités) en cercles concentriques (*mass movements isopleths*). De telles cartes ont été déjà réalisées par plusieurs auteurs (DeGraaf et Canuti, 1988 ; Van Westen, 1993 ; Soeters et Van Westen, 1996 ; Bülut et al., 2000 ; Coe et al., 2000 ; Coe et al., 2004 ; Baum et al., 2005 ; Guezzetti, 2005...etc) pour établir une zonation de l'aléa aux mouvements de terrain sur des dizaines d'années. Ce type de carte semble constituer une bonne alternative pour obtenir des informations sur la future distribution spatiale des phénomènes, sachant que les informations concernant l'occurrence et la susceptibilité sont très pauvres en comparaison avec d'autres méthodes plus élaborées, car surestime des zones qui ne devraient pas être considérées comme susceptibles quand il s'agit de courte période (Baum et al., 2005 ; Thiery, 2007).

5.2. Abondance ou densité des MT

Mise à part l'évaluation de l'aléa (et ou de la susceptibilité) aux mouvements de terrain, une carte de densité permet de quantifier l'abondance spatiale ou géographique des phénomènes inventoriés, ce qui correspond à la mesure de leur fréquence. Cette dernière peut être calculée mathématiquement à l'aide de la formule suivant :

$$\text{Equation 1 : } D_L = \frac{A_l}{A_m} \text{ avec } 0 \leq D_L \leq 1$$

A_i correspond à la superficie totale de l'ensemble des mouvements de terrain au sein d'une même unité de calcul (A_m). A_m constitue la superficie de l'unité de cartographie utilisée pour calculer la densité. Elle peut correspondre à la superficie d'une unité de terrain, d'un versant ou de la cellule d'une grille (*grid cell*) de cartographie. Cette dernière est la plus utilisée et devient l'unité de référence pour ce genre de calculs, puisque elle permet le découpage du territoire d'étude en zones régulières dont la taille peut être prédéfinie et adaptée par l'utilisateur (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Mark et Ellen, 1995 ; Chung et Fabbri, 1999 ; Lee et Min, 2002 ; Ayalew et Yamagishi, 2005; Lan et al., 2005; Moreiras, 2005 ; Guzzetti, 2005...etc.).

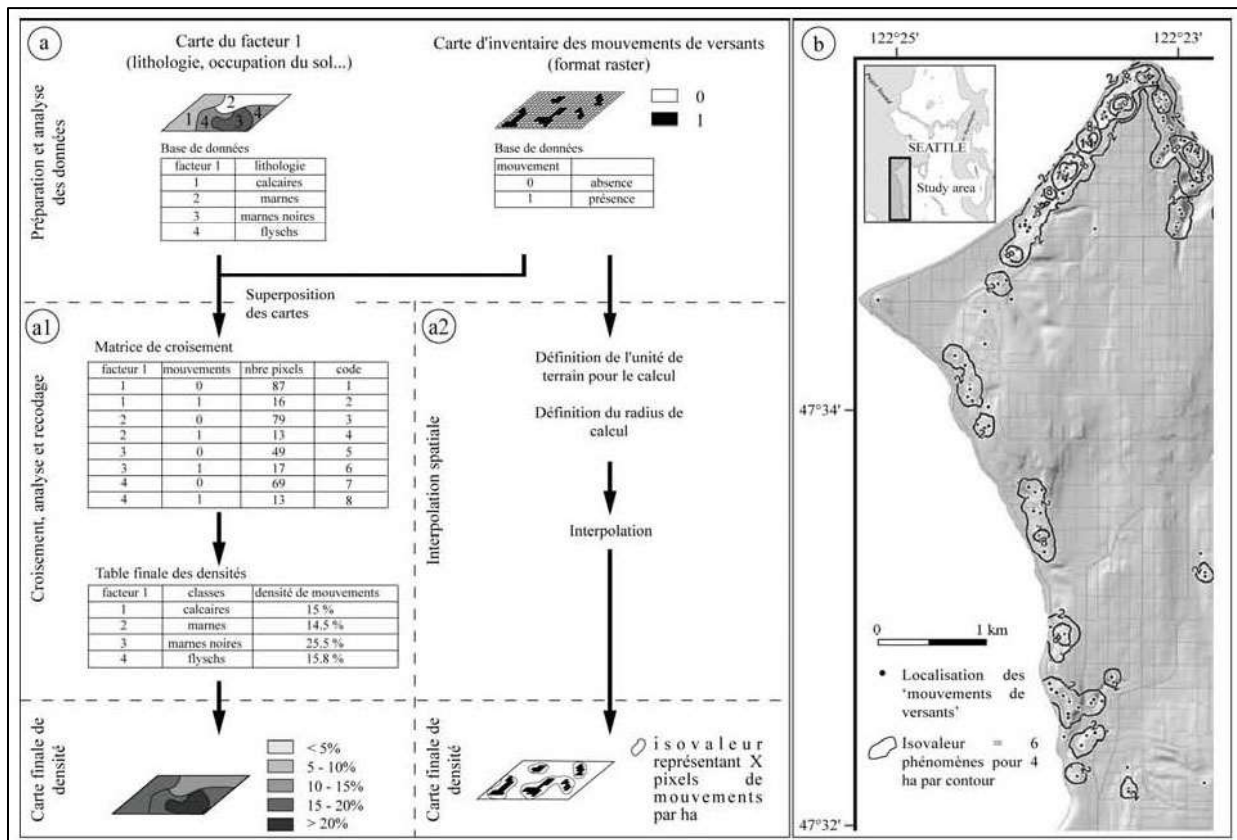


Figure IV-26 : Schématisation des étapes d'analyse de la densité des mouvements de terrain sous SIG ; a : Méthode de cartographie par densité ; a1. Méthode par facteur ; a2. Méthode par calcul d'isovaleurs (Van Westen, 1993 et Soeters et Van Westen, 1996 ; reprise par Thiery, 2007) ; b. Exemple de carte d'isovaleurs pour six phénomènes par ha (Coe et al., 2004 et Baum et al., 2005 ; reprise par Thiery, 2007).

La figure IV-26 schématise les différentes étapes pour le calcul et l'analyse de la densité des mouvements de terrain sous SIG. Elle montre aussi que la densité des phénomènes peut être calculée pour (ou croisée avec) chaque facteur individuellement, ce qui permet d'avoir une idée même globale sur le degré d'importance de chaque paramètre dans l'occurrence des mouvements de terrain. Le croisement de la densité des MT de la province de Chefchaouen avec les différents facteurs individuellement sera discuté dans les conclusions des différentes sections du chapitre suivant (5).

Dans la présente section, nous nous intéressons au calcul et analyse de la densité des MT prise isolément. Cependant, comme il est mentionné dans l'équation ci-dessus et dans la figure IV-27, la valeur de densité varie de 0 à 1. La même figure, permet d'avoir une vue synoptique sur la distribution spatiale des mouvements de terrain à échelle régionale, et offre

un aperçu du premier ordre sur l'abondance des phénomènes, en permettant de définir les zones qui nécessitent des études plus détaillées. Par ordre d'importance, et suivant le découpage topographique (IGN) à l'échelle de 1/50 000 quatre zones à forte densité de mouvements peuvent être dégagées. Il s'agit de la région de Bab Taza, Zoumi, Tamorot, et Jebha, raison pour laquelle une de ces régions (Bab Taza) sera abordée en détail (Cf. Chapitre 6) par l'application de méthodes bien adaptées pour l'évaluation de l'aléa et de la susceptibilité aux mouvements de terrain à méso – échelle.

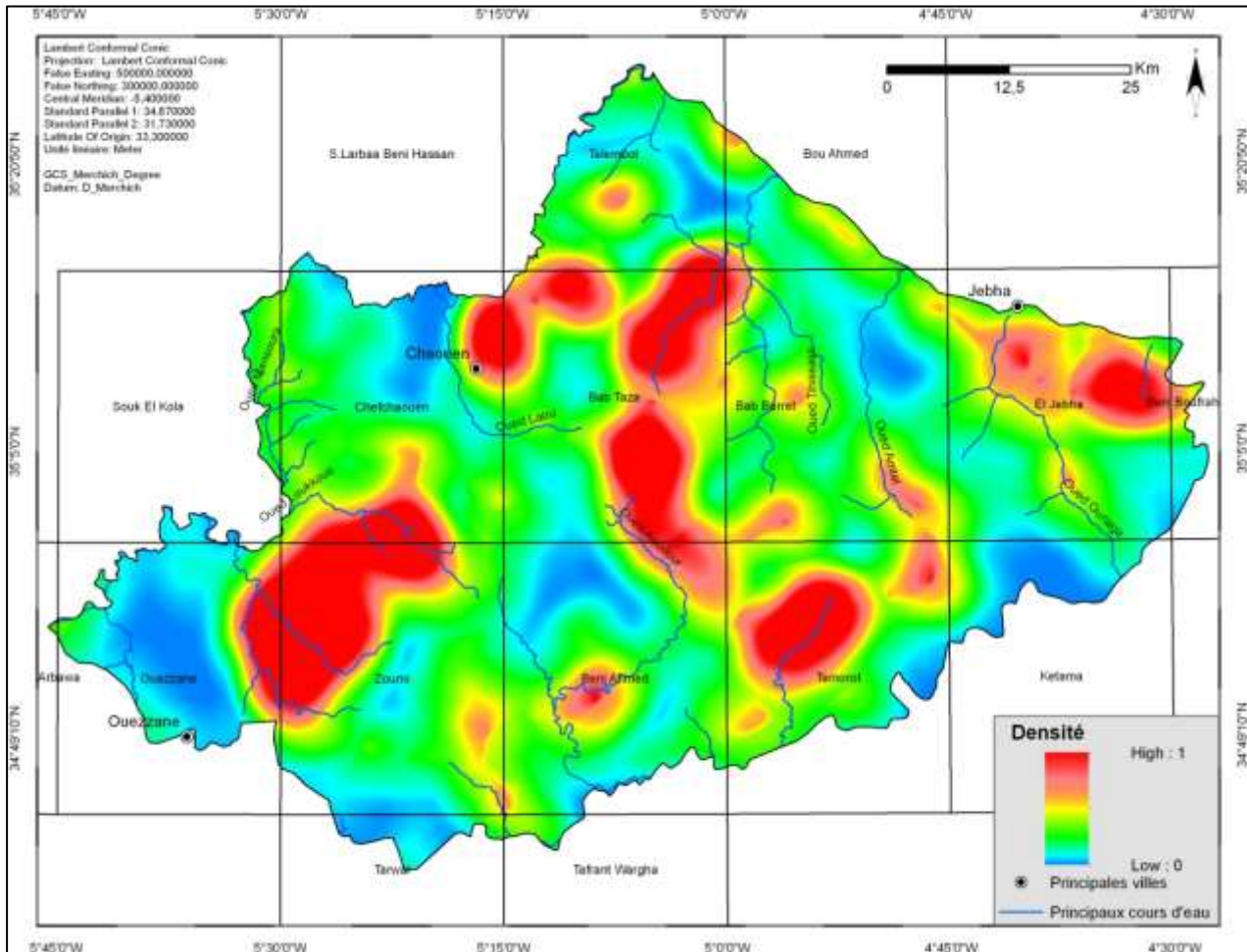


Figure IV-27 : Densité des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen, avec une grille du découpage topographique à l'échelle de 1 / 50 000ème.

5.3. Persistance et fréquence temporelle des MT

La persistance d'un MT peut être définie comme étant la probabilité qu'un nouveau mouvement se produise dans le même emplacement. L'étude de la persistance peut avoir une grande influence sur tout zonage de l'aléa (et ou de la susceptibilité) mouvements de versants, notamment dans le cadre d'une analyse qualitative. D'après Guezzi, 2005 et Parker, 2009 ; il est simple de conduire une telle étude, et ce par la comparaison ou autrement dit la superposition sous SIG de la carte d'inventaire actuelle avec une autre carte antérieure.

A l'échelle de la province de Chefchaouen, la seule carte d'inventaire disponible et antérieure à la carte réalisée dans le cadre de ce mémoire, permettant d'apprécier la persistance spatiale des MT, est celle établie par Maurer en 1968. Les mouvements présents sur cette carte ont été digitalisés et intégrés dans la même base de données par superposition sur les

mouvements que nous avons recensés. Une requête de sélection par emplacement, nous a permis de préciser que seul un nombre de 79 sur un total de 1187 de MT se sont déclenchés sur des emplacements de mouvements préexistants (Figure IV-28), soit une persistance de l'ordre de 6%. Une telle valeur de persistance spatiale n'est pas suffisante pour guider la sélection des zones où les phénomènes ont caractère récurrent pour les étudier en détail. Dans le même sens, [Guezzezi, 2005](#) ; et [Guezzezi et al., 2005](#), mentionne qu'une persistance spatiale de l'ordre de 40% est la valeur minimale à partir de laquelle on peut caractériser une zone comme étant le lieu de mouvements de terrain répétitifs, ce qui n'est pas le cas pour la province de Chefchaouen, et raison pour laquelle nous avons eu recours à la construction de la carte de densité des MT.

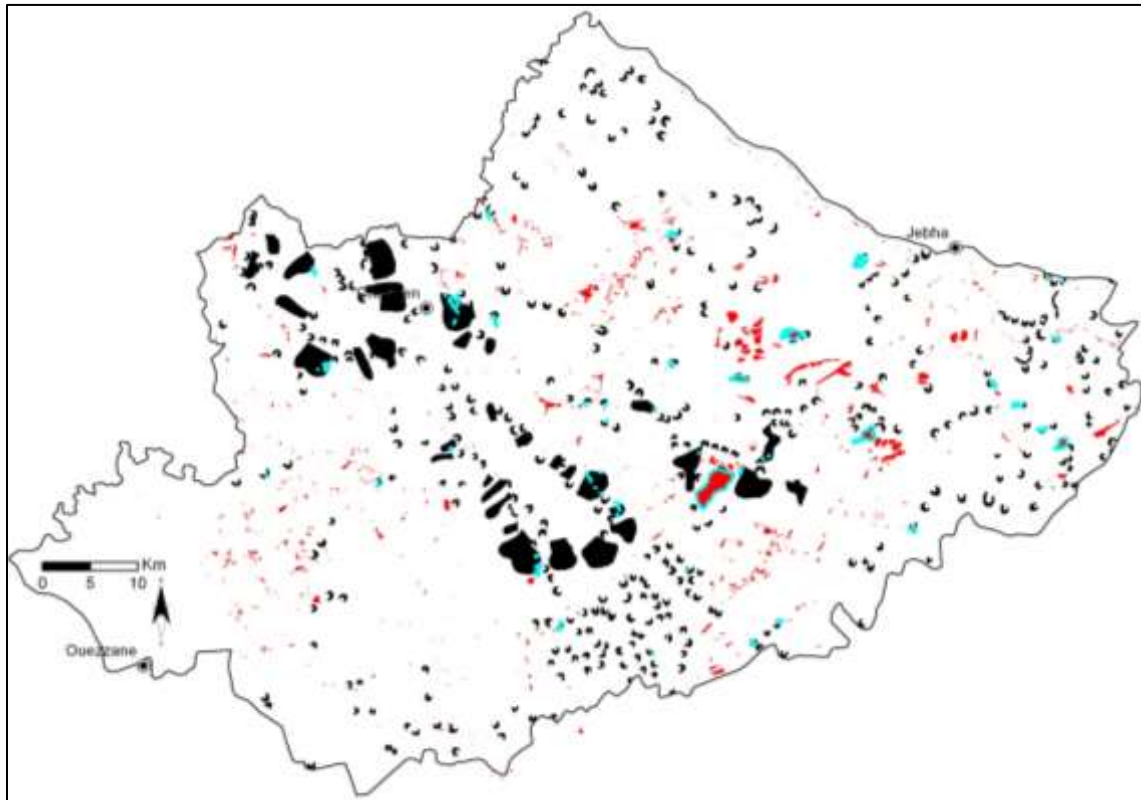


Figure IV-28 : Carte de persistance spatiale des mouvements de terrain dans la province de Chefchaouen : En noir les mouvements de terrain inventoriés par Maurer, 1968 ; en rouge les mouvements de terrain inventoriés dans le cadre de ce travail. Les polygones en bleu matérialisent les mouvements déclenchés dans les emplacements de mouvements préexistants.

Cependant, il est important de signaler que des études de fréquences temporelles des MT peuvent être bénéfiques dans toutes démarches d'analyse de l'aléa (et ou susceptibilité) et du risque MT. Ce genre d'analyse peut être mené à condition de disposer des informations d'archives nécessaires, ou de carte d'inventaire à différentes périodes. Au Maroc, nous ne disposant d'aucun type de ces documents, ce qui a rendu impossible la réalisation de ce type d'étude.

5.4. Analyse statistique des phénomènes

Le travail d'inventaire sous SIG permet d'attribuer des paramètres morphologiques à chaque élément cartographié. Plusieurs informations sur les mouvements de terrain ont été saisies manuellement, pendant que d'autres ont été établies directement sous SIG, pour que

l'ensemble soit répertorié dans un fichier attributaire exploitable et interrogeable par un maximum de programmes dont les SIG. Chaque mouvement a été matérialisé par un polygone associé à une base de données d'attributs (métadonnée) ce qui va nous permettre de conduire des analyses statistiques descriptives sur les phénomènes inventoriés. Cette démarche permettra de compléter la connaissance approfondie des phénomènes, et de quantifier certaines informations de manière moins subjective.

Une analyse statistique des mouvements de terrain peut porter sur plusieurs paramètres de ces derniers. Parmi lesquels, on peut citer : la longueur, la superficie, le volume, la vitesse...etc. la figure IV-29 montre que ces paramètres varient largement, où on peut noter que la longueur d'un mouvement de terrain peut être inférieure à un mètre comme elle peut atteindre plusieurs centaines de mètre dans le cas de gigantesques mouvements comme celui de Bou Halla. La même remarque est valable pour le volume, la superficie ou autre.

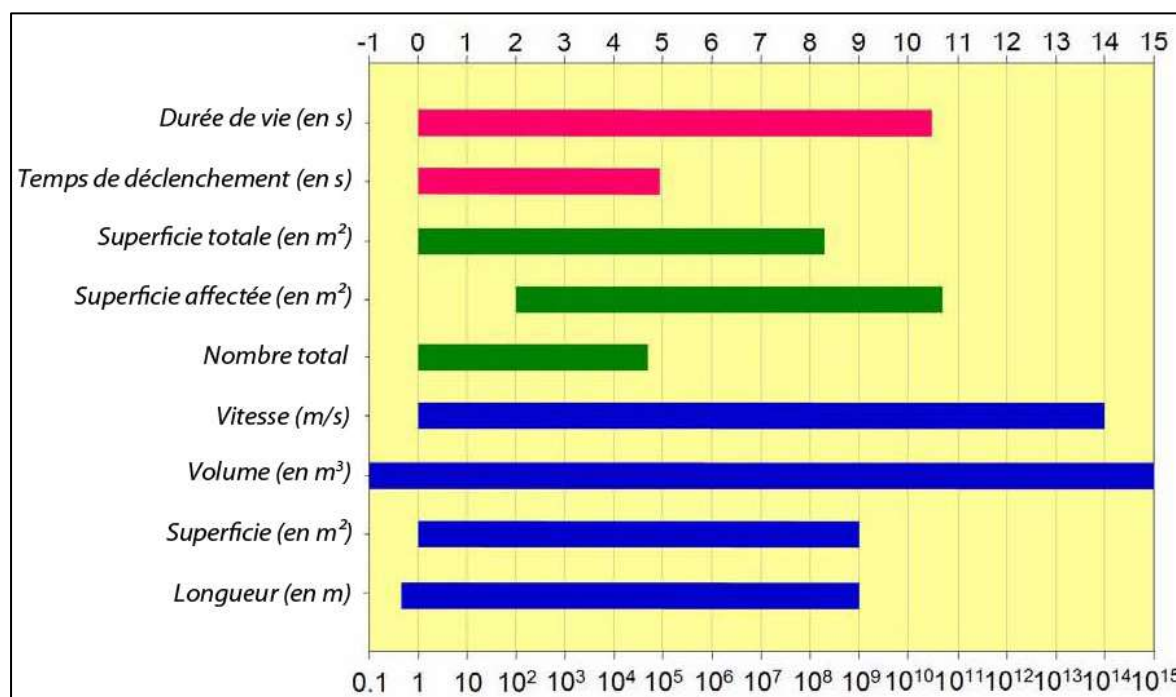


Figure IV-29 : Le large spectre du phénomène mouvement de terrain. L'ordre des grandeurs est représenté sur l'axe x sur une échelle logarithmique. Les chiffres donnés sont approximatifs pour des fins purement descriptives. (Guezzetti, 2005 ; adaptée).

Cependant, l'étude statistique de la fréquence des paramètres de taille des phénomènes inventoriés est d'une importance capitale, non seulement pour le bon déroulement de toute démarche d'analyse de l'aléa et du risque mouvements de terrain, mais aussi pour quantifier la contribution de ces phénomènes dans l'érosion et le transport sédimentaire (Hovius et al., 2000 ; Martin et al., 2002).

5.4.1. Analyse de la taille des MT (superficie)

Dans un premier temps, une analyse globale en perspective de la distribution spatiale des MT a été conduite (Figure IV-30). Cette méthode permet de détecter l'existence de tendances préférentielles dans la variation géographique des phénomènes en les reportant sur plusieurs types d'axes.

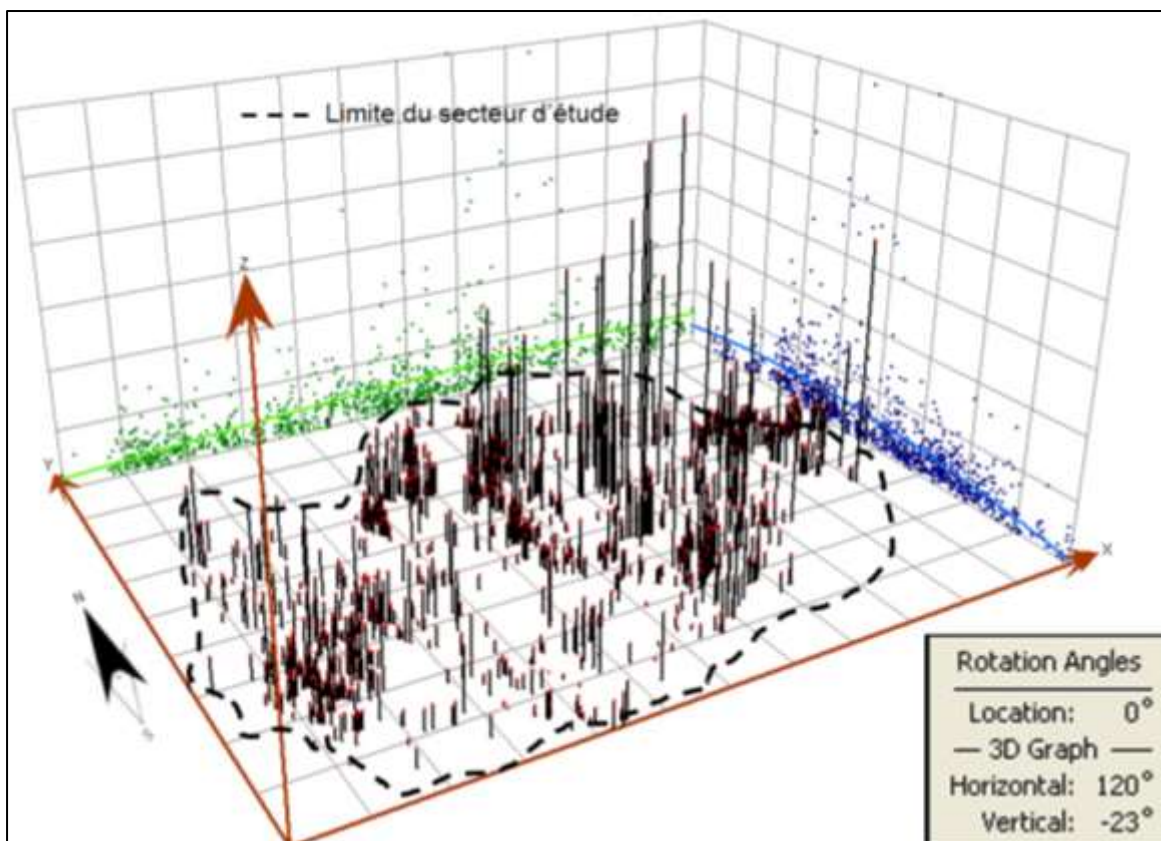


Figure IV-30 : Représentation en perspective de la distribution spatiale des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen en fonction de leur taille.

Un axe XY qui montre l'emplacement des phénomènes sur l'ensemble de l'aire d'étude, et qui permet la constatation d'une tendance décroissante du nombre des phénomènes dans la partie SSW du secteur, et qu'environ les deux tiers des mouvements se concentrent dans la moitié Est de la zone d'étude. Cette tendance, semble être liée essentiellement, à la faible densité de failles et du réseau de drainage dans cette partie du secteur, ainsi qu'aux pentes modérées et aux précipitations moins intenses que celles du reste de la province (Cf. Chapitre 5). Un axe XZ, où les phénomènes sont représentés par un nuage de points, permet de retenir que plus de 80% des MT ont une évolution assez constante quelle que soit la latitude et l'altitude. La même remarque est valable pour l'axe YZ. Finalement, un axe combinant les trois composantes géographiques (XYZ) qui montre que les MT se rencontrent dans toute la province, chose difficile à comprendre seulement par la variation des latitudes, longitudes et altitudes, sans faire appel aux autres paramètres environnementaux et anthropiques (Cf. Conclusions des sections, Chapitre 6).

L'histogramme (Figure IV-31A) fournit une description univariée (une seule variable). Il présente les fréquences de la distribution des MT en se basant sur leurs superficies, en plus d'autres statistiques sommaires. Les barres les plus longues matérialisent les superficies ou classes de superficies des MT qui se rencontrent partout dans le secteur d'étude, alors que les barres les plus petites correspondent à ceux qui ont des superficies incomparables et très différentes par rapport à celles qui forment la tendance générale. Le module « *Geostatistical analyst* » d'ArcMap 10 permet d'examiner en temps réel la distribution spatiale de chaque classe de la variable en question. Comme exemple, une fois que la barre la plus longue de notre histogramme est sélectionnée, la classe de superficie des MT qui présente la répartition homogène la plus homogène sur toute la région d'étude est automatiquement activée sur la

carte d'inventaire (Figure IV-31A & B). Cette classe de superficie est comprise entre 2.4 à 2.6 hectares (soit entre 240000 à 260000 m²), ce qui correspond assez bien à nos observations visuelles pour les glissements vrais.

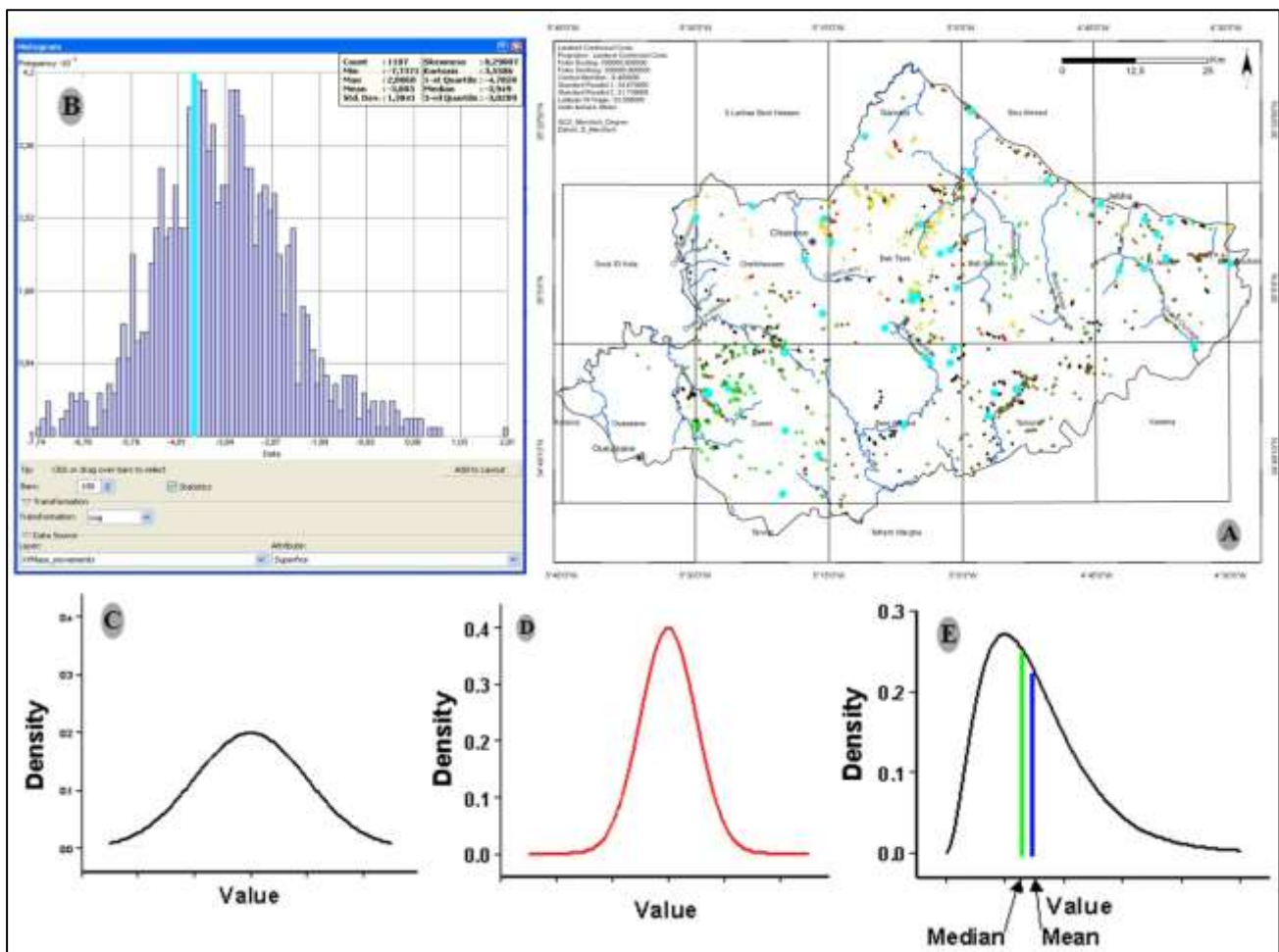


Figure IV-31: A : Carte de la distribution spatiale des mouvements de terrain; B : Histogramme montrant les fréquences des superficies des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen en log décimale ; C : Courbe de la déviation standard de la distribution des superficies ; D : Courbe du coefficient de Kurtosis ; et E : Courbe de Skewness avec les positions respectives des valeurs médiane et moyenne.

D'une façon plus globale, la courbe (Figure IV-31C) et la valeur calculée (Figure IV28-B en haut à droite) de la déviation standard montrent que le reste des superficies ont se répartissent d'une façon assez symétrique autour de la valeur centrale. La même information est confirmé la courbe et la valeur de Kurtosis légèrement supérieur à 3, sachant que coefficient de Kurtosis = 3 correspondrait à la distribution la plus normale et la plus homogène possible (Figure IV-31B & D), ainsi que la valeur du coefficient de Skewness légèrement supérieur à zéro et la courbe qui montre que la valeur moyenne est supérieur à la médiane (Figure IV-31E).

Cependant, pour repérer rapidement les MT dont la taille ne correspond à la tendance générale des superficies, un diagramme quantile-quantile a été construit (Figure IV-32). Il permet une appréciation graphique de l'ajustement d'une distribution observée à un modèle théorique. En même temps, il permet d'examiner la répartition d'une variable donnée (en occurrence la superficie des mouvements) et d'estimer sa fréquence. Dans notre cas, il s'agit d'une assez bonne répartition géographique des phénomènes en se basant sur leur taille qui se

fait d'une façon homogène sur toute l'aire d'étude, puisque plus de 45% du nuage des points correspondants aux valeurs réelles s'alignent sur la droite matérialisant les valeurs des superficies théoriques (modélisées).

Il a été possible de sélectionner les points qui sont relativement éloignés de la bissectrice modélisée et d'examiner leur nature, où il s'est avéré qu'il s'agit essentiellement à des phénomènes de Badlands de grande taille et se situant dans la partie SE du secteur. En revanche, le changement de taille du reste des phénomènes se fait d'une manière progressive.

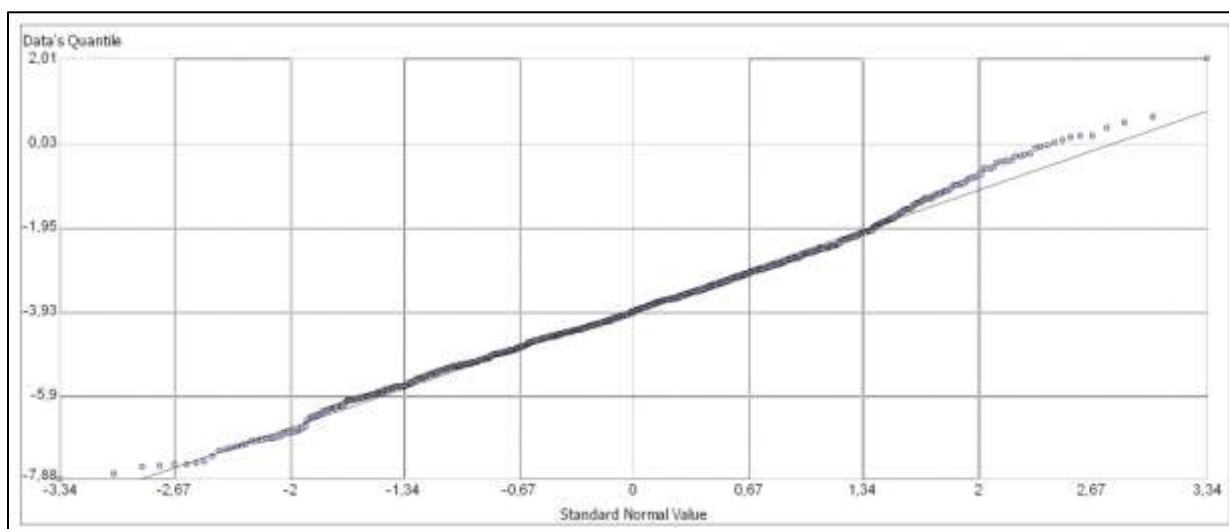


Figure IV-32 : diagramme quantile-quantile des superficies des MT de la province de Chefchaouen.

5.5. Pertinence des attributs : indice de confiance cartographique (ICC)

Dans le cadre de toute modélisation ou cartographie de la susceptibilité (et ou de l'aléa) mouvements de terrain par approches quantitatives ou semi-quantitatives, la qualité de la représentativité de la variable à modéliser (en occurrence « MT ») est l'un des paramètres essentiels à ne pas négliger. Si les caractéristiques (notamment la localisation et le type) de cette variable présentent de fortes incertitudes, les résultats des modèles peuvent être biaisés (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Guzzetti, 2005). Pour cela, il est possible d'évaluer l'indice de confiance cartographique (ICC) pour réduire la possibilité qu'un biais affecte l'analyse ou la modélisation à mener. Cet indice lui-même, repose sur la qualité des informations collectées, et qui se résument dans la qualité des observations de terrain, et ou la pertinence des observations effectuées par l'interprétation des données spatiales satellites et aéroportées (Thiery, 2007). Dans le cas où ces deux dernières sources sont inaccessibles, la pertinence des informations collectées peut se référer aux documents annexes tels que les rapports ; les articles ou les cartes géomorphologiques existantes.

Dans le présent travail, il s'agit d'un fort ICC supérieur 90% puisque pour les cas de terrain seules les formes nettes c'est-à-dire avec aucune ambiguïté sur la reconnaissance du phénomène ont été retenues. Quant aux photographies aériennes et les images satellitaires à haute résolution, seules les formes bien visibles (topographie chaotique et désorganisée, ruptures de pentes, escarpement, etc.) et largement distinctes avec l'environnement alentour ont été retenues.

5.6. Synthèse 2

L'inventaire effectué a permis de détecter 1187 mouvements de terrain. Ils couvrent une superficie totale de 135 Km², soit 2.7% de la superficie globale de la province de Chefchaouen (5068 Km²). La taille maximum des mouvements enregistrés est de 147 000 m² pour un minimum de 400 m² et une moyenne de 100 000 m². Les MT de petites tailles (< à 100 000 m²) sont au nombre de 912 soit 76.83% de la totalité des mouvements, et couvrent une superficie de 59.3Km² soit 43.92% de la totalité de la surface affectée par les MT. Ceux de taille moyenne comprise entre 100 000 et 300 000 m² comptent 216 mouvements correspondant à 18.19% du nombre total, et une superficie de 31.51 Km² correspondant à 23.39% de la totalité du secteur. Quant à ceux de grande taille, ils ne dépassent les 59 pour une superficie de 44.09 Km², c'est-à-dire 4.9% et 32.65% respectivement pour le nombre total des phénomènes et la superficie globale de la province.

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

6. Conclusion chapitre 4

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

L'inventaire effectué a permis de reconnaître cinq grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit de trois types de phénomènes construits: les écroulements, les glissements et les coulées boueuses, et de deux formes d'érosion, les sapements de berges ou de routes et les badlands. Ensuite, les facteurs qui peuvent affecter la qualité d'un inventaire de mouvements de terrain ont été discutés. Dans le même sens la qualité de la carte établie dans le cadre de ce chapitre a été comparée avec d'autres cartes, avant de procéder finalement à la description de quelques mouvements de versants du secteur de Chefchaouen.

Cependant, un petit examen de la carte d'inventaire de mouvements de terrain, où la consultation du tableau attributaire contenant toutes les informations et les caractéristiques des phénomènes inventoriés, ou même une courte mission de terrain permettrait de retenir que la taille de ces derniers est très variable d'un lieu à un autre en fonction de caractéristiques intrinsèques et extrinsèques de la zone affectée. Cette taille (volume, ou superficie dans notre cas) est généralement inversement proportionnelle à l'abondance (fréquence ou densité) des phénomènes.

Avant de discuter la distribution des mouvements de terrain de notre secteur d'étude en se basant sur leur taille (superficie), il a été tout d'abord nécessaire de vérifier la qualité de l'inventaire mené, ce qui constitue une étape cruciale à ne pas négliger pour toute démarche de prédiction de l'aléa (spatial et/ou temporelle) et/ou du risque mouvements de terrains. Dans le même sens avant de juger de la bonne qualité de la carte d'inventaire réalisée dans le cadre de ce travail, nous avons rappelé que les plus importants paramètres qui influence la qualité d'une telle carte se résument dans l'échelle de l'analyse, le qualité et la résolution des données de bases, le temps de réalisation et la qualité de l'outillage mis à disposition, sans oublier le degré d'expérience de l'interprète menant l'inventaire.

CHAPITRE V : LES VARIABLES PREDICTIVES : ACQUISITION, DESCRIPTION ET RELATION AVEC LES MOUVEMENTS DE TERRAIN (VARIABLE A MODELISER)

Résumé du chapitre

Ce chapitre est axé sur l'étude des variables prédictives (facteurs conditionnant de l'occurrence des mouvements de terrain) par leur acquisition, description, ainsi que leur spatialisation et intégration dans une base de données multi-sources et multi-échelles, permettant leur superposition, consultation, mise à jour, en plus de leur croisement avec la variable à modéliser (les mouvements de terrain) afin d'étudier leur relation avec celle-ci dans la province de Chefchaouen.

1. Les variables géologiques : Lithologie et failles

1.1. Introduction

La carte des faciès de la province de Chefchaouen a été extraite de la carte géologique (Suter, 1980) à l'échelle de 1/500 000ème de la chaîne rifaine. La morphologie est l'expression superficielle de la lithologie, de la fracturation et de la géodynamique interne en réponse à la géodynamique externe. Pour les deux secteurs de Bab Taza (Cf. chapitre 6), la carte géologique utilisée est à l'échelle de 1/50 000ème. Nous avons procédé ensuite en une requalification postérieure des formations géologiques selon leurs affinités lithologiques et mécaniques à l'aide du module « *reclassification* » du *Spatial Analyst* de notre logiciel SIG. Pour se faire, différents types et niveaux de découpage sont proposés dans la littérature (Lacroix, 1968 ; AIGI, 1976 ; Varnes, 1984, Van Westen, 1993 ; Castellanos et Van Westen, 2008), parmi lesquels - un découpage morphologique incluant les formations superficielles, - un découpage géotechnique ou lithologique simple, ou - un découpage selon un complexe lithologique et des séquences lithologiques...dont la validité varie avec l'échelle de travail. Pour cette étude, les deux principaux niveaux d'analyse se déroulent à méso-échelle et à l'échelle régionale. C'est pour cette raison que nous avons adopté un découpage associant à la fois l'aspect des propriétés géotechniques (AIGI¹¹, 1976) et complexes morphologiques dans le sens de Van Westen, 1993 ; et Castellanos et Van Westen, 2008. Un tel découpage permet d'obtenir des unités présentant le maximum d'homogénéités à la fois des points de vue lithologique et des propriétés physiques et mécaniques de la roche, qu'en termes d'appartenance à un même domaine morphologique.

1.2. Carte lithologique

Le faciès (en occurrence les unités géotechniques et morphologiques = UG) joue un rôle majeur pour l'équilibre des versants autant que la nature des matériaux (qualité géotechnique des roches), ou la structure (disposition et pendage des couches géologiques). Cette approche permet de rendre prévisible le comportement d'une formation caractérisée par un matériau défini. Cependant, la géologie de notre secteur d'étude est d'une importance capitale dans l'occurrence et la distribution spatiale des mouvements de terrain. La plupart des phénomènes inventoriés s'avèrent être liés - à la présence d'argiles, marnes, flyschs, et schistes, - à des caractéristiques mécaniques médiocres des argiles (riches en smectite); dissolution du gypse, - à une infiltration des eaux essentiellement au niveau des alternances calcaires-argiles et argile-marnes sensibles aux variations de la teneur en eau.

La carte des faciès (Figure V-1) 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. Ensuite, une analyse d'identification a été conduite pour les caractériser, du point de vue géotechnique (Tableau VI-1). Cette analyse est basée sur la compilation des données et résultats des tests géotechniques effectués par nos prédécesseurs (Chaouki, 1991 ; Margaa, 1994 ; Margaa et Abdelgader, 1998 ; Mansour, 1998 ; El Kharrim, 2001 ; Soossey Alaoui, 2005) ayant travaillé dans des zones appartenant à notre secteur d'étude ou de secteurs avoisinants mais qui présente l'extension ou le prolongement des mêmes formations (Sebtides, Ghomarides, Dorsale calcaires, nappes de flyschs...etc). Nous avons dû effectuer une extrapolation de valeurs d'identification

¹¹ AIGI : Association Internationale des Géologues Ingénieurs.

géotechniques (Tableau VI-1), à titre indicatif et non systématique, pour l'ensemble de la zone étudiée. Il convient donc de les considérer comme des valeurs représentatives des formations géologiques dans leur ensemble et non d'un site particulier.

Les unités géotechniques et morphologiques définies dans cette étude sont :

UG1 : englobe les terrains cristallins formés par les roches basiques et ultrabasiques qui forment les unités les plus profondes du domaine interne (Sebtides cf. chapitre 2) appelées péridotites de *Beni Bousera* et les terrains à matériel épimétamorphiques des Ghomarides (cf. chapitre 2).

UG2 : englobe les formations métamorphiques constituées essentiellement par des gneiss et des kinzigites. Elles forment une sorte d'auréole avec l'unité de *Beni Bousera*.

UG3 : englobe les terrains alluvionnaires ou colluvionnaires. Elle est constituée par des sables, limons et argiles d'origine fluviatile occupant la plaine alluviale, quelques anciennes terrasses fluviatiles à galets emballés dans une matrice argilo-limoneuse, et des formations de pente, tendres ou faiblement consolidées, hétérogènes et hétérométriques avec une matrice argilo-limoneuse (Quaternaire). Elle inclue également les éboulis et les formations de pente d'âge Quaternaire.

UG4 : englobe les terrains qui constituent la partie la plus externe du domaine interne. C'est une catégorie qui regroupe des formations essentiellement compétentes formées par des dolomies massives à intercalations calcaires, des calcaires massifs à silex, et des calcaires condensés et lacunaires. Cet ensemble définit ce que l'on appelle la dorsale calcaire qui forme les reliefs les plus culminants de la chaîne rifaine et par conséquent de notre secteur d'étude.

UG5 : englobe essentiellement les marnes - de l'unité de Tanger (interne et externe), - de l'unité mésorifaine interne, - de l'unité d'Izarène et celles de l'unité de Loukkos. Toutes ces marnes sont schistosées et diaclasées en conséquence de la tectonique polyphasée de la chaîne rifaine. Elles sont parfois litées avec des passées ou des boules de calcaires argileux ou de silex.

UG6 : est constituée par les flyschs de la nappe de Kétama, constitués essentiellement de dépôts turbiditiques silicoclastiques affectés par un très faible degré métamorphique. On y trouve aussi de fines intercalations marno-calcaire et grésopélitique.

UG7 : est constituée par les terrains des flyschs de la nappe de Tisirène et de Chouamate formés en grande partie par une alternance de bancs décimétriques à métriques de calcaire, grès quartzitiques fins et de inter-lits argileux.

UG8 : englobe essentiellement les grès de Zoumi, les formations de la nappe des grès numidiens, des alternances de grès et conglomérat de l'unité d'Amtrass et celle d'Ouazzane.

La Figure V-2 montre les fréquences des différentes unités géotechniques du secteur d'étude.

L'unité UG5 représentée essentiellement par des marnes occupe à elle seule 35.4 % de la superficie totale de la province de Chefchaouen, ce qui peut être un facteur très favorable pour la genèse d'un grand nombre de mouvements de terrain. L'unité UG8 formée dans sa globalité par des formations gréseuses vient en deuxième lieu avec un pourcentage de 14.34

% de l'ensemble des affleurements. Le reste des unités géotechniques ont des proportions en deçà de 12%, avec en tête l'unité UG7 et UG3 constituées respectivement par des formations de flyschs et les alluvions quaternaires.

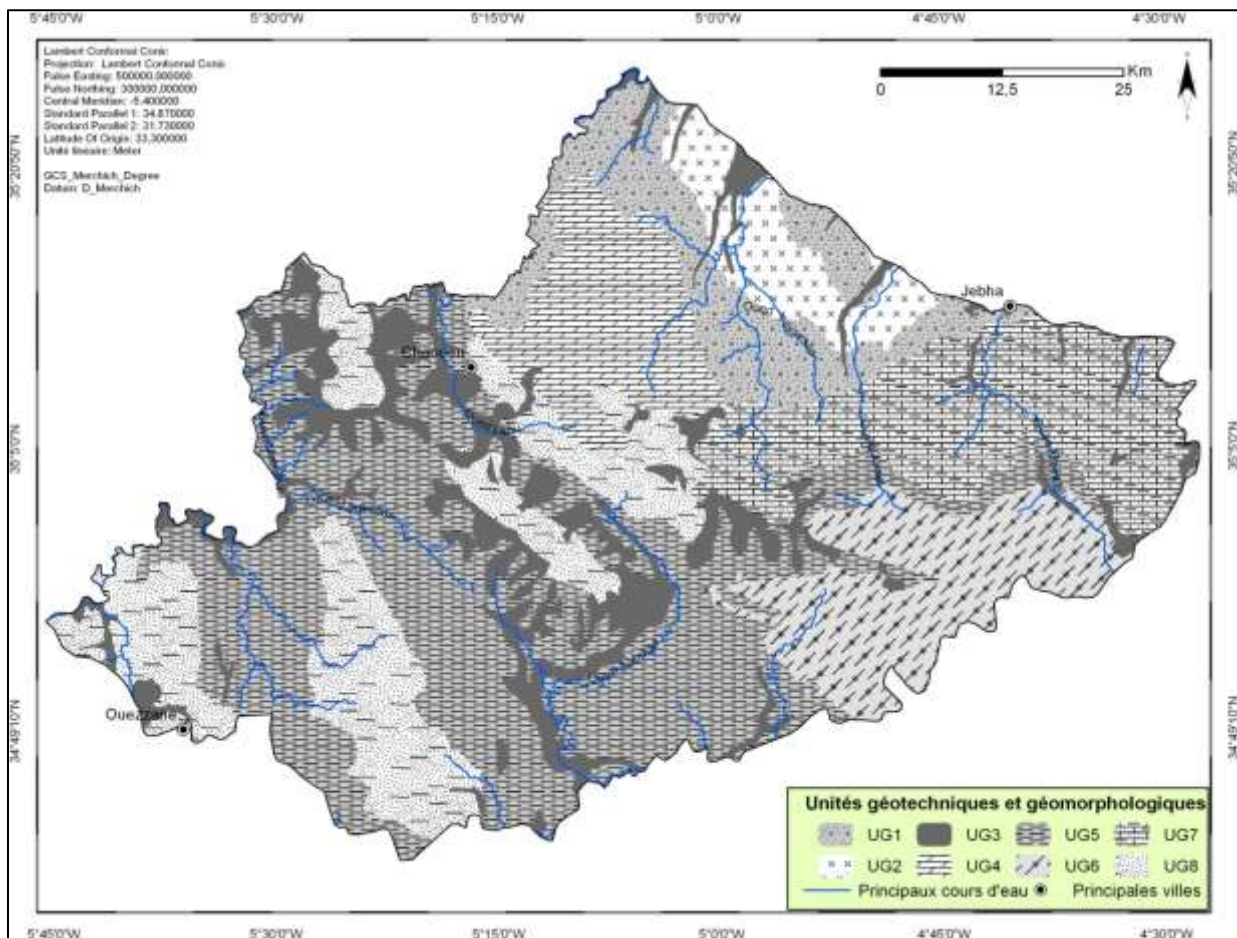


Figure V-1 : Carte du découpage lithologique en unités géotechniques et géomorphologique de la province de Chefchaouen.

Unité Géotechnique	(*)Coefficient de Compressibilité	(*)Pourcentage D'argiles	(**) Coefficient Deval	(**) Indice de Plasticité %
UG1	1.75	45	6.2 - 7	20 à 40
UG2	1.75	45	6.2 - 7	20 à 40
UG3	0.70	15	6.2 – 8.3	35 à 55
UG4	0.12	5	8.1 – 13.2	–
UG5	2.52	60	6.2 - 7	20 à 40
UG6	1.90	45	6.2 - 7	20 à 40
UG7	1.25	25	6.2 – 8.3	35 à 55
UG8	1.12	35	8 - 12	–

Tableau V-1: caractéristiques géotechniques des unités géotechniques de la province de Chefchaouen. *: d'après Chaouki, 1991 ; **: d'après Sossey Alaoui, 2005. La ligne à trame bleue représente l'Unité Géotechnique et Géomorphologique (UG5), représentée essentiellement par des formations marneuses et qui constitue la grande fréquence aux mouvements de terrain.

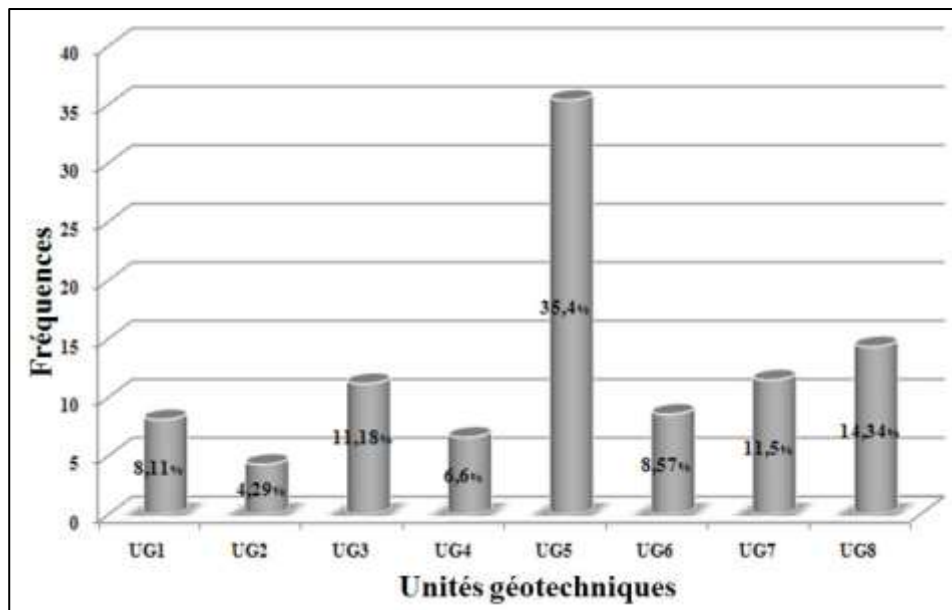


Figure V-2 : Fréquences des différentes unités géotechniques de la province de Chefchaouen. L'UG5 représente les terrains essentiellement marneux, et est responsable de la grande partie de mouvement de terrain.

1.3. Les failles

L'activité tectonique héritée et récente peut intervenir sur un mouvement de terrain dans les zones de terrain déjà fragilisés, soit en pré-conditionnant le matériel soit en tant que déclencheur (*trigger*) lors d'une crise sismique (Compina, 2005). Il est évident que le réseau de fractures favorise l'infiltration de l'eau, entraînant ainsi une augmentation de la pression interstitielle et une réduction de la résistance au cisaillement des sols (Chaouki, 1992 ; El Khatabi, 2001). Une fois que ces derniers arrivent à saturation, le mouvement est déclenché par la surcharge hydraulique avec formation d'un plan de cisaillement profond (El Khatabi, 2001 ; Malet 2003). Dans cette section, nous avons réalisé la carte de fracturation totale de notre secteur d'étude. Pour ce faire, nous avons adopté une cartographie multisources et qui se résume en trois grandes étapes :

- i. La numérisation de toutes les failles bibliographiques, notamment celles en provenance de la carte géologique 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.
- ii. 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. chapitre 3).
- iii. L'obtention des principaux accidents d'origine tectonique à partir de l'imagerie satellitaire Spot XS et Landsat7 ETM+.

1.4. Fracturation issue des données satellitaires

1.4.1. Introduction et données utilisées

Les études de télédétection spatiale passent généralement par trois étapes essentielles qui consistent en : 1° l'acquisition des données, 2° le traitement et l'analyse de ces dernières afin d'en tirer les informations souhaitées, et 3° la présentation de ces informations sous

formats standards, permettant leur diffusion, ou leur intégration le plus souvent dans des SIG, comme c'est le cas pour ce travail. D'amples informations et définitions existent sur les différentes bases physiques de la télédétection spatiale, les applications et méthodes, l'historique, et les notions d'images en télédétection sont accessibles sur le site internet du CCT¹² pour tout détail demandé. Cependant, nous définirons d'une façon succincte les différents types de résolutions en télédétection, et tenterons de les comparer pour les données satellitaires utilisées. Celles-ci se composent de trois images satellitaires (2 images Landsat7 ETM+ et une image Spot XS) à partir desquelles ont été extraites, les parties couvrant notre secteur (Figure V-3).

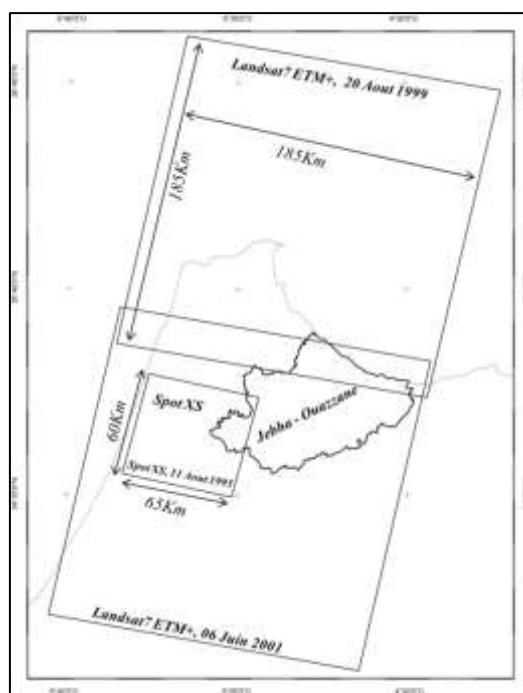


Figure V-3 : Canevas des données satellitaires utilisées

1.4.2. Notion de résolution en télédétection

La résolution est un terme souvent utilisé pour déterminer, soit le nombre de pixels affichables, ou alors la surface au sol représentée par un pixel dans un fichier image. Ces définitions à sens large sont inadéquates quand il s'agit de décrire des données satellitaires. Pour être précis, nous pouvons rappeler que quatre sortes de résolutions peuvent être définies, à savoir :

- i. La résolution spatiale, qui correspond à la taille du plus petit élément de mesure au sol. Elle correspond à la taille du pixel dans le cas d'une image numérique optique (comparable au grain sur une photographie argentique). Cette taille dépend de la distance du capteur à la cible et du nombre de pixels que contiennent ses images. La Figure V-4 montre un exemple de comparaison de la résolution spatiale de deux images utilisées dans cette étude.
- ii. La résolution radiométrique, qui se réfère au rayon d'action dynamique, ou le nombre possible de valeurs dans chaque bande. Et ce, par le nombre de bits par lequel l'énergie enregistrée est répartie dans le fichier image (Figure V-5). Par exemple, des données 8-bits

¹² CCT : Centre Canadien de Télédétection : <http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/>

(les plus courantes pour les images optiques) présentent des données ayant 2^8 valeurs, soit 256 niveaux de brillances allant de 0 à 255.

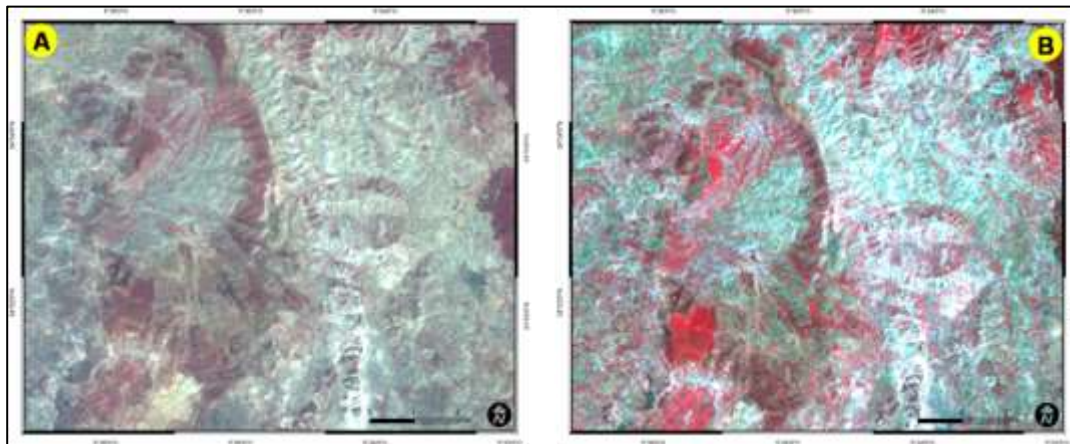


Figure V-4 : Résolutions spatiales de deux images satellitaires. A : 20m, Spot XS (321), et B : 30m, Landsat7 ETM+ (432).

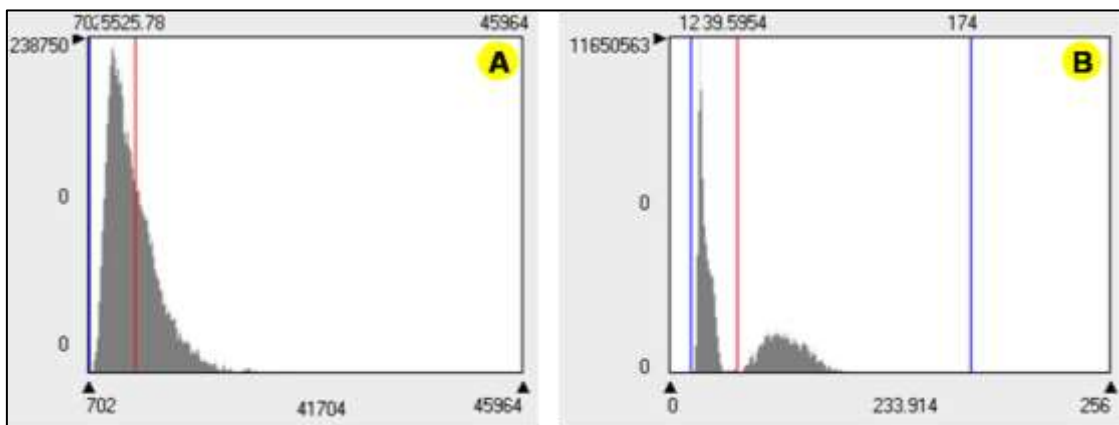


Figure V-5: Exemples de codage des images numériques. A : Codage 16-bit (images Radar et MNT), B : Codage 8-bit (la plus part des images).

iii. La résolution spectrale, qui se rapporte aux intervalles spécifiques des longueurs d'ondes dans le spectre électromagnétique qu'un capteur puisse enregistrer. Plus l'intervalle est large dans le spectre électromagnétique, plus la résolution spectrale est petite et vice-versa (Figure V-6).

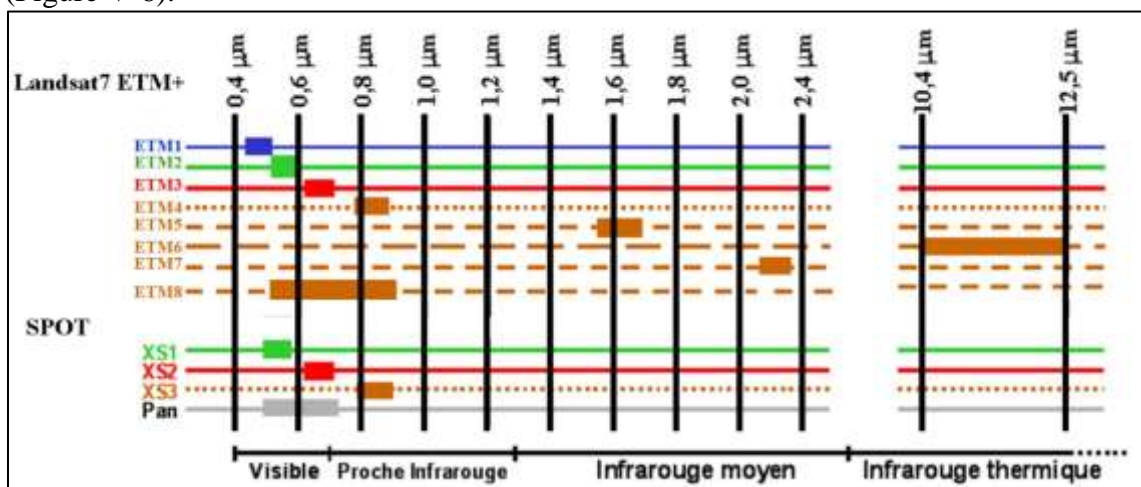


Figure V-6 : Comparaison de la résolution spectrale entre les capteurs Landsat7 ETM+ et SPOT XS, Abdelouafi, 2007, modifiée.

iv. La résolution temporelle, définie la fréquence d'un capteur à obtenir une image d'une région donnée. A titre de comparaison, le satellite Landsat peut prendre des images de la même région tous les 16 jours, alors que le satellite SPOT ne peut le faire que tous les 26 jours.

1.4.3. Méthodologie et principaux traitements utilisés

Le choix de l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour cette étude s'est imposé par le fait que la majeure partie du secteur est difficile d'accès, vu qu'elle est caractérisée par une morphologie très accidentée avec des vallées encaissées. A cela, il faut ajouter l'avantage qu'offre l'aspect synoptique des paysages par télédétection afin de cartographier les structures kilométriques à pluri-kilométriques d'une part. D'autre part, c'est une étape indispensable dans la mesure où la fracturation représentée sur les cartes géologiques n'est pas exhaustive.

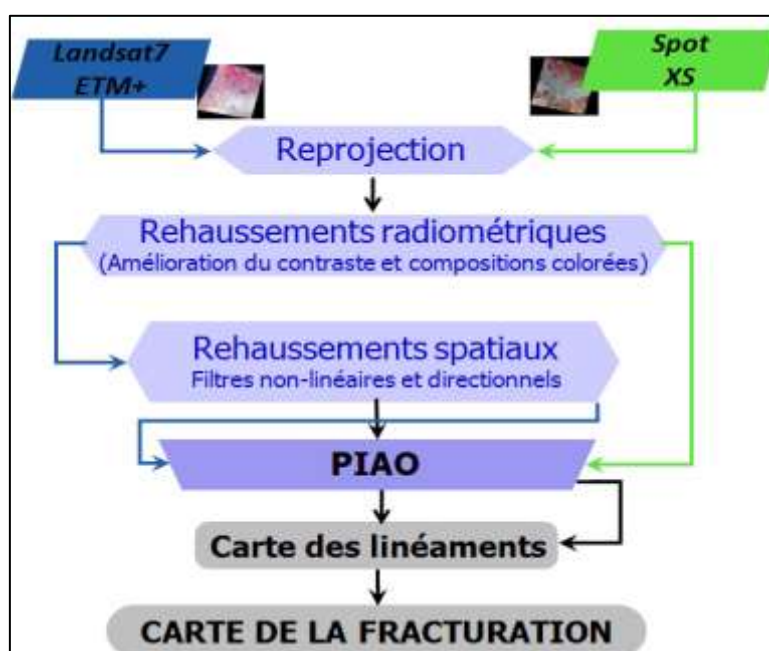


Figure V-6 bis : méthodologie adoptée pour l'extraction de la fracturation à partir des images satellitaires

Les différents traitements utilisés pour extraire l'information géographique concernant la fracturation consistent en : une correction géométrique des images (reprojection), afin de permettre leur superposition sur les autres couches de données, des rehaussements radiométriques pour améliorer la qualité visuelle de nos images et par conséquent faciliter la PIAO¹³, et finalement l'application de plusieurs filtres spatiaux et filtres directionnels pour l'extraction des alignements (Figure V-6 bis). Parmi les filtres utilisés, nous nous sommes basés globalement sur le traitement Crisp (Figure V-7) et Natural Color (Figure V-8) sous Erdas Imagine 9.2, qui nous ont permis d'extraire l'essentiel des linéaments de notre secteur à l'aide de l'imagerie satellitaire.

1.5. Carte de la fracturation issue des données satellitaire

Les résultats des deux traitements ont été rassemblés dans un même fichier de forme (shapfile avec 431 alignements) en les superposant afin de supprimer les alignements qui se dupliquent, et obtenir la carte totale de la fracturation issue des données de la télédétection spatiale

¹³ PIAO : Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur

qui compte 317 alignements (Figure V-9). L'analyse géostatistique des alignements recensés comme c'est montré par la rosace effectuée (Figure V-9), permet de retenir que quatre directions de fracturation se dégagent et qui par ordre d'importance sont : ENE – WSW, NW – SE, N – S et finalement la direction E – W.

1.6. Carte de la fracturation issue de l'analyse morphotectonique

La rareté des terrains récents dans le secteur d'étude constituait un handicap pour mettre en évidence le caractère « néo »tectonique dont la fracturation récente. Pour remédier à ce problème, nous avons fait appel à l'analyse morphotectonique réalisée dans le chapitre III. Elle a été obtenue par l'assemblage de la fracturation issue de l'analyse morphostructurale du MNT, et les anomalies et perturbations du réseau hydrographique du secteur d'étude.

1.7. Carte de la fracturation totale

Elle construite par l'addition de l'ensemble des cartes de fracturation précédemment réalisées, à partir des données de la télédétection spatiale et de l'analyse morphotectonique. La carte de fracturation totale devait subir une dernière vérification qui s'est déroulée en deux temps. Nous avons enlevé les linéaments redondants. Et puis, vu que les linéaments obtenus peuvent correspondre aussi bien à des discontinuités d'origines lithologique, que structurales ou anthropiques (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de transport d'énergie, etc.), nous avons procédé à leur confrontation avec les cartes géologiques existantes, les cartes topographiques...etc. Ensuite, pour la carte de synthèse nous n'avons retenu (Figure IV-10) que les discontinuités interprétables en termes de fracturation.

La carte synthétique (Figure V-10) contient 1151 alignements. Après la dernière étape de vérification 186 alignements ont été éliminés (alignements redondants ou de nature anthropique), et 965 ont été retenus. La longueur maximale, moyenne et minimale de ces alignements est reportée dans la Figure V-10. D'après la carte de fracturation et l'étude géostatistique des longueurs des failles, on peut distinguer deux groupes d'alignements en prenant comme critère la taille (longueur). Il existe des failles à occurrence régionale qui représentent plus de 80% et des alignements à expression locale ; les deux groupes affectent tous les terrains du secteur d'étude. Cependant, l'analyse azimutale de ces alignements permet de déceler trois grandes familles qui selon leur ordre d'importance sont de directions : NE – SW à ENE – WSW, NW – SE, N – S.

- i. Les failles de direction NE – SW à ENE – WSW, parmi les failles les plus importantes, on retrouve celle de Jebha, facile à déceler aussi bien sur l'imagerie Landsat7 ETM+ que Radar. Elle se marque par un trait continu, délimitant deux compartiments à textures différentes : les dolomies massives de la Dorsale au nord et les formations grésopélitiques de la nappe de flyschs de Tisirène au sud. Cette faille se caractérise sur le terrain par un jeu décrochant senestre et un jeu apparent normal (Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003). Le premier jeu (décrochant senestre) est attesté par le développement de crochons cartographiques responsables de la torsion des fronts de chevauchement de la dorsale sur l'Unité de Tanger qui passent successivement de la direction N140 à N110 voir N080-090.

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

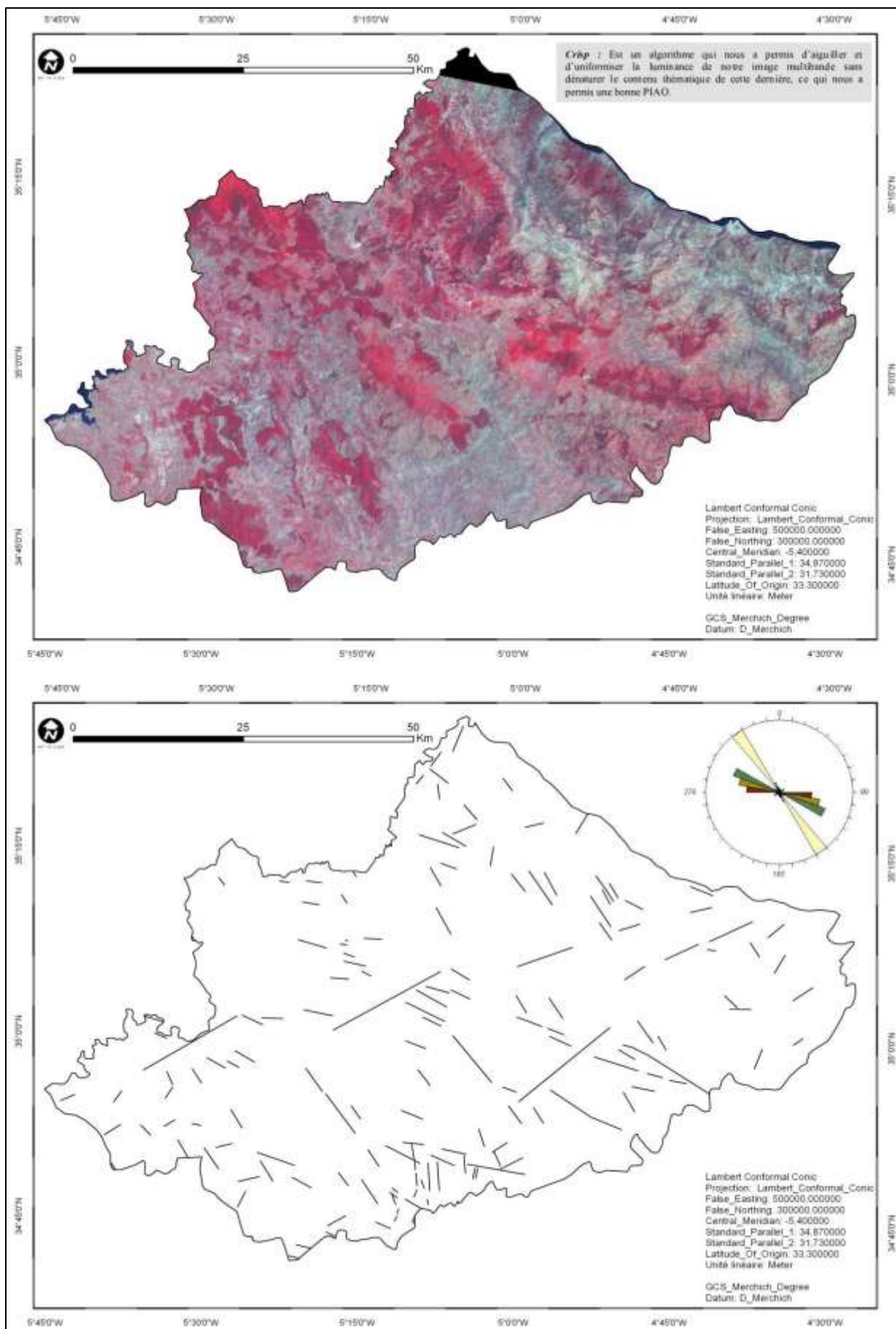


Figure V-7 : Réseau d'alignements (en bas) extrait à l'aide du traitement Crisp (en haut).

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

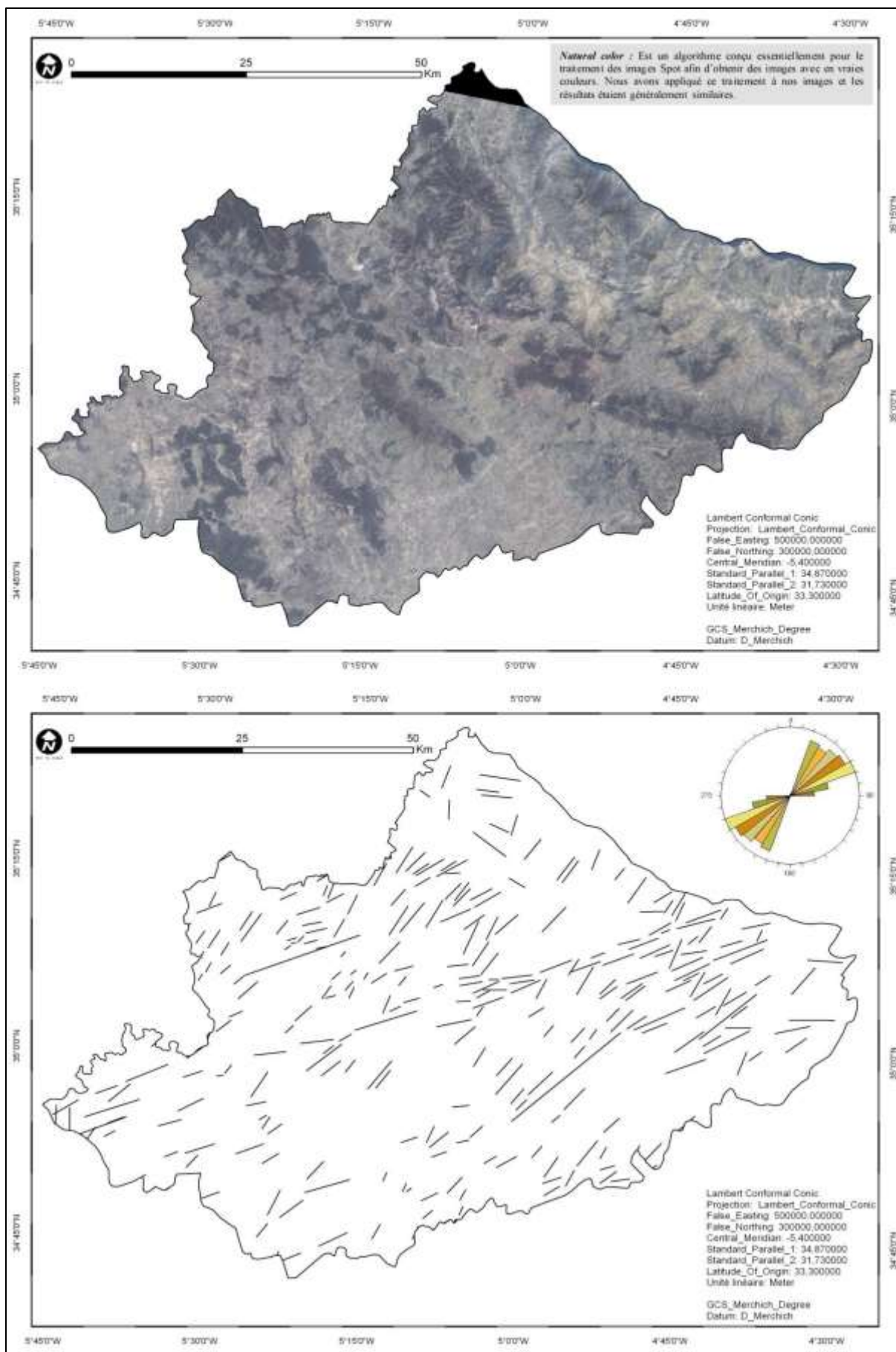


Figure V-8 : Réseau d'alignements (en bas) extrait à l'aide du traitement Natural Color (en haut).

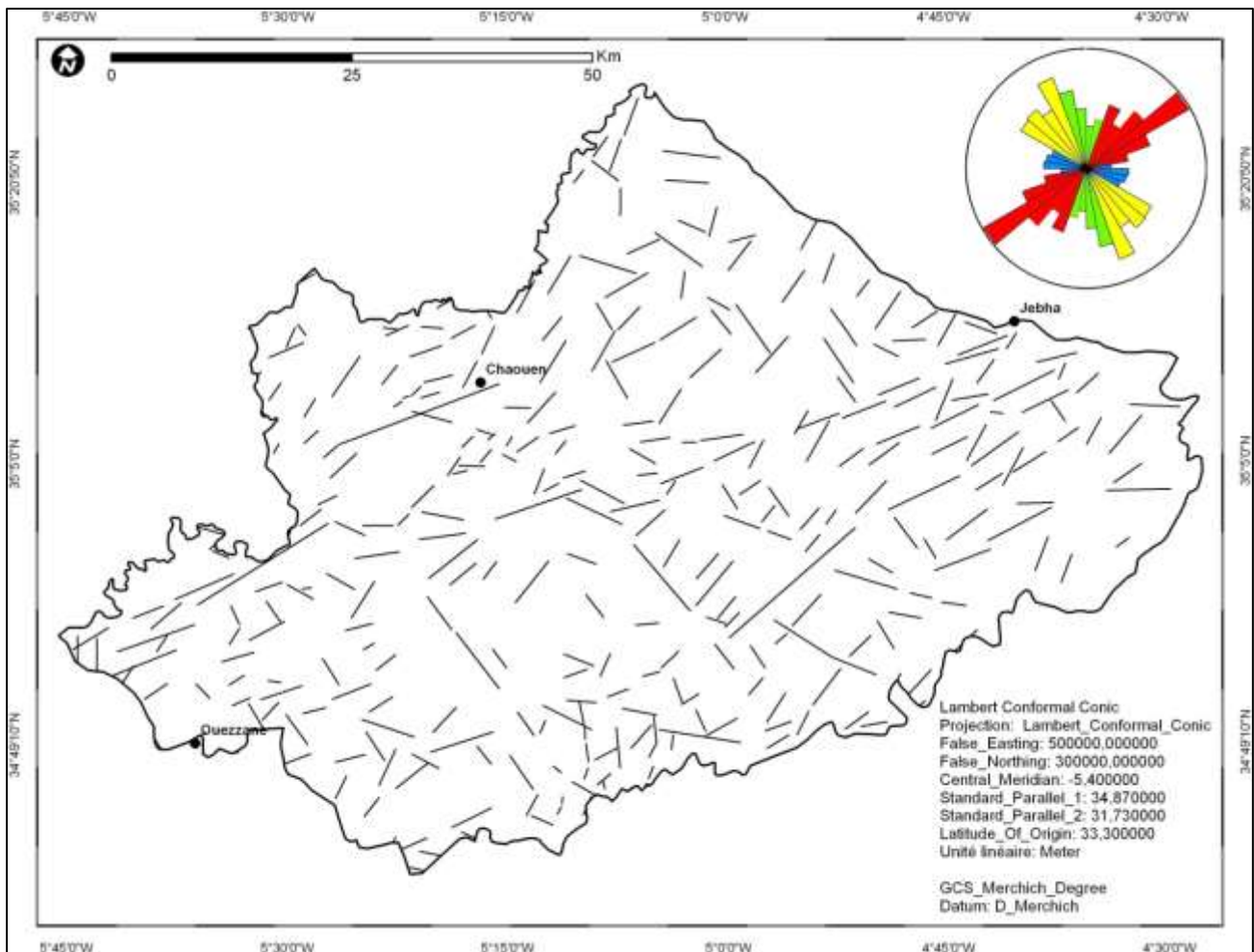


Figure V-9 : Carte composite d'alignements issue des données satellitaire de la de la province de Chefchaouen (Assemblage des résultats de la figure V-7 et 8, plus d'autres traitements).

- i. Les failles de direction NW – SE, se manifestent dans tout le secteur d'étude. Elles se superposent en grande partie avec les principaux fronts de chevauchements mettant en contact les différentes nappes de flyschs. Elles constituent un réseau conjugué à celui du couloir de Jebha et la fracturation qui l'accompagne.
- ii. Le réseau de failles NE – SW à ENE – WSW s'observent généralement d'une façon homogène sur l'ensemble du secteur d'étude en le traversant depuis la côte méditerranéenne jusqu'à sa limite Sud – Ouest au Niveau de la ville d'Ouazzane. C'est un réseau qui s'exprime mieux et avec une densité importante comparé aux autres directions de failles surtout au niveau du couloir de Jebha.
- iii. Les failles de direction N – S, viennent en dernier lieu et repartissent d'une façon très inégale sur tout le secteur d'étude.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

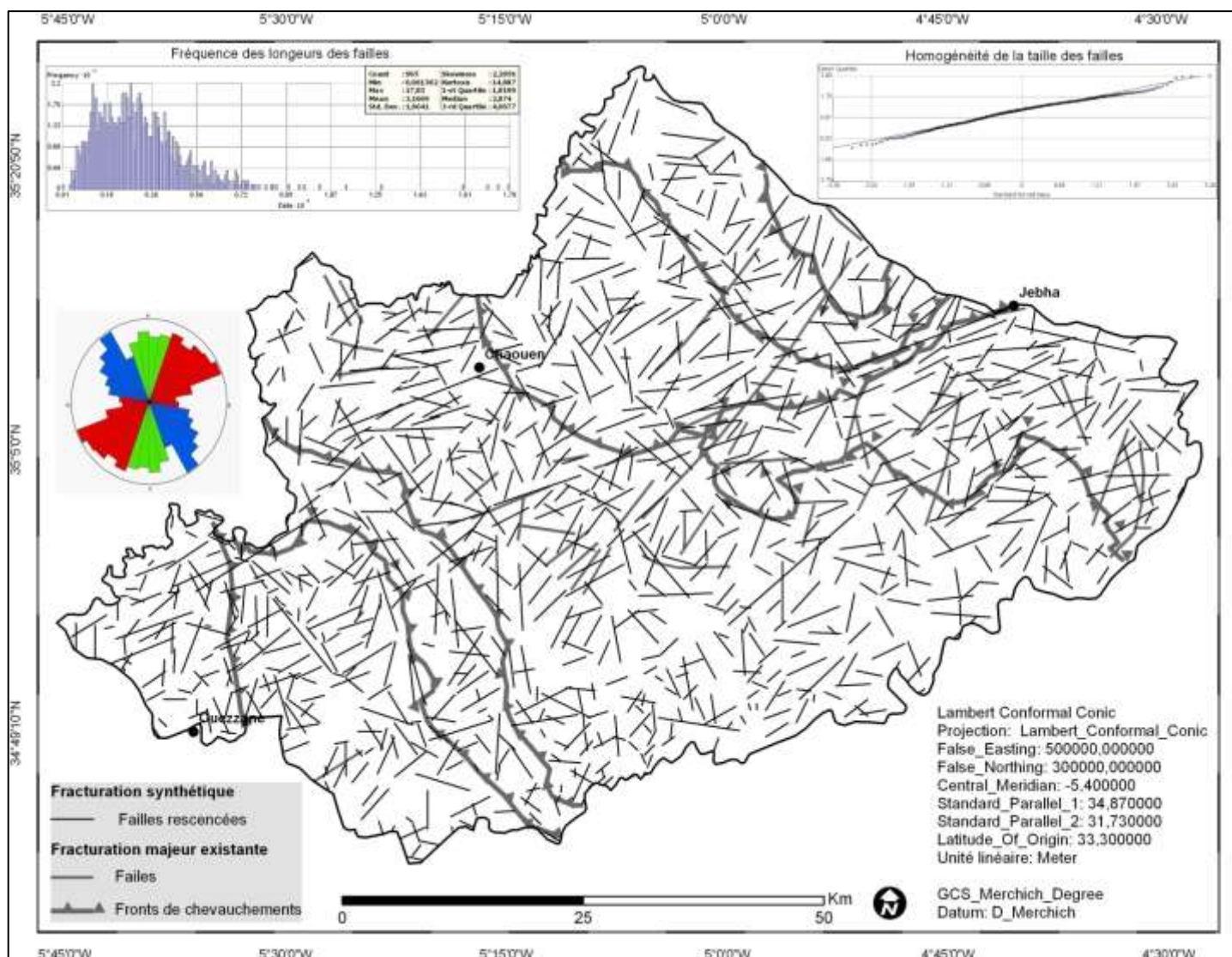


Figure V-10 : Carte synthétique de la fracturation de la province de Chefchaouen, issue de l'assemblage de l'analyse morphostructurale du MNT, l'analyse des anomalies de drainage, traitements satellitaires, et données bibliographiques.

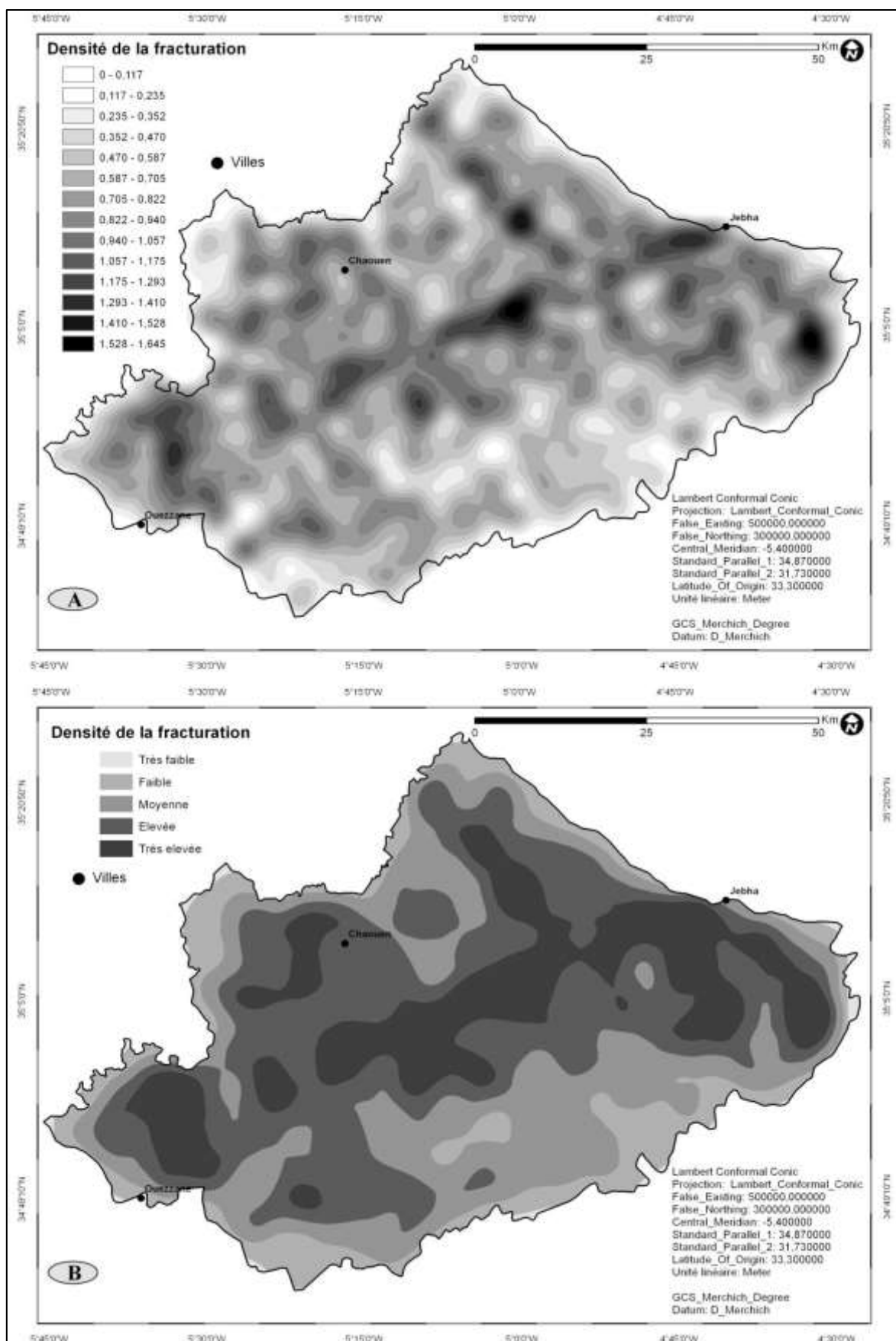


Figure V-11 : Cartes de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen. A : Carte initiale avec 14 classes obtenues automatiquement ; B : Carte reclassifiée en 5 classes (très faible, faible, moyenne, élevée, et très élevée).

1.8. Distance par rapport aux failles ou densité de failles ?

Les failles constituent un des paramètres cruciaux à prendre en considération pour toute étude de susceptibilité aux mouvements de terrain. Ce paramètre est intégré la plus part du temps dans les études en tenant compte de la distance par rapport aux failles (Regmi et al., 2010 ; Pradhan, 2010 ; Pradhan et Lee, 2010 ; Yilmaz, 2009a ; Yilmaz, 2009b Chang et al., 2007 ; Greco et al., 2007 ; Van Den Eeckhaut et al., 2006 ; Yesilnacar et al., 2005 ; ...etc). Opter pour un tel choix, est surtout une façon indirecte d'inclure l'effet de la sismicité d'une région donnée dans l'analyse de la susceptibilité ou de l'aléa aux mouvements de terrain. Cela, se fait par l'établissement des zones tampons (*buffering areas*) de part et d'autre des failles du secteur, ce qui revient à la création de zones à égal comportement sismique sans réellement intégrer le paramètre sismicité. Cependant, dans notre travail, le facteur « failles » sera incorporé en se basant sur la densité de la fracturation. Ce choix se justifie d'une part par le fait, que parmi toute la fracturation du secteur, seul l'accident majeur de Jebha pourrait avoir un comportement sismique, sans pour autant écarter la possibilité que des failles aveugles ou qui affleurent en surface mais moins importantes puissent exister ; la densité des failles est généralement proportionnelle au degré d'infiltration et de la circulation des eaux. D'autre part, le paramètre sismicité sera abordé isolément et en détail plus loin dans ce même chapitre.

1.8.1. Carte de densité des failles

La carte de fracturation totale du secteur d'étude, a été le document de base pour la réalisation de la carte de densité des failles. Pour ce faire, nous avons eu recours au module *Spatial Analyst Tools* d'ArcGis 10, 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 (Km²). Dans notre cas, la carte de densité des failles a tenu compte aussi bien de la longueur cumulée des failles, que de la présence des nœuds tectoniques (croisement des failles). Cette carte a été élaborée selon 5 classes de densité (Figure V-11B) par rééchantillonnage et simplification de la première carte obtenue automatiquement (Figure V-11A).

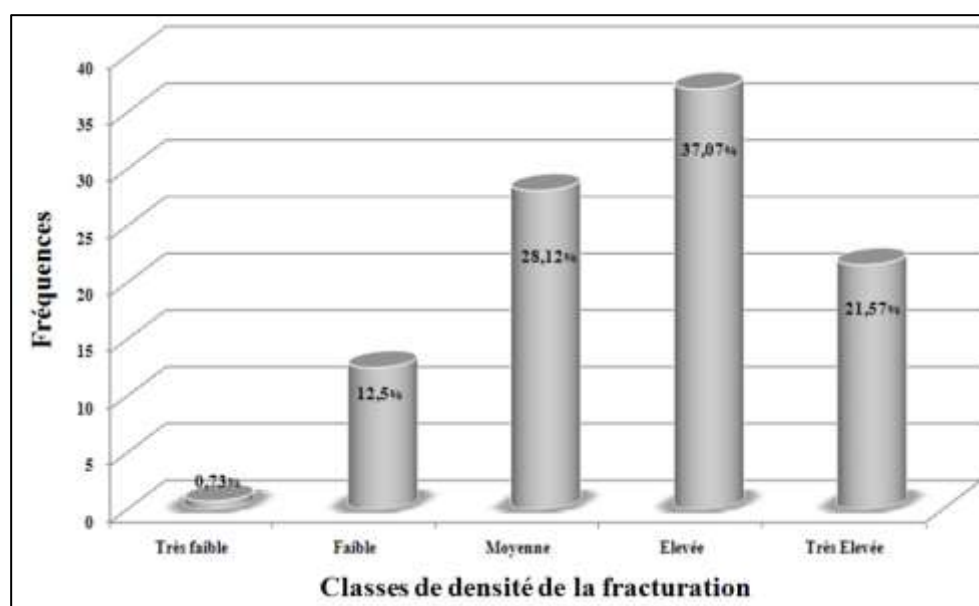


Figure V-11bis : Fréquences des différentes classes de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen.

Cette dernière, est rendue plus lisible par reclassification des 14 classes en 5 classes de densité, à savoir de très faible à très élevée. La Figure V-11 bis montre les fréquences relatives de chaque classe de densité de failles. Les deux classes à densité élevée et très élevée couvrent plus de la moitié (68%) de la superficie totale du secteur d'étude. Elles couvrent les régions de l'accident majeur de Jebha et tout son couloir faillé, ainsi que les zones traversées par les principaux fronts de chevauchement. La relation entre la densité des failles et les mouvements de terrain, sera abordée de la conclusion de cette section (Cf. paragraphe 1.9).

La densité moyenne présente une fréquence de 28.12%, et se présente essentiellement dans le coin Sud – Est du secteur d'étude. La classe de faible densité constitue 12.5% de la fréquence totale, et se situe au niveau des limites du secteur. Quant à la dernière classe (très faible), elle ne dépasse guère 1% de la superficie totale. Il ne faut pas perdre de vue que ces données ne couvrent que les grands accidents plurimétriques et doivent être complétés par une analyse de détail du diaclasage associé pour pouvoir être corrélés avec le pouvoir réel de l'infiltration dans les formations sensibles.

1.8.2. Rôle des diaclases

Les diaclases ont une grande incidence sur la stabilité des versants. En effet, les diaclases favorisent la circulation des eaux. Différents auteurs ([Radbruch-Hall, 1976](#) ; [Varnes, 1984](#)) ont noté que les zones à grand degré de fracturation et de cisaillement, sont généralement caractérisées par une grande densité de diaclases. Nous pensons donc que l'existence d'une grande densité de fracturation (longueur et croisement) est proportionnelle au degré de diaclasage d'un secteur donné. Cela est d'autant plus important dans un domaine en surrection comme le nôtre (voir chapitre 2 et 3). Celles-ci en pénétrant dans la roche, peuvent aussi agir directement en réduisant la résistance au cisaillement (lubrification), en disjoignant les blocs en cas de gel ou, indirectement, sur l'altération de la roche.

1.8.3. Pendage des strates

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.

1.9. Discussion : relation des facteurs géologiques avec les MT

Afin d'examiner la relation entre les mouvements de terrain inventoriés de la province de Chefchaouen et les facteurs géologiques sélectionnés (lithologie et fracturation), nous avons procédé en une analyse de la distribution spatiale des phénomènes par leur intersection et superposition avec les paramètres géologiques, ce qui correspond à une analyse par corrélation statistique. Celle-ci s'est déroulée en deux étapes. Une analyse générale des fréquences des mouvements de terrain, tous types confondus, en fonction du paramètre choisi, ce qui conduit à déceler une tendance générale Paramètre de contrôle – Mouvements, en d'autres terme connaître l'incidence générale du paramètre choisi sur les mouvements. Ensuite, une analyse de fréquences de chaque type de mouvement de terrain (variable à modéliser) au niveau de chaque classe de la variable prédictive utilisée (paramètre conditionnant) ce qui permet d'aborder la relation Mouvement – Paramètre en détail et

comprendre les spécificités de chaque classe et son impact sur la distribution de chaque type des phénomènes inventoriés.

1.9.1. Relation avec les unités géotechniques et géomorphologiques

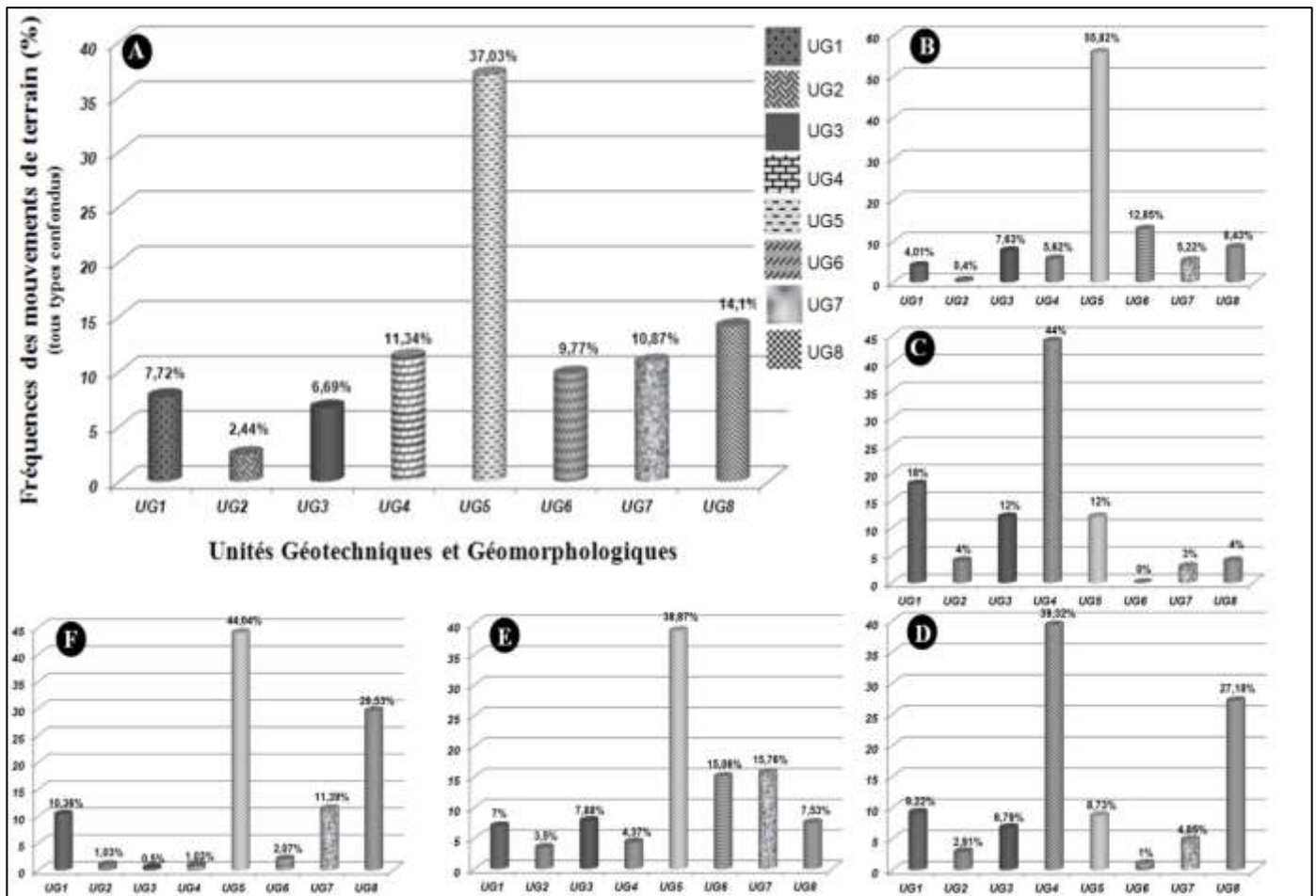


Figure V-12 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque unité géotechnique et géomorphologique (UG) de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par UG ; C : Fréquences des coulées de débris par UG ; D : Fréquences des écroulements par UG ; E : Fréquences des sapements par UG ; F : Fréquences des badlands par UG.

La figure V-12A illustre les caractéristiques (fréquences) générales des mouvements de terrain au niveau de chaque unité géotechnique et géomorphologique de la province de Chefchaouen. Elle montre que l'UG5 contrôle en premier lieu et fortement la distribution des phénomènes où elle abrite à elle seule 37% de ces derniers. Quand on vérifie la validité de la même constatation dans le détail, c'est-à-dire pour chaque type de mouvements séparément, on trouve qu'elle est confirmée pour les glissements, les sapements et les badlands respectivement (Figure V-12B, E et F). Quant aux coulées de débris et les écroulements, leur distribution s'avère être intimement liée à l'UG4.

La figure V-13 illustre l'abondance spécifique de chaque type de mouvement par classe des unités géotechniques et géomorphologiques, en permettant d'identifier la fréquence d'occurrence de chacune de famille de la variable à modéliser dans chacune des classes de la variable prédictive. Il en ressort que, les glissements, les sapements, et les badlands sont omniprésents dans toutes les unités, mais avec des fréquences très variables. Les sapements

constituent la première grande fréquence qui avoisine ou dépassent largement les 40% (Figure V-13B, C, E, F, G, et H). Ces derniers, sont suivis par les glissements avec généralement des fréquences de l'ordre de 20%, avec des maximums au niveau de l'UG1 (20.2%), l'UG3 (22.35%), l'UG5 (29.57%), et l'UG6 (25.8%) (Figure V-13A, C, E, et F). Les badlands, malgré leur omniprésence dans toutes les unités, ils ne se prolifèrent d'une façon significative que sur l'UG1, l'UG5, et l'UG8 où ils atteignent 31.84%. Les coulées de débris et les écroulements sont peu présents voir absents dans la majorité des unités, mais se rencontrent essentiellement sur l'UG4 et l'UG8 où respectivement 56.25% et 31.28% environ de la totalité des phénomènes sur ces deux unités est représentée par les écroulements, alors que les coulées de débris ne dépassent guère 15.27% (le maximum) au niveau de la UG4.

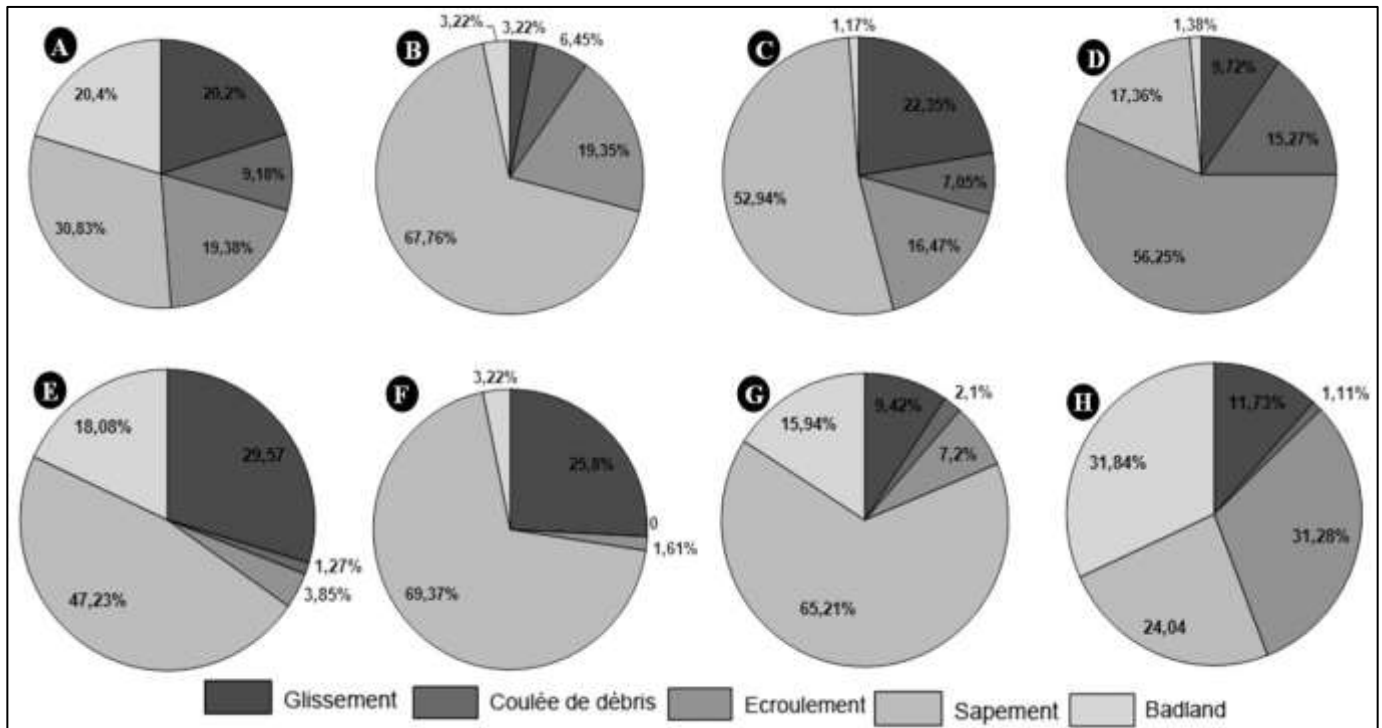


Figure V-13 : Fréquences de chaque type de mouvement de terrain par unité géotechnique et géomorphologique : A : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG1 ; B : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG2 ; C : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG3 ; D : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG4 ; E : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG5 ; F : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG6 ; G : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG7 ; H : Fréquences des différents types des mouvements de terrain dans la UG8.

1.9.2. Relation avec la fracturation

La relation entre la fracturation (densité) et les mouvements de terrain est illustrée par la figure V-14, où il très clair que, quel que soit leur type, les MT deviennent de plus en plus abondants avec l'augmentation de la densité de la fracturation. Le même constat est aussi valide, que ce soit pour tous les phénomènes du secteur (tous types confondus) (Figure V-14A), ou pour chaque type étudié isolément (Figure V-14B, C, D, E, et F), La fréquence des mouvements augmente progressivement avec l'augmentation de la densité de la fracturation jusqu'à la classe à densité élevée, avec des valeurs de l'ordre de 50% de la totalité des phénomènes. Par comparaison, la fréquence diminue relativement au niveau de la classe à

densité très élevée de la fracturation, seulement représentée sur superficie assez réduite de notre secteur. Toute la figure V-14, montre aussi qu'environ 90% voir plus de la totalité des phénomènes (tous types confondus ou séparément) se localisent au niveau des trois dernières classes de la fracturation, de moyenne à très élevée.

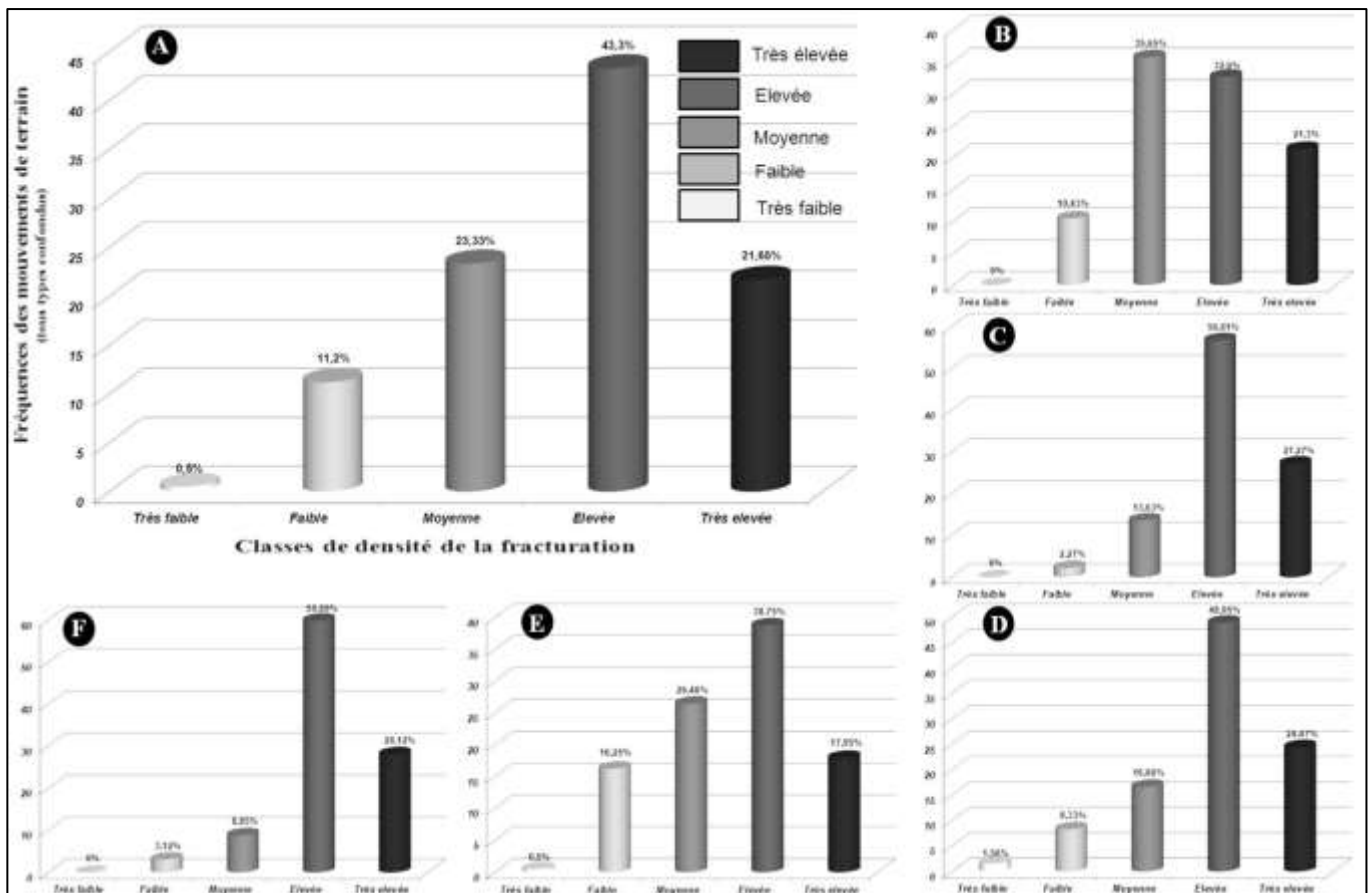


Figure V-14 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements en fonction des classes de densité de la fracturation ; C : Fréquences des coulées de débris en fonction des classes de densité de la fracturation ; D : Fréquences des écroulements en fonction des classes de densité de la fracturation ; E : Fréquences des sapements en fonction des classes de densité de la fracturation ; F : Fréquences des badlands en fonction des classes de densité de la fracturation.

Cependant, et en se référant aux fréquences spécifiques de chaque catégorie de mouvements de terrain au niveau de chaque classe de densité de la fracturation (Figure V-15) on note ce qui suit :

- Les sapements et les badlands sont les phénomènes qui se rencontrent au niveau de toutes les classes de densité de fracturation et ce avec des fréquences très significatives, notamment pour les sapements avec des valeurs comprises entre 36.96% et 64.66%, en relation avec la quasi-totalité des unités géotechniques et géomorphologiques à l'exception de celles dominées par les massifs rocheux (calcaires, quartzites, et grès) les **UG4** et **UG8**.
- Les sapements et les badlands, semblent ne pas être contrôlés par la fracturation, puisqu'ils sont les seuls catégories à rencontrer au niveau de la classe à très faible

densité de fracturation, mais beaucoup par la nature des terrains comme nous venons de l'évoquer.

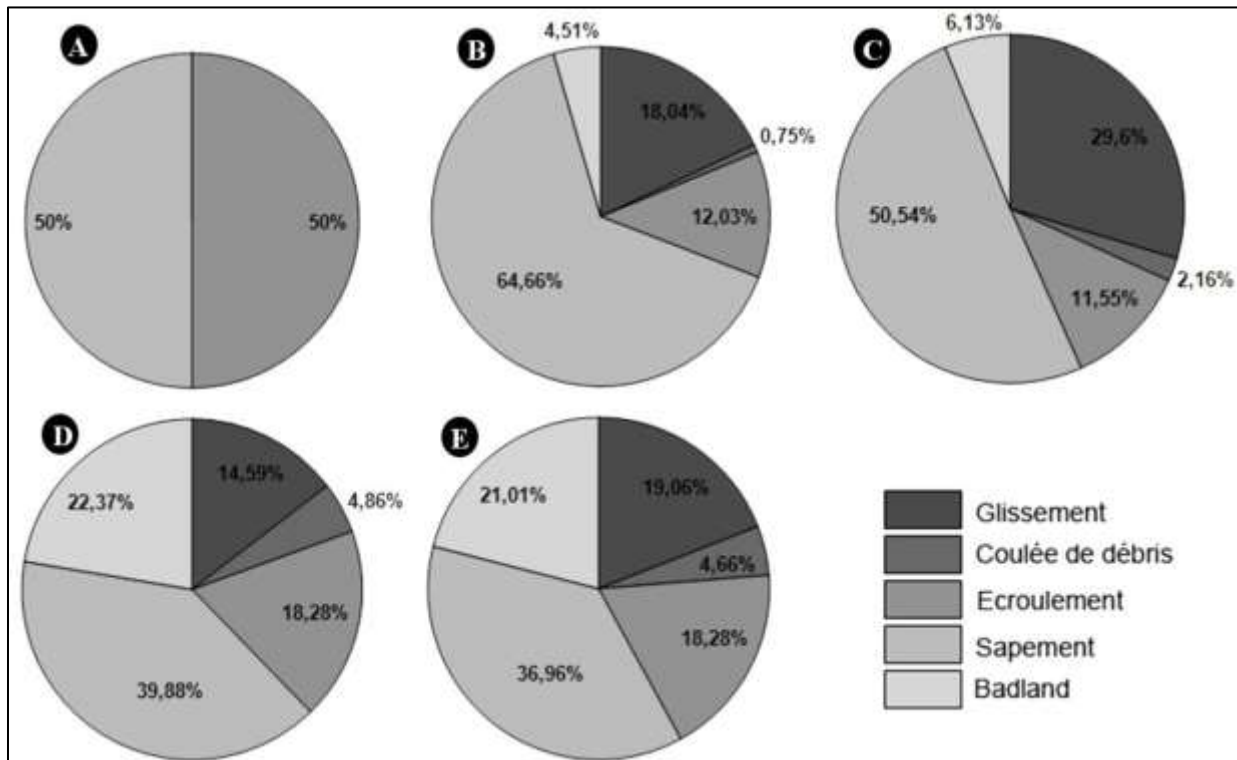


Figure V-15 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain au niveau de chaque classe de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen; A : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe à très faible densité de fracturation ; B : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe à faible densité de fracturation; C : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe à moyenne densité de fracturation; D : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de densité de fracturation élevée ; E : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de densité de fracturation très élevée.

- Il faut retenir que les badlands et les sapements se comportent indépendamment de la fracturation, ce qui est normal, vu les parties des versant affectées par ces phénomènes représentées soit par la tranche superficielle ou le pied de versant. Cela n'écarte pas la possibilité que les badlands et les sapements s'intensifient en présence d'une importante fracturation.
- La fréquence des coulées de débris croît progressivement avec l'augmentation de la densité de la fracturation. Cette fréquence démarre avec 0.75% au niveau de la classe à faible densité pour atteindre les environs de 5% pour les classes à densité forte et très forte de fracturation, en relation avec les **UG4** et **UG8** qui constituent la condition sinéquanone pour leur genèse.
- Les glissements et les écroulements ont des fréquences assez comparables dans toutes les classes de densité de la fracturation, avec 14~30% pour les glissements en relation avec toutes les **UG**, et 11~18% pour les écroulements notamment en relation avec **UG4** et **UG8**.

Pour conclure, hormis les badlands, tous les autres phénomènes semble être directement tributaire du degré de la fracturation et de la nature des terrains, notamment les coulées de débris qui évoluent très sensiblement par rapport à ces deux paramètres clefs.

2. La variable : Sismicité

2.1. Introduction

Le Maroc est situé en zone de collision, là où les deux plaques continentales Afrique-Europe se déplacent l'une de l'autre. Cette position particulière du Maroc se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète la poursuite de la convergence entre ces deux plaques lithosphériques, dont les contraintes sont principalement absorbées par la chaîne atlasique et le Rif. En cas de séisme, il se produit une émission d'ondes sismiques ou ondes élastiques de deux types qui se propagent dans le sol : les ondes de volume dites ondes longitudinales (P ; compression) et transversales (S ; cisaillement) et les ondes de surface dites ondes de Love (L ; cisaillement superficiel complexe) et de Rayleigh (R ; cisaillement superficiel péristaltique). Ces ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire (Parise et Jibson, 2000 ; Durville et Sève, 1996). Celle-ci intervient dans la modification du rapport entre forces stabilisatrices et forces déstabilisatrices générant des mouvements de terrain. Les déstabilisations dues aux séismes peuvent se manifester de différentes façons. Elles peuvent conduire instantanément à des mouvements de versant, et d'importantes dégradations des infrastructures à cause de la thixotropie des sols. Cette déstabilisation peut aussi avoir des effets à plus long terme, par ouverture du réseau de diaclase des roches (ébranlement) et la diminution de leur résistance mécanique. De plus, les fissures agrandies tendent à plus long terme à accroître l'infiltration de l'eau dans ces dernières, à favoriser l'éclatement des matériaux par gel-dégel et, ainsi aboutir à un mouvement de terrain. Cependant, dans les zones sismogènes d'après (Keefer 2002 ; Keefer 1984, ...etc) l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain par les séismes est basée essentiellement sur l'intensité ou la magnitude du séisme et sur la proximité des épicentres ou des accidents actifs.

2.2. Le réseau télémétré Marocain

Le réseau sismologique marocain permet l'acquisition en temps réel de l'activité sismique sur le territoire national, et son pourtour. Ce réseau est installé par le Laboratoire d'Astrophysique et de Géophysique du Centre National de Planification et de Coordination de la Recherche Scientifique et Technique. Vers la fin des années 60, seules quatre stations sismiques étaient présentes ; elles seront complétées vers le milieu des années 70 (<http://sismo-lag.cnrst.ma>) par 15 stations analogiques, rendues rapidement désuètes par les besoins de l'évaluation et de la gestion du risque sismique. Un remplacement par un autre réseau plus performant a été donc effectué dès le milieu des années 80. Ce réseau basé sur une nouvelle génération d'instruments répond aux exigences d'une surveillance sismique du territoire national en temps réel, et permet des traitements très étendus bénéficiant des possibilités considérables de l'enregistrement digital. Le Réseau Sismologique National, actuellement présent au niveau des régions sismiquement actives (Figure V-16), et est constitué de plusieurs unités du Centre National de la Recherche Scientifique et Technique.

2.3. Sismicité historique instrumentale

A travers le passé, le Maroc n'a pas été épargné par des séismes destructeurs, mais à une fréquence moindre comparée à celle des autres pays du pourtour Méditerranéen. Les données de la sismicité historiques établies pour le XIX^e et le XX^e siècle témoignent du caractère sismique faible à moyen du secteur étudié, bien qu'il fait partie du Maroc Nord – Occidental, qui lui a été, affecté par d'importants tremblements de terre (Ramdani, 1991 ; El Mrabet, 1991). A titre d'exemple, le séisme majeur du premier décembre 1755 dit « de Lisbonne », a causé de nombreux dégâts à l'intérieur du pays.

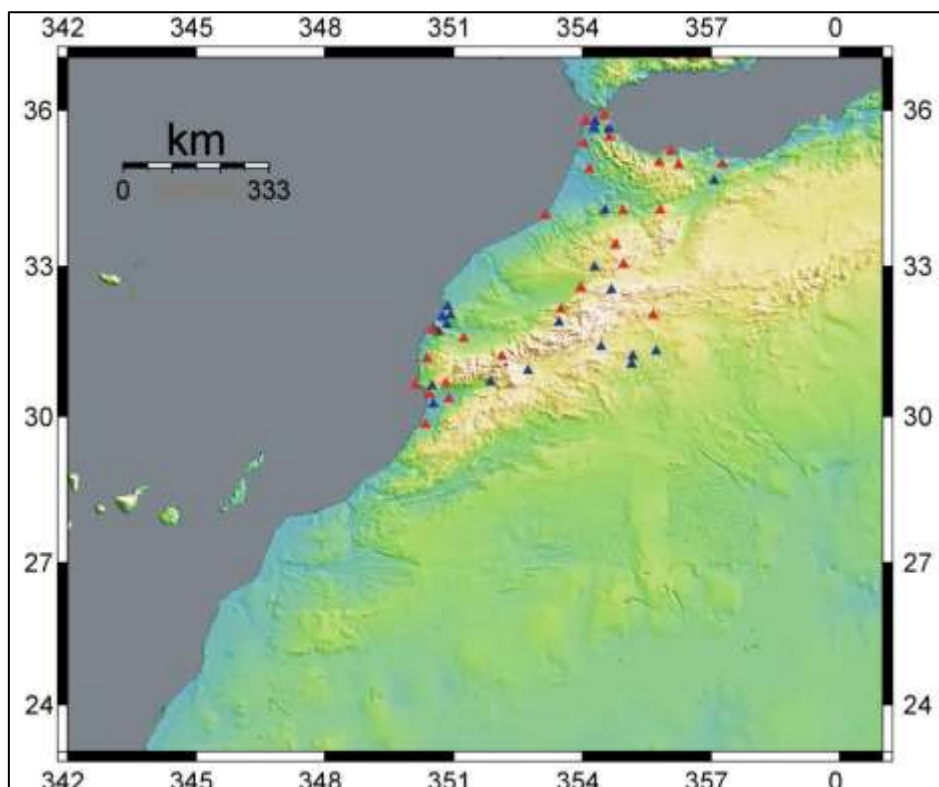


Figure V-16 : Réseau sismique téléométré du Maroc (source : <http://sismo-lag.cnrst.ma/>) (En rouge, les stations en cours de configuration)

La sismicité du secteur d'étude s'intègre dans un cadre plus large qui concerne toute la région comprise entre l'Algérie (à l'Est) et l'ouest du Cap St Vincent (à l'ouest, Portugal). La complexité des données géophysiques et géologiques de cette région rend difficile la réalisation d'une interprétation géodynamique simple. Plusieurs études ont été réalisées dans le but de comprendre la sismicité de la région Açores – Gibraltar. Les études antérieures ont démontré qu'une limite bien définie existe en domaine océanique entre les plaques Europe et Afrique (Udias et al., 1976 ; Cherkaoui, 1991). Cela dit, la sismicité commence à devenir diffuse au niveau du domaine continental. Cependant, plusieurs modèles ont tenté d'expliquer la sismicité dans la Méditerranée occidentale, qui est décrite comme étant un très grand bassin marginal créé suite à de subductions lithosphériques au niveau de l'Afrique du Nord, de la Sicile et vers les Apennins (Tapponier, 1977 ; Le Gall, 1997 ...). 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 Mattauer, 1973) envisagent plutôt l'existence d'une sous plaque d'Alboran coincée entre le Maroc et l'Espagne. Pour eux, elle est responsable de la déformation continue de la région dans le cadre du rapprochement des deux plaques. En revanche, tous les auteurs précédents sont d'accord que les principales zones sismiques de la

région Açores - Alboran sont au nombre de deux, à savoir : le SW du Cap St Vincent, et le golf de Cadix.

Le catalogue des séismes du territoire Marocain et ses régions limitrophes pour la période allant de 1901 à 1984 compte un total de 4618 événements (Cherkaoui, 1988). L'analyse de ce fichier montre que la région rifaine, est le siège d'une activité microsismique récurrente avec des magnitudes comprises entre 2.1 et 5 et des profondeurs allant de 0,2 à 103 km. Cela explique le caractère superficiel de la plupart des séismes, dont la majorité est localisée à une profondeur inférieure à 70 Km. En faisant un focus sur la province de Chefchaouen et ses alentours, des 4618 séismes du Maroc nous avons recensé 121 séismes pour la période 1901 – 1984 (Tableau annexe1). Pour la période 1985 – 2008, le catalogue des séismes du Maroc et des régions limitrophes, est en cours de préparation (Cherkaoui, à paraître). Après son analyse détaillée, nous en avons extrait 365 pour cette période (Tableau, annexe2). Cette activité, qualifiée de micro-sismique peut être directement attribuée à la faille de Jebha. La Figure V-17, montre la distribution spatiale de la totalité des séismes extraits des deux catalogues, pour la province de Chefchaouen et ses alentours entre 1901 et 2008.

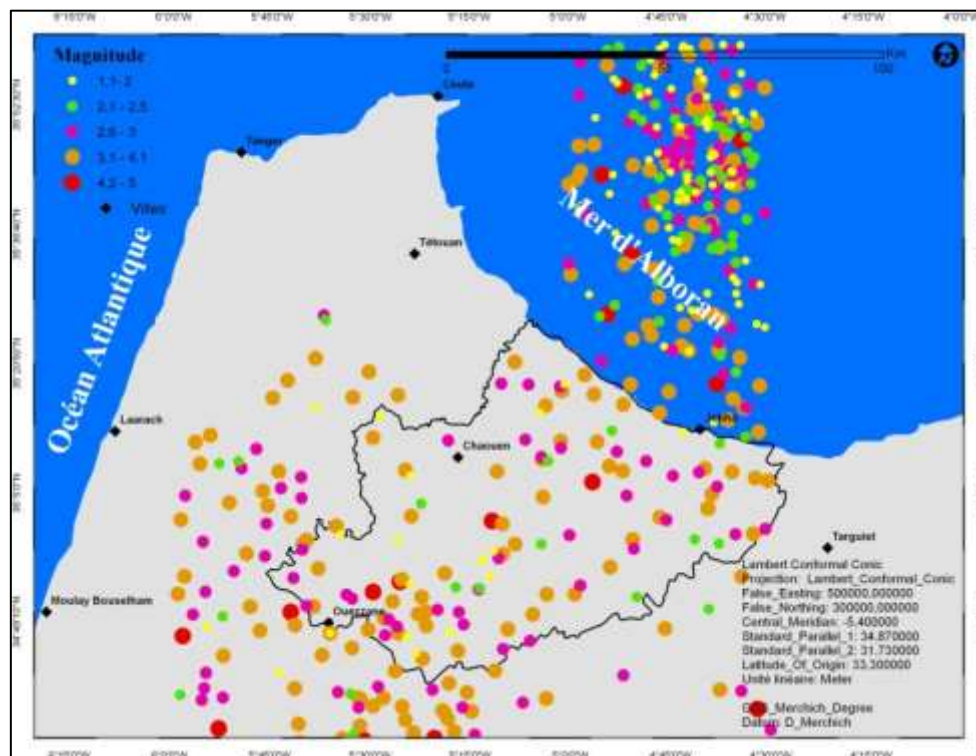


Figure V-17 : Distribution spatiale des séismes (1901 – 2008) dans la province de Chefchaouen et son pourtour.

2.4. Sismicité actuelle (2009 – 2011)

Au moment où je rédige ce paragraphe, un séisme d'une magnitude de 3.7, localisé à 35°13'68"N et 4°7'172"W, a eu lieu à quelques kilomètres au Sud – Ouest de la ville de Jebha, le 1/03/2011 exactement à 10h 26mn 25,53sec, témoignant de l'activité perpétuelle de cet accident majeur. Mis à part ce dernier, l'activité sismique de la région d'étude et ses alentours est assez particulière durant ces trois dernières années. L'analyse de la sismicité de cette période est basée sur les données fournies par Pr. Cherkaoui.

i. En 2009 (Figure V-18), l'activité sismique du secteur se définit comme étant faible du côté de la région de Jebha, puisque la plus part des séismes (plus de 40) ont été enregistrés dans la mer d'Alboran avec des magnitudes relativement négligeables. En revanche, dans la partie SW du secteur (Ouazzane), l'activité sismique a été relativement plus importante avec des magnitudes de l'ordre de 4.8.

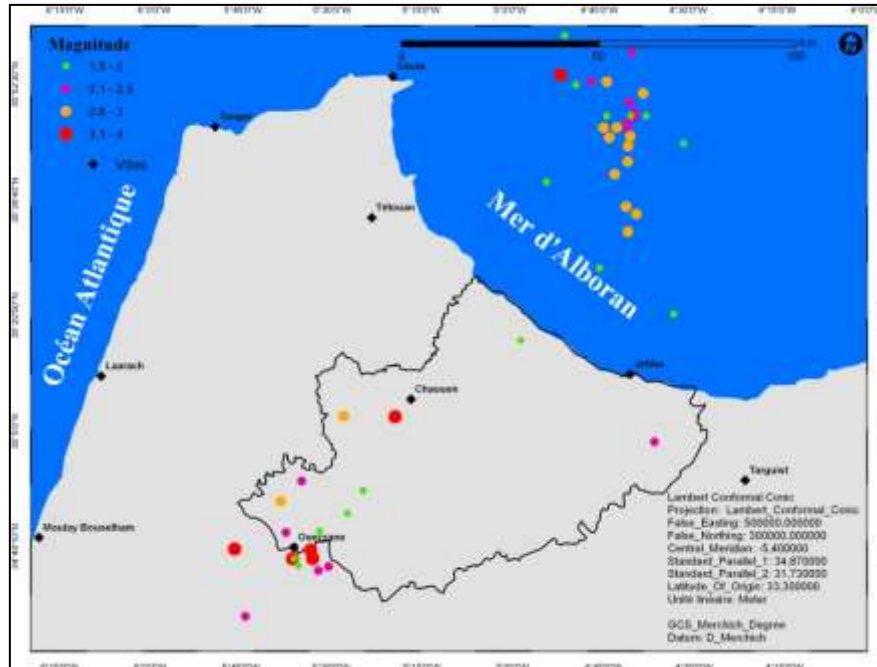


Figure V-18 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2009 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.

ii. En 2010 (Figure V-19), l'activité sismique a été relativement importante comparé à celle de l'année dernière, où une trentaine de séismes en plus qui a été enregistrée.

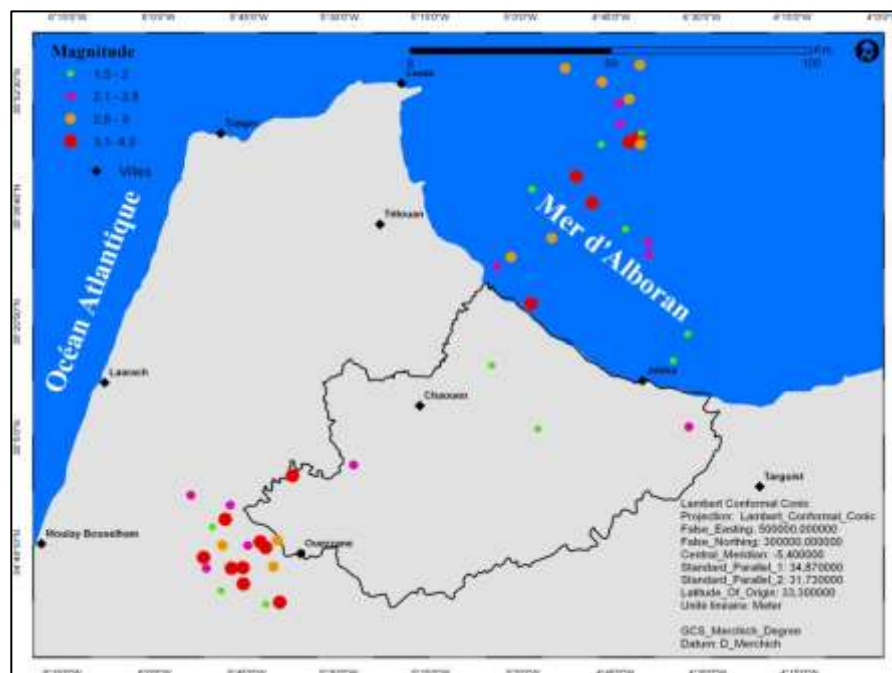


Figure V-19 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2010 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.

L'examen du catalogue des séismes de cette période, montre une concentration préférentielle des séismes dans la partie NW du secteur (Oued Laou), et qui forme un alignement de direction NE – SW depuis l'Alboran jusqu'à Chefchaouen. Cependant et comme l'année dernière, la région d'Ouazzane a reconnu plusieurs nouveaux séismes où deux pics ont pu être distingués. Un premier datant du 21/01/2010 d'une magnitude de 4.1 sur l'échelle de Richter, et a été responsable d'une panique collective et soudaine dans les deux localités d'Ouazzane et de Chefchaouen, avec une secousse qui a été ressentie dans un rayon de plus de 40 Km. Une réplique moins violente que la précédente a eu lieu le jour suivant au même endroit. Un second séisme a fait partie d'une série de 5 au mois de Février. Ceux-ci, ont été ressentis notamment par les populations des communes situées entre Ouazzane et Chefchaouen. Les 4 premiers ont enregistré des magnitudes comprises entre 3.4 et 3.7, alors que le 5^{ème} (14/02/2010) a été notablement plus important avec une magnitude de 4,3 (Richter). Cette activité sismique s'est propagée de l'Est vers l'Ouest, ce qui semble témoigner du néo-fonctionnement présent des deux grandes familles d'accidents majeurs et responsables de la structuration de la région (et tout le Maroc Nord – Occidental) au cours de l'Oligo-Miocène à savoir: ceux de direction NW – SE entre Larache et Ouazzane largement décrits dans la littérature (Cherkaoui, 1988 ; Cherkaoui, 1991 ; <http://www.everyoneweb.com>) , et ceux de direction ENE- WSW du couloir de Jebha.

iii. Depuis le début de 2011 (Figure V-20), l'activité sismique peut être qualifiée de modérée sur tout le Maroc, mais surtout concentré dans la zone Rifaine notamment en Alboran et à proximité de la région de Jebha.

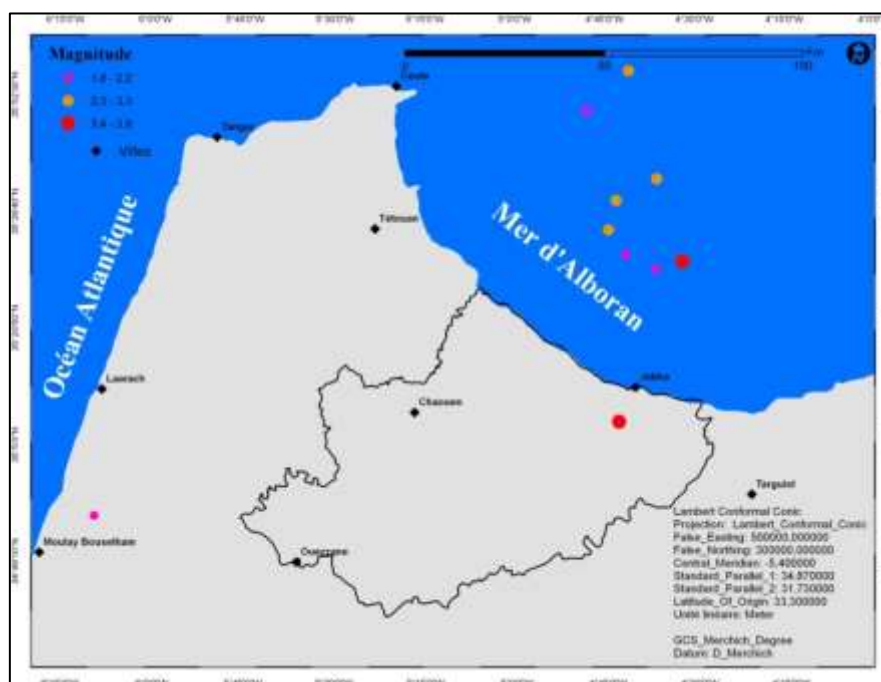


Figure V-20 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2011 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.

2.5. Magnitude ou profondeur ; déclencheur ou prédisposant ?

L'effet le plus évident des séismes sur les mouvements de terrain semblent à priori se manifester par cisaillement avec la formation de nouvelles fractures ou la réactivation de celles préexistantes. Une activité sismique ne peut induire des désordres et avoir un effet

palpable sur la stabilité des versants qu'à partir d'une magnitude minimale supérieure ou égale à 5 (Parise et Jibson, 2000 ; Mikos et al, 2006 ; Gallousi et Koukouvelas, 2007 ; Miles et Keefer, 2009...). Ces auteurs ont tous intégré la sismicité en se basant sur la magnitude pour appréhender la relation de la sismicité avec la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle des mouvements de terrain, puisque les magnitudes des séismes en question dépassaient largement le seuil de 5. Toutefois, il ne faut pas omettre la possibilité que de petits écroulements puissent apparaître à des intensités inférieures (Guzzetti et al., 1999), soit des magnitudes = 4.3 ± 0.4 (Malamud et al., 2004).

Dans notre secteur d'étude et les régions sismogènes les plus proches, en se basant sur les données de la sismicité historique (19 et 20^{ème} siècles) et instrumentale de la période entre 1901 à 2011, aucun événement d'intensité assez élevée n'a eu lieu. C'est entre autre une des raisons, qui nous a poussés à écarter l'intégration du paramètre sismicité en prenant en compte les magnitudes, mais aussi le considérer comme étant un paramètre de prédisposition ou de préparation et non pas déclencheur, puisque jamais l'activité sismique de cette région, n'a jamais déclenché mouvements de terrain d'une façon directe.

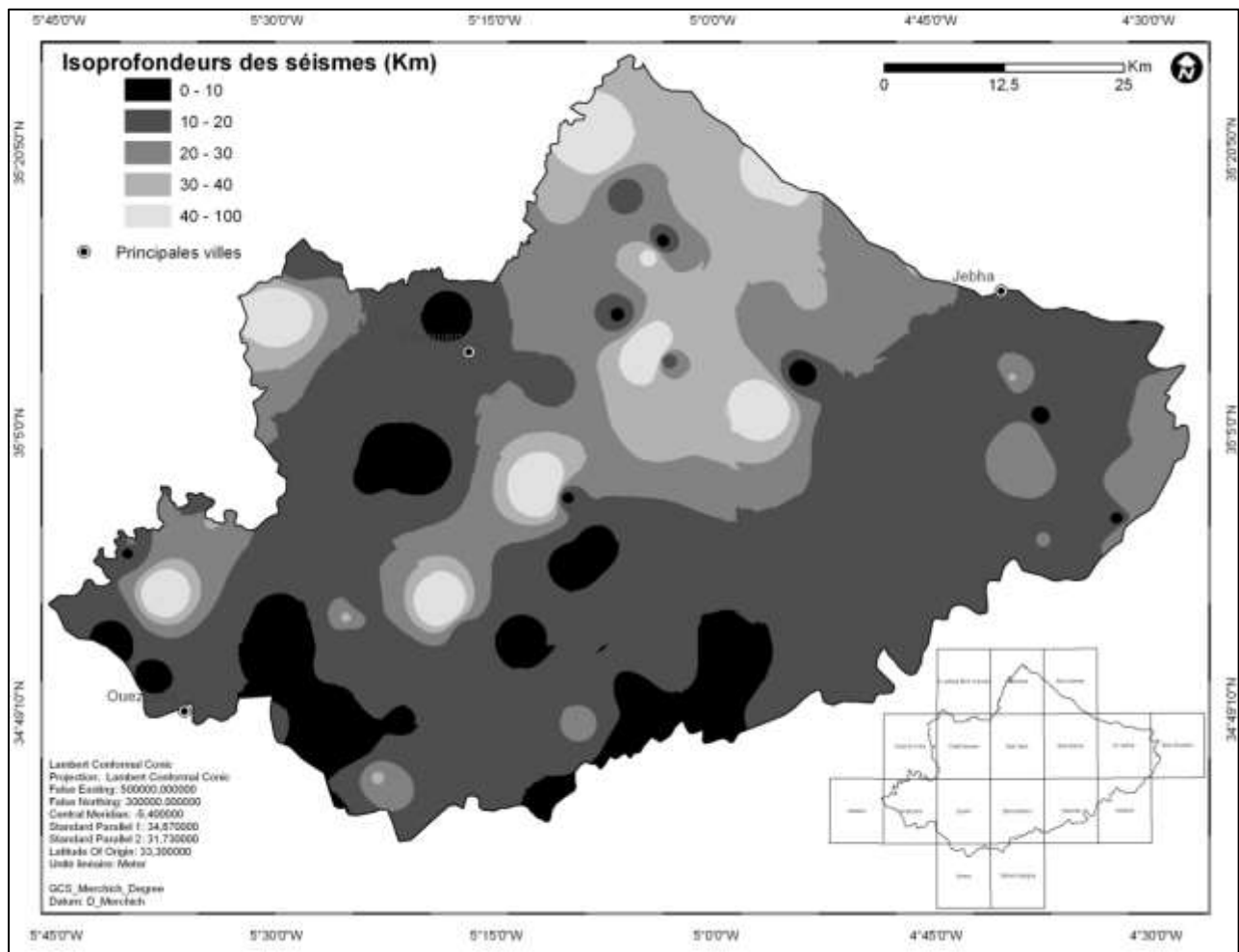


Figure V-21 : Carte des isopropondeurs des séismes dans la province de Chefchaouen.

L'activité sismique modérée de la région de Chefchaouen malgré sa récurrence très rapprochée dans le temps (quelques jours à quelques mois), semblerait avoir un effet déstabilisateur à long terme, par fatigue des formations. Cette dernière peut conduire à l'augmentation de la fissuration et 1^o accroître l'infiltration de l'eau, et 2^o affaiblir la

résistance mécanique des terrains, ce qui peut aboutir au déclenchement des mouvements. Cela, revient à dire que le comportement des formations vis-à-vis des séismes va être généralement tributaire de la position de leurs hypocentres (profondeurs). Ainsi, Une carte des isoprofondeurs des séismes a été établie pour la région de Chefchaouen (Figure V-21).

2.6. Relation séismes – précipitations

Depuis bien longtemps, il était admis (la seule hypothèse) que toute manifestation sismique est le résultat des variations dans les champs des contraintes (stress) tectoniques, comme l'effet de charge d'un barrage, et qui elles même se trouvent régies par une activité plus globale, c'est celle de la tectonique des plaques. En revanche, Sykes, 1978 ; et Hung et al., 1979, en essayant de trouver une explication beaucoup plus plausible que la tectonique des plaques, surtout pour des séismes purement intraplaques, ils ont découvert que ces derniers peuvent être corrélés aux hauteurs des précipitations. Cette nouvelle hypothèse a été rapidement corroborée par les nombreux travaux qui l'ont succédé (Costain et al., 1987 ; Kafri et al., 1990 ; Liritzis et Petropoulos, 1992 ; Muço, 1995 ; Muço, 1999), où il a été démontré que les des séismes se déclenchent juste après (quelques jours à quelques mois minimums) d'importantes périodes pluvieuses. De ces observations découle cette nouvelle hypothèse, celle d'une hydrosimicité ou sismicité induite par une saturation en fluides au niveau des failles et des fractures.

Cette approche tout à fait concevable, notamment dans le cas d'une région suffisamment faillée et fracturée comme la nôtre. En effet, le déclenchement d'un séisme peut être facilité par une altération chimique des roches accentuée par les contraintes tectoniques, associé aux effets mécaniques générés par des changements dans la pression hydrostatique (Sykes, 1978 ; Costain et al., 1987), et à la fatigue mécanique des roches sous l'effet de leur poids qui s'accroît quand elles se gorgent brutalement d'eau. Mais le mécanisme principal est l'annulation de la résistance au cisaillement interne des roches par la lubrification des plans de faille, bloqués par une friction mécanique (Liritzis et Petropoulos, 1992).

Cela nous a incités à vérifier d'avantage l'interrelation séismes – précipitations. Pour cette raison, nous avons analysé les relations entre les différents séismes de notre secteur et les hauteurs de précipitations sur les dernières 70 années (Figure V-50). Il en ressort que les plus importants séismes ($M \geq 5$) du secteur et de son pourtour se produisent à la suite des pics de forte précipitation. Cela explique que l'activité sismique du nord du Maroc n'est pas purement (et seulement) tributaire du contexte compressif (Afrique – Europe) contrairement à ce qu'on pensait, mais est révélée par le rôle de l'eau interstitielle qui, pour la libération du stress sismique, exerce un contrôle positif par une augmentation de la lubrification au niveau des plans de failles superficielles.

2.7. Carte des isoprofondeurs

La carte des isoprofondeurs des séismes (Figure V-21) a été réalisée par interpolation en plusieurs étapes. Pour ce faire, toutes les commandes du sous module "Interpolation" incorporé dans le module "Spatial Analyst Tools" d'ArcToolbox 10 ont été testées, et dont les plus connues sont : l'interpolation par *krigeage*, *spline*, *natural neighbor*, et l'*IDW* qui s'est avérée être la plus adaptée pour l'établissement de notre carte avec des résultats les plus proches de la réalité. Cette carte régionale (Figure V-21) comporte 5 classes d'isoprofondeurs des séismes de la région de Chefchaouen, avec des profondeurs allant de (à peu près) 0 à 100 Kilomètres.

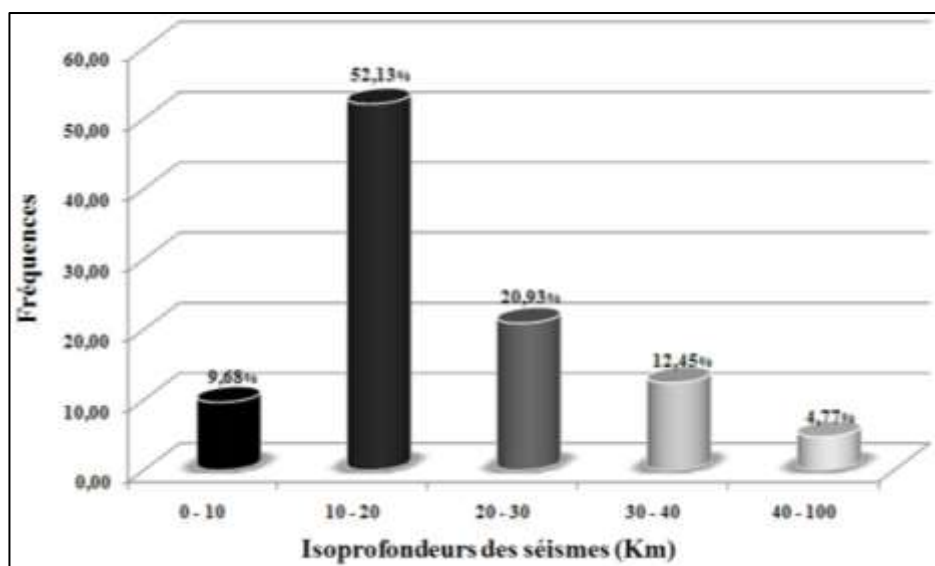


Figure V-22 : Fréquences des différentes classes des isoprofondités des séismes de la province de Chefchaouen.

Les fréquences relatives de ces dernières par rapport à l'étendue globale du secteur d'étude sont représentées dans la Figure V-22. Celle-ci montre que la première classe (0 – 10 Km) présentant 10% de la superficie totale. Elle est matérialisée par des zones qui couvrent quelques dizaines de Km² et se concentrant d'avantage dans la moitié SW du secteur, en particulier au SW de Zoumi, au SE de Beni Ahmad, au SW de Tamorot, et au sud de Chefchaouen à la limite nord avec la région de Zoumi. La classe de 10 à 20 km de profondeur constitue la fréquence la plus importante, en occupant à elle seule plus de la moitié du secteur (52.13%). Elle concerne essentiellement la partie SE de la province en constituant une bande de 25 Km de largeur en moyenne, et de direction NE (entre Jebha et Beni Boufrah) – SW (entre Ouazzane et Tarwal). Cette sismicité assez superficielle semble être expliquée par l'encadrement de cette zone par deux accidents majeurs de la chaîne rifaine qui contrôlent l'évolution sismotectonique de cette dernière. Ceux sont, l'accident de Jebha et l'accident de Nekor situé plus à l'Est.

Cependant, une autre bande à sismicité assez superficielle peut être distinguée, mais moins importante que la précédente en termes d'étendue. Elle prend une direction N – S en partant du nord de Chefchaouen jusqu'intercepter la zone précédente. Elle semble être liée en partie à l'alignement tectonique de direction N – S présenté sur la carte des mouvements récents de la chaîne Rifaine établie par Morel en 1992. La troisième (20 – 30 Km) et la quatrième (30 – 40 Km) classe constituent respectivement des fréquences de 20.93% et 12.45%, et se présentent l'une (30 – 40 Km) à l'intérieur de l'autre (20 – 30 Km) en se concentrant sur le domaine interne (Sebtides, Ghomarides et Dorsale Calcaire) de notre secteur et puis dans de petites zones au SW de Chefchaouen, au nord d'Ouazzane, et à l'extrême SE de Jebha (limite Ouest de la région de Beni Boufrah). Quant à la dernière classe (40 – 100 Km), elle forme la fréquence la plus petite sur l'ensemble du secteur avec 4.77%. Elle se présente sous forme de petites zones circulaires d'un rayon d'environ 1 Km, alignées essentiellement le long du couloir de Jebha.

2.8. Discussion : relation de la sismicité avec les mouvements de terrain

En examinant la distribution spatiale de l'ensemble des mouvements de terrain de notre secteur d'étude en faisant varier la profondeur des séismes (Figure V-23A), on remarque que

la quasi-totalité (plus de 80%) des phénomènes prennent naissance au niveau des zones affectées par les séismes les plus superficiels, c'est-à-dire les trois premières classes dont la profondeur est comprise entre 0 et 30Km, avec un maximum de phénomènes (plus de 50%) la deuxième classe des profondeurs (10 – 20Km) précisément. Cette distribution s'explique par le fait que plus de 70% des séismes de la région de Chefchaouen se manifestent à cette profondeur et ce avec une grande récurrence. Ces séismes couvrent en général presque la totalité du secteur à l'exception de la partie du terrain occupée par le domaine interne matérialisé par la Dorsale calcaire. Cette dorsale certes se caractérise par une grande densité de failles, peu profondes comme les principales failles inverses (Chevauchements majeurs de la chaîne Rifaine) et donc n'ont pas un caractère sismique à la différence de l'accident décrochant de Jebha. Cela justifie cependant la diminution progressive de la fréquence des mouvements de terrain à partir de cette classe. La même constatation est valable pour les différents types de mouvements de terrain étudiés séparément (Figure V-23B, F, et E), sauf pour les écroulements (Figure V-23D) où on note que les fréquences de ces derniers sont assez importantes même avec la profondeur qui augmente, ce qui signifie que même de faibles secousses en provenance de séismes relativement profonds et à faible magnitude peuvent être à l'origine d'écroulements et de chutes de blocs.

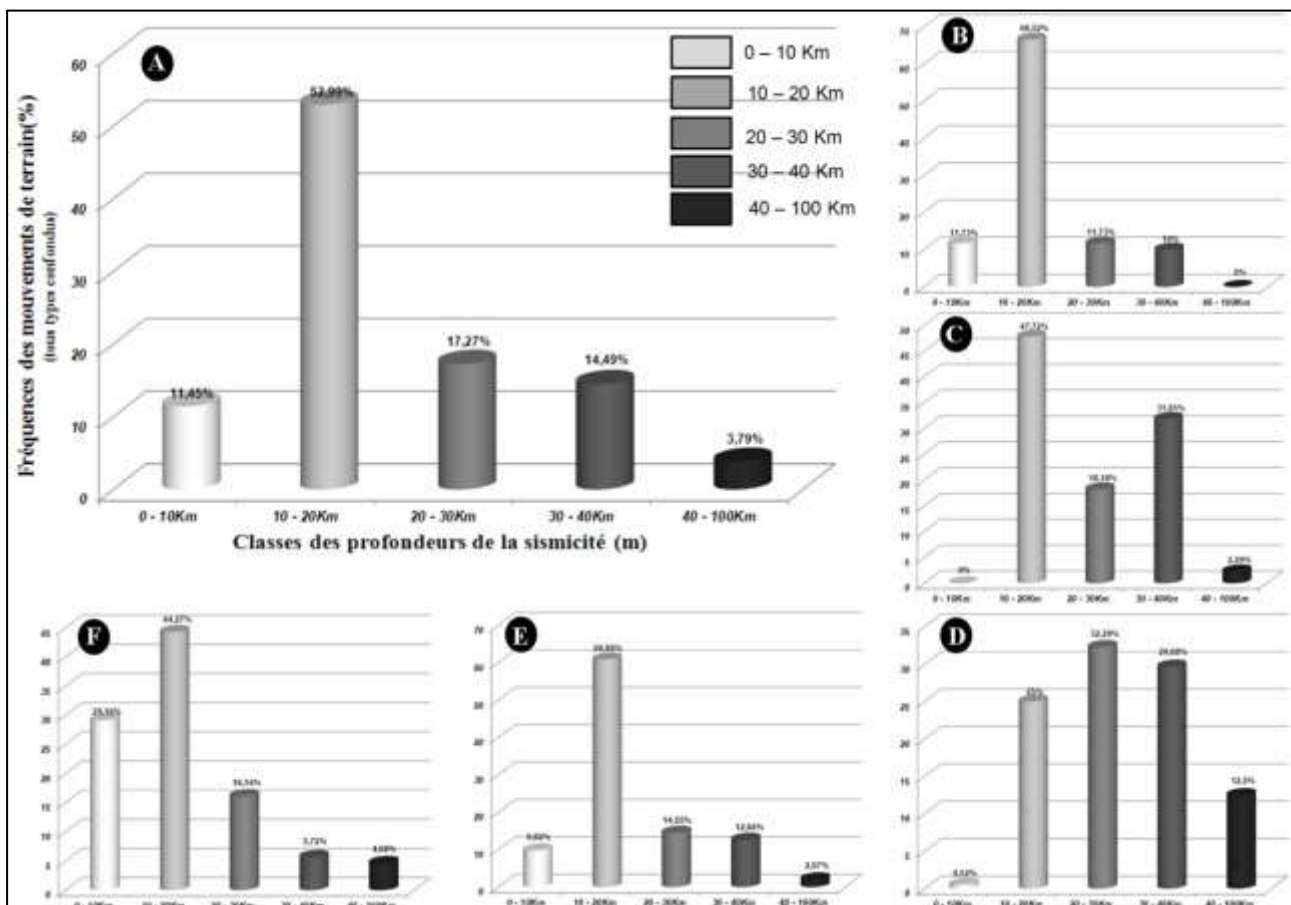


Figure V-23 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de profondeur (Km) des séismes de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe de profondeur des séismes ; C : Fréquences des coulées de débris par classe de profondeur des séismes ; D : Fréquences des écroulements par classe de profondeur des séismes ; E : Fréquences des sapements par classe de profondeur des séismes ; F : Fréquences des badlands par classe de profondeur des séismes.

En tentant de mener la même analyse pour chaque catégorie de mouvement séparément et suivre l'évolution de son abondance au niveau de chaque classe de profondeur des séismes (Figure V-24) on remarque ce qui suit :

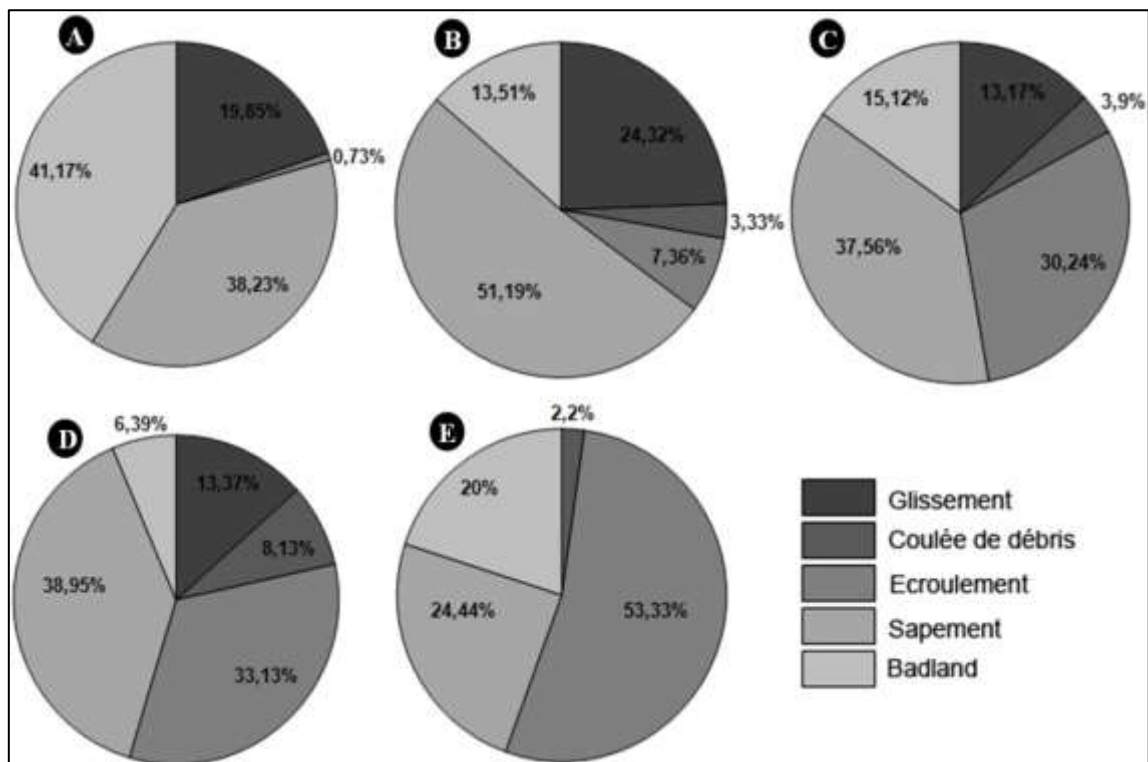


Figure V-24 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain par classe de profondeur des séismes de la province de Chefchaouen; A : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe des séismes à profondeur 0 – 10 Km ; B : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe des séismes à profondeur 10 – 20 Km ; C : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe des séismes à profondeur 20 – 30 Km ; D : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe des séismes à profondeur 30 – 40 Km ; E : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe des séismes à profondeur 40 – 100 Km.

- En toute logique, aucune relation particulière entre l'abondance des badlands et des sapements et la profondeur des séismes n'est décelée.
- Les glissements et les coulées de débris varient sensiblement avec la variation de la profondeur des séismes, où leur fréquence est inversement proportionnelle par rapport à la profondeur. Ceci est peut-être à mettre en relation avec l'augmentation de la pression interstitielle de l'eau au sein des formations qui évolue drastiquement en cas de séisme (Bull et Brandon, 1998 ; Marzorati et al., 2002), ce qui favorise la mise en mouvement du versant ou d'une partie de celui-ci
- Les écoulements sont les seuls à avoir une fréquence qui augmente proportionnellement avec l'augmentation des profondeurs. Il est donc vraisemblable que l'occurrence des écoulements est intensifiée avec les séismes les plus profonds, puisqu'on général sont les plus puissants avec des amplitudes significatives et de fréquentes répliques.

En somme, les versants semblent réagir généralement de deux manières vis-à-vis des sollicitations sismiques, ce qui nous permet de distinguer deux subdivisions d'instabilités de versants :

-1° une première famille (glissements, coulées de débris, et puis sapements et badlands) qui se développent avec d'importantes fréquences relatives en présence des séismes superficiels malgré leur caractère monotone et faible magnitude. Ce sont les ondes de volume de ces derniers, qui semblent avoir une incidence sur les mouvements par les mécanismes de rupture suite à une saturation plastique voire une liquéfaction des formations dans lesquelles la présence d'eau joue un rôle déterminant. En effet il est envisageable que des surpressions interstitielles peuvent se produire, subir un emprisonnement et une accumulation pendant tout le temps du passage de l'onde sismique. La pression occasionnée par ce passage se transformera en une tension (libération) responsable de la mise en mouvement de la masse disloquée ;

-2° une seconde famille représentée par les écroulements dont la fréquence relative augmente avec des séismes plus profonds que ceux de la première famille. Contrairement au premier groupe de mouvements, il paraît que ce sont les ondes de surface qui ont une grande incidence sur les écroulements, et notamment celles de Love pour lesquelles le mouvement des sols (ou les formations du versant) s'effectue perpendiculairement au sens de la propagation de l'onde tout comme pour les ondes 'S'. Cela peut provoquer un intense ébranlement horizontal des formations, qui en plus de l'effet de la pente, la pesanteur, l'eau...etc, favorise l'écroulement.

3. Les variables géométriques ou topographiques: gradient de pente, altitude et expositions

3.1. Introduction

Les paramètres géométriques appelés aussi topographiques sont indispensables pour toute évaluation quantitative ou semi quantitative de la susceptibilité et de l'aléa « mouvements de terrain ». Ces paramètres ont été toujours bien adaptés pour d'autres types d'études comme la caractérisation morphostructurale d'un secteur donné (cf chapitre 3). Les produits topographiques numériques se sont développés avec le développement des technologies informatiques (Matériel et Logiciels). Des logiciels spécifiques peuvent désormais réaliser, à partir de données numériques (MNT), des cartes en courbes de niveaux à des échelles différentes, des profils topographiques de terrain, des cartes de gradient des pentes, des ombrages et plusieurs sortes de traitements relatifs à l'imagerie en général. Pour une définition détaillée des MNT le lecteur peut se référer au chapitre 3. Comme mentionné dans le même chapitre (3), le MNT de la zone de Chefchaouen a été automatiquement calculé à partir des données Radar ASTER GDEM.

3.2. Gradient de pente

Pour un même matériau dont le poids et les caractéristiques mécaniques sont invariables (ou considérés comme tel), l'augmentation de l'angle de pente se traduit par une augmentation de la contrainte tangentielle au cisaillement. Et par conséquent, à une diminution du coefficient de sécurité (Eq.1). L'étude du gradient de pente est donc indispensable pour comprendre la dynamique des versants. Toutefois, comme le soulignait déjà [Millies-Lacroix](#) en 1968, il demeure indispensable de l'associer à d'autres facteurs

environnementaux, afin de limiter au mieux les incertitudes sur les évaluations de la stabilité. Cela s'explique par l'existence d'une multitude de méthode de calcul de stabilité ; mais aucune n'est parfaite ; car aucune ne prend en considération le paramètre de la déformabilité du sol, ce qui est en relation avec la méconnaissance des lois de comportement des sols considérés toujours comme étant rigide et/ou plastique.

$$\text{Equation 1 : } CS = FR/CC$$

Avec

FR : Forces de résistance au cisaillement.

CC : Contraintes de cisaillement = contraintes tangentielles.

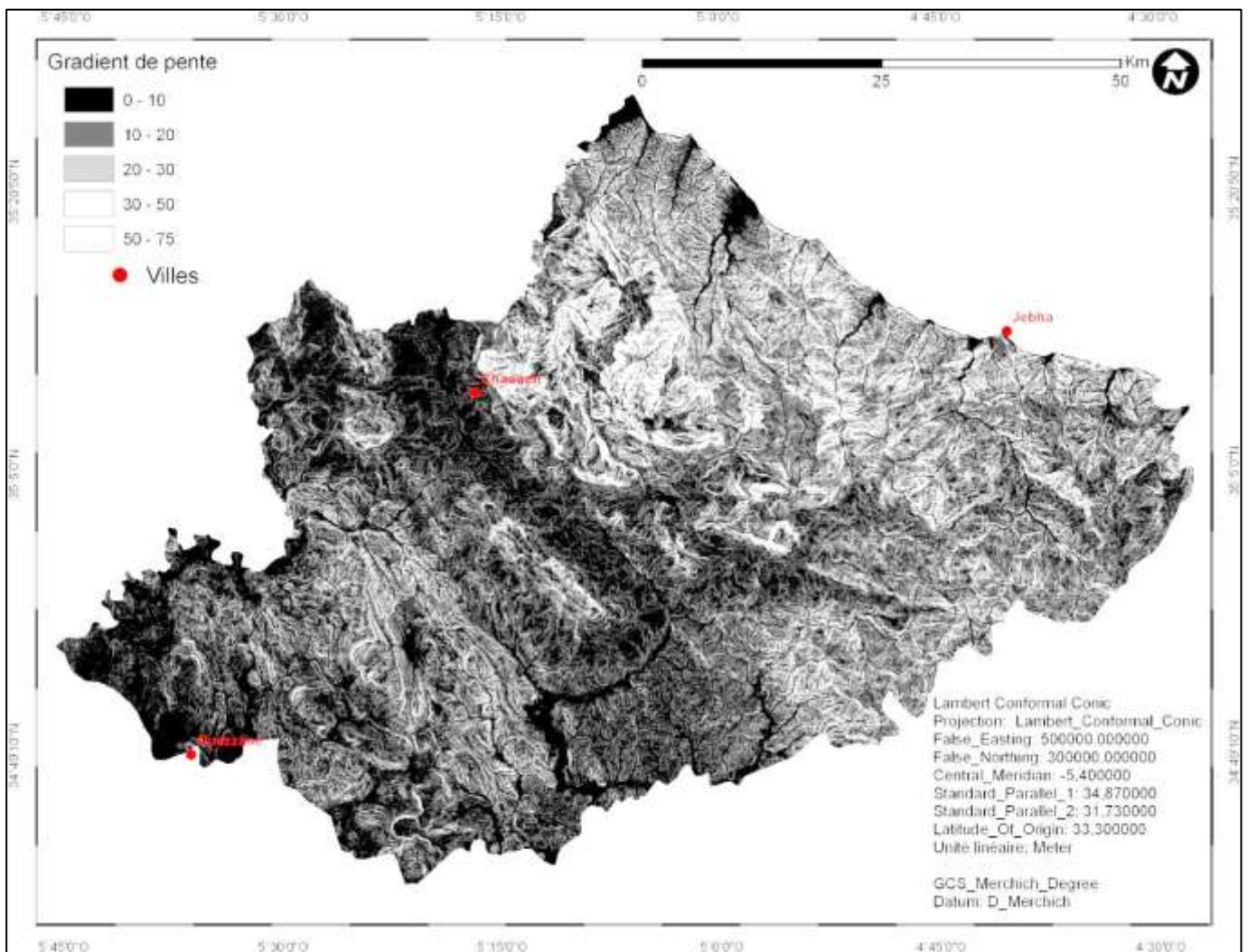


Figure V-25 : Carte du gradient de pente de la de la province de Chefchaouen ; dérivée du fichier MNT.

Les gradients de pente appelés également gradients clinométriques de la province de Chefchaouen ont été calculés et regroupés dans un fichier dérivé du MNT. Ce calcul prend en compte la composante verticale du vecteur normal au plan de régression le plus proche des quatre points du MNT délimitant la maille en question (Steyn, 1976). Il en résulte que, dans le fichier MNT, le point de coordonnées ij (P_{ij}), a un gradient de pente. Cependant, le fichier que nous avons généré à partir du MNT, contenait plusieurs classes de gradients de pentes que nous avons reclassifiées en cinq grandes classes (Figure V-25), avec un pas de dix degrés pour les trois premières classes (0 – 10°, 10 – 20°, et 20 – 30) et puis, au-dessus de la limite

de stabilité d'un versant (30-33°), un pas de 20 et 25 degrés respectivement pour les deux dernières classes (30 – 50° et 50 – 75°).

La pente moyenne du secteur d'étude est de l'ordre de 15.91° avec un écart type 9°. La reclassification effectuée a été adoptée après plusieurs tests de corrélations entre la distribution spatiale des phénomènes et les différentes classes choisies. Cependant, il est utile de mentionner que les subdivisions sélectionnées correspondent à des gammes de gradients de pentes couramment utilisée comme référence pour les études préliminaires aux travaux publics dans le secteur rifain (LPEE). Celles-ci montrent une relation de correspondance globale avec le découpage lithologique du secteur d'étude. Les terrains ayant le gradient de pente compris entre 0 – 10° couvrent 27.55% de la surface totale du secteur d'étude et correspondent en grande partie à l'UG3. Ils présentent les terrains relativement plats et à pentes douces qui se situent, quasi exclusivement, au niveau des plaines alluviales des rivières principales (Oueds Laou, Ouriaga, Aoudour et Loukkous) ainsi qu'au niveau des bas versants avoisinants, qui sont façonnés dans les marnes de l'unité de Tanger, d'Izarène et celle du Loukkos. Les pentes moyennes (10 – 20°, et 20 – 30°) (Figure V-26), occupent plus que la moitié du secteur et ont une distribution sporadique avec une particulière localisation en aval de la chaîne calcaire et la moitié Nord-Ouest des terrains Ghomarides d'une part. D'autre part, leur distribution va en parallèle avec l'extension des versants occupés par les nappes de flyschs. Quant aux forts gradients de pentes (30 – 50°, et 50 – 75°), ils occupent une extension inférieure à 8 %, se superposent avec les l'UG4, l'UG7 et l'UG8. Ils se localisent en grande partie dans le domaine dit d'Alboran (Sebtides, Ghomarides et Dorsale Calcaire). A l'Est du secteur, ils correspondent aux reliefs abrupts et aux crêtes de la nappe de Tisirène et celle de Melloussa. Ils sont cependant nettement observables dans la partie sud du secteur, au niveau des barres gréseuses de la région de Zoumi-Ouazzane.

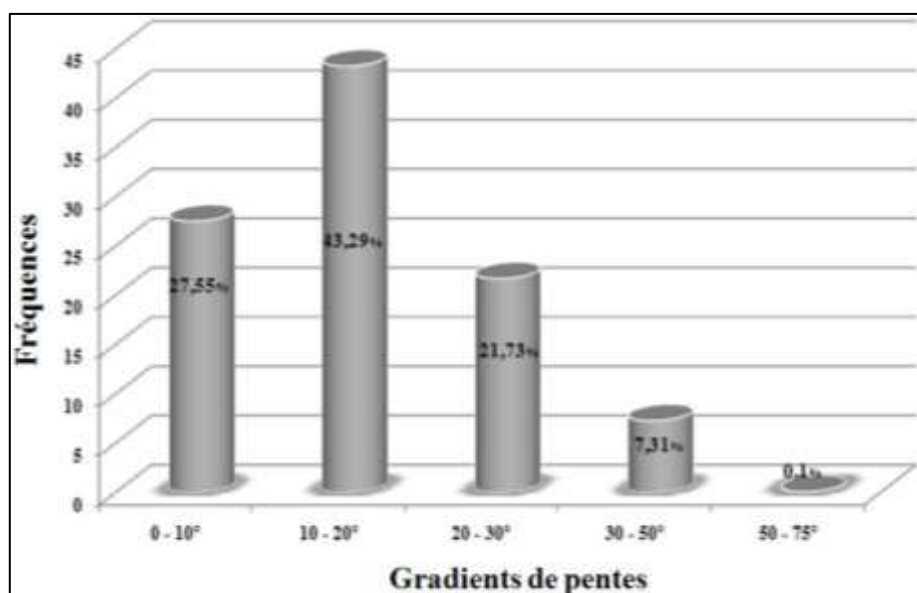


Figure V-26 : Fréquences des différentes gammes des gradients de pentes de la province de Chefchaouen.

3.3. Altitude ou hypsométrie

Peut être aussi appelée carte d'élévation peut être définie comme étant un document qui matérialise la répartition de l'énergie du relief. L'élaboration d'une telle carte, se fait classiquement par l'assemblage des courbes de niveau de la carte topographique en classes

d'altitude variables. Car dans un MNT traduit l'élévation de chaque point est exprimée en mètre, ainsi les différentes classes sont obtenues automatiquement par regroupement en intervalles d'altitude spécifiques selon le besoin et le type d'analyse. Cependant, l'interprétation des données altimétriques peut être effectuée plus facilement par l'interprétation d'images. La vision humaine distingue seulement entre 16 et 32 niveaux de gris, et l'image manque de profondeur. Donc, les aspects de la haute fréquence spatiale ne sont pas visibles à cause de ces facteurs. La visualisation peut se faire en 2D en niveaux de gris ou en palette de couleurs en faisant correspondre un nombre restreint de couleurs à des classes d'élévations.

La visualisation en 3D peut être effectuée en déformant l'image du MNT en palette de couleurs et en estompage pour générer des vues en perspective. Une autre méthode convenable est de créer trois versions différentes de données combinées en rouge, vert et bleu, où les valeurs minimales sont en bleu-vert, les valeurs intermédiaires en vert jaune, et les valeurs maximales sont exprimées en orange, rouges et magenta. Afin de mieux accentuer les détails topographiques dans les zones à relief plat, les altitudes peuvent être visualisées en utilisant une échelle logarithmique locale (Guzzetti et Reichenbach, 1994).

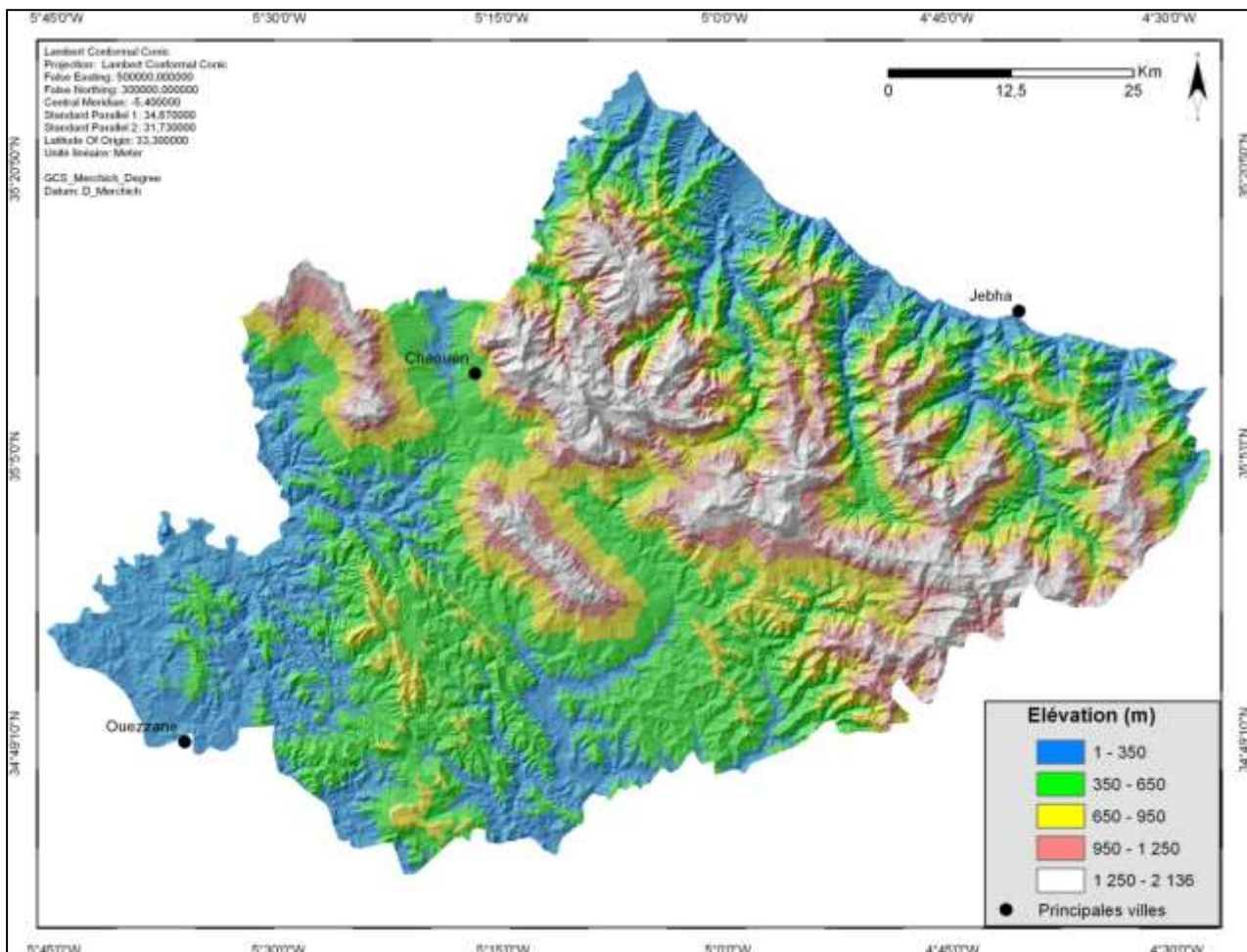


Figure V-26 bis : Carte hypsométrique de la province de Chefchaouen.

L'analyse générale de la carte hypsométrique (Figure V-26) de la province de Chefchaouen nous permet d'identifier les principaux traits marquants la morphologie du secteur. Ainsi, le secteur d'étude se caractérise par un système morphologique montagneux

bien développé. Ce système est matérialisé par la couleur rouge (1250 – 1236m) caractérisant les altitudes les plus hautes sur la carte hypsométrique (Figure V-26 bis) et couvre la fréquence la plus faible des classes d'élévation avec 10.6% (Figure V-27) : elle correspond à la subdivision hypsométrique très élevée de notre carte. Ainsi, trois zones à hauts reliefs se détachent du paysage, à savoir : (1) la Dorsale Calcaire qui atteint une altitude de 2136m ; - (2) les terrains de la Nappe Numidienne ; et -(3) les crêtes de la Nappe de Flyschs de Tisirène dans l'Est du secteur.

La classe d'altitude modérément élevée (950 – 1250m) jouxte la classe précédente et constitue une sorte d'auréole pour cette dernière. Elle couvre environ 13% de la fréquence totale, et forme la transition entre le système montagneux bien prononcé et la zone à altitude moyenne. Les altitudes moyennes matérialisées par la couleur jaune (650 – 950 m) et verte (350 – 650 m) sur la carte hypsométrique (Figure V-26) marquent généralement les terrains des nappes des flyschs du secteur, les pieds des massifs montagneux de la Dorsale Calcaire et des crêtes des nappes de Tisirène et Numidiennes.

En outre, les différentes zones géomorphologiques les plus basses de la région d'étude correspondant à la première classe altitudinale (0 – 350m), présentent environ 24% de la superficie totale du secteur et se situent essentiellement au niveau des plaines à savoir : la plaine de l'Oued Laou, l'Oued Tihissas, l'Oued Amter, l'Oued Ouriaga, et l'Oued Sidi Fetah d'Ouest en Est sur la façade méditerranéenne. Du côté ouest du secteur, c'est la plaine de l'Oued Loukkous et de l'oued Zaz. Quant à la partie Est et Sud-Est-ce sont les plaines des Oueds Aoudour et Aoulaï.

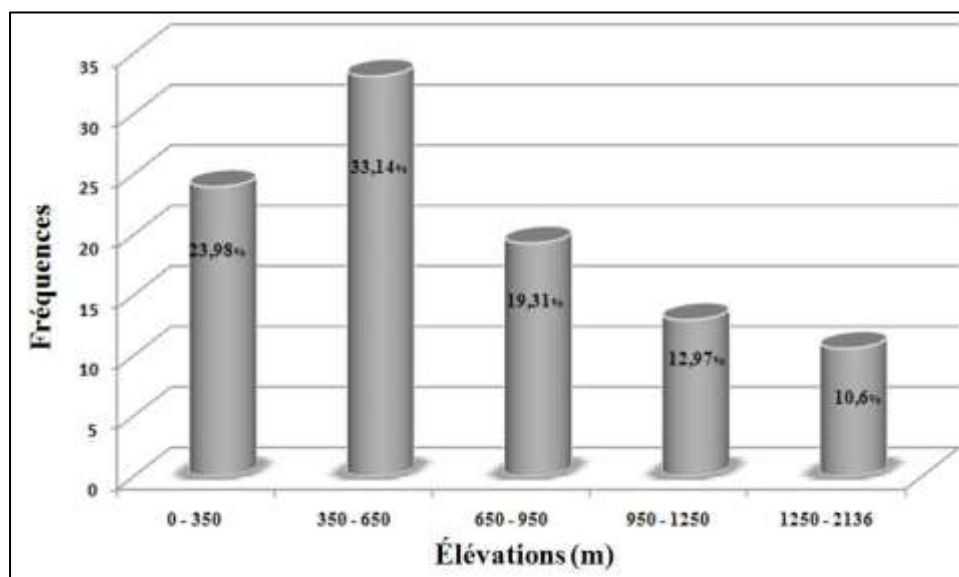


Figure V-27 : Fréquences des différentes subdivisions hypsométriques de la province de Chefchaouen.

3.4. Expositions

L'exposition d'un versant représente son orientation par rapport au Nord. Elle est déterminée par mesure de l'angle existant entre le Nord et la projection horizontale de la ligne de pente maximale d'un versant, et ce en se déplaçant dans le sens des aiguilles d'une montre. Depuis plusieurs années, les SIG offrent beaucoup de modules spécialisés pour la création automatique des cartes des orientations à partir des MNT. Ainsi, la carte d'expositions de la province de Chefchaouen (Figure V-28) a été générée automatiquement à partir des images

Radar Aster précédemment utilisées pour la construction de la carte des gradients des pentes. Ces deux cartes ont été réalisées à l'aide de la commande "Analyse de surface" du module "Spatial Analyst" qui est implémenté dans ArcGis 10.

Le changement de l'exposition des versants équivaut une grande variabilité de l'obliquité par rapport aux rayons solaire, la durée d'ensoleillement des versants, ainsi que des apports énergétiques (vents, température...) inégaux. Cela rend très différente la prédisposition des versants aux mouvements de terrain. La Figure V-28 donne une représentation cartographique simplifiée en 9 classes d'orientation des versants dans le sens des aiguilles d'une montre : Nord ; Nord – Est ; Est ; Sud – Est ; Sud ; Sud – Ouest ; Ouest ; Nord – Ouest ; et finalement les terrains plats dont l'exposition est nulles.

Finalement si l'on tente de déceler un lien entre les différentes classes d'expositions et le pendage des versants, il est à remarquer que les versants orientés vers le Sud, Sud – Est, ou Est, sont les seuls à être caractérisés par des pentes douces et d'étendues importantes. En revanche, les autres versants sont le siège de forts gradients de pentes avec des reliefs très accidentés, notamment pour les orientations, Nord, Nord – Ouest, et Ouest.

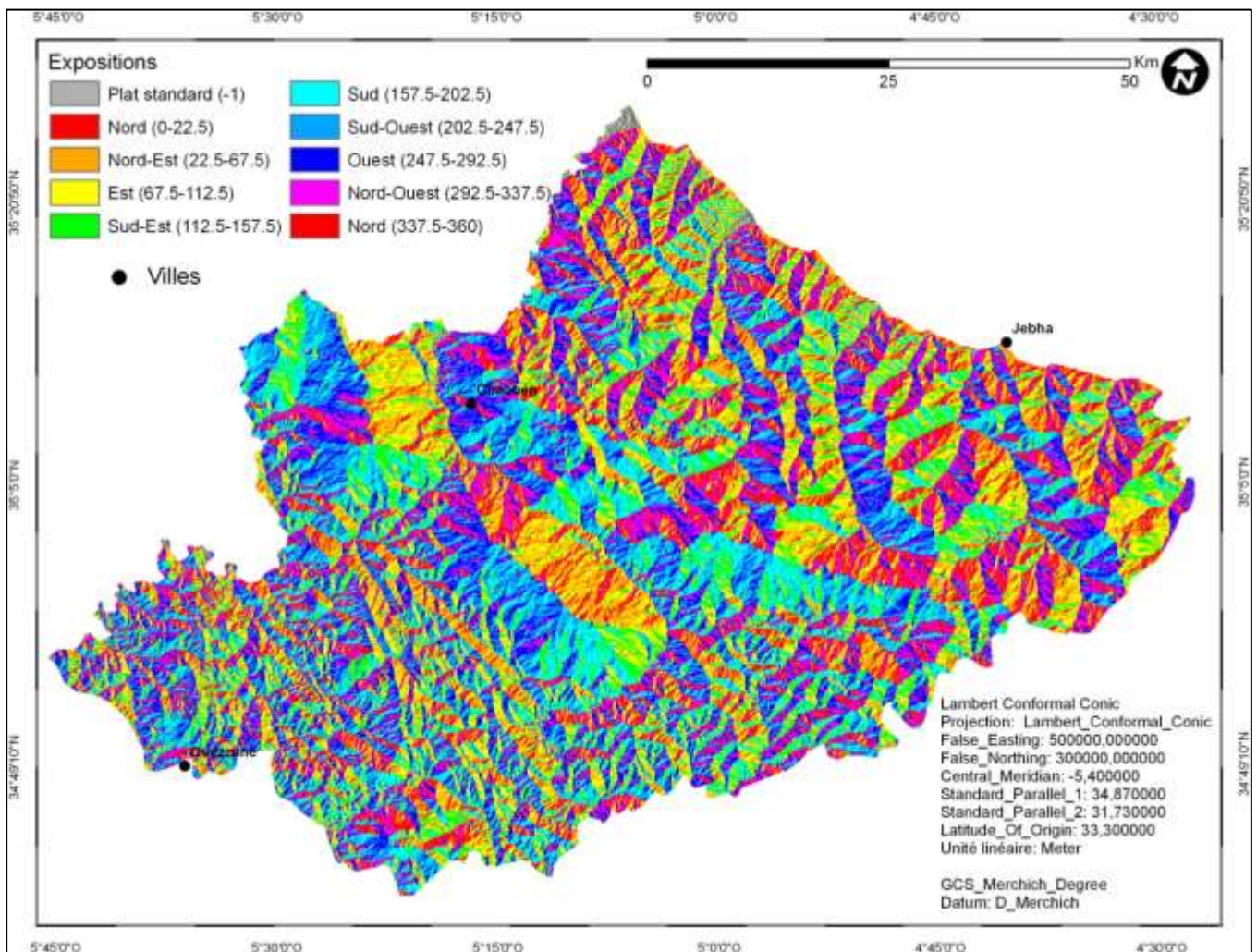


Figure V-28 : Carte des expositions de la province de Chefchaouen.

La Figure V-29, montre les fréquences relatives de chaque exposition par rapport à la totalité du secteur d'étude. A l'échelle régionale, l'exposition générale est Est – Ouest à

Nord-Ouest – Sud-Est. A l'exception des terrains plats formés (aucun angle avec le Nord) principalement par des alluvions récentes qui forment 2.2% de surface totale du secteur, et l'exposition Ouest qui présente une fréquence de 13.44% et qui légèrement supérieur au reste des expositions, les versants ne montrent pas d'exposition préférentielle dominante.

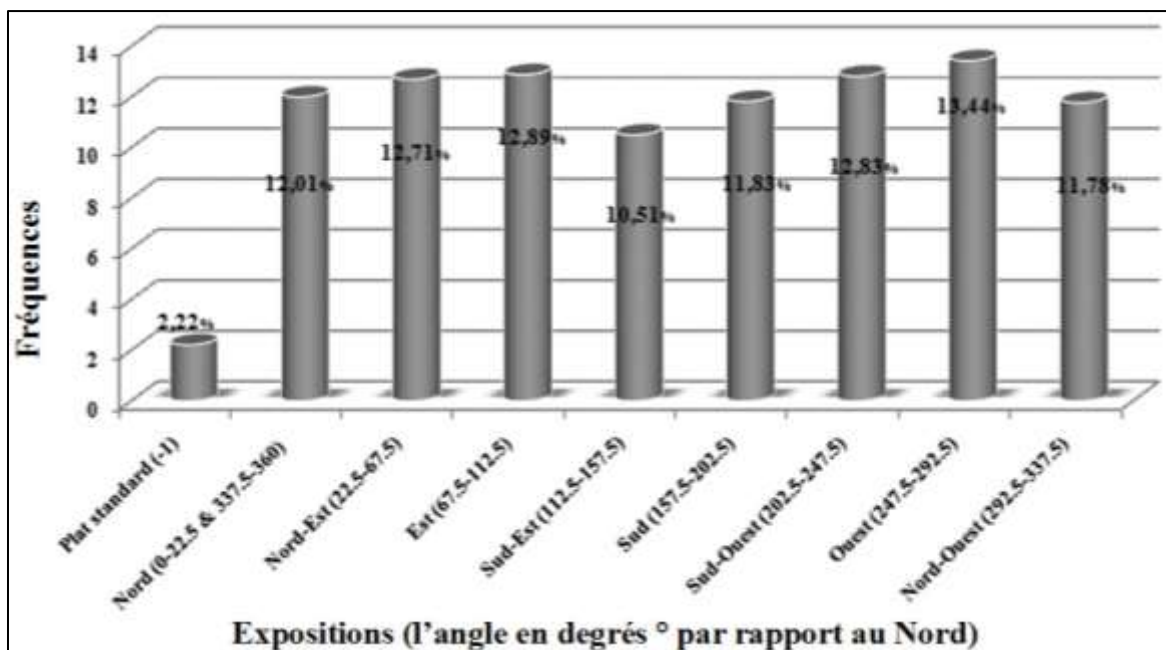


Figure V-29 : Fréquences des différentes classes d'exposition des versants de la province de Chefchaouen.

3.5. Effet de la morphologie de la pente (courbure)

La courbure permet d'estimer la rugosité d'une région donnée. Elle est définie théoriquement comme étant le taux de changement de pente d'une région donnée (Wilson et Gallant, 2000), ce qui influence fortement le comportement et la vitesse des écoulements de surface. Par conséquent, une incidence même indirecte sur le degré érosif (ravinement) et sur la formation des mouvements de terrain.

3.6. Discussion : relation des facteurs géométriques avec les MT

3.6.1. Relation avec la pente

A partir de la figure V-30A qui résume l'évolution de la fréquence des mouvements de terrain (tout type compris), on note que ces derniers sont présents au niveau de toute pente même avec des pourcentages variés. Cela revient à dire que, partout où il y a pente, une énergie potentielle est disponible pour expliquer un mouvement vers le bas. C'est grâce à la pente des versants que l'eau ruisselle en surface et acquiert grâce à sa vitesse une énergie cinétique capable de creuser les formations superficielles à caractéristiques géotechniques médiocres en donnant naissance à des phénomènes de ravinement intense. Sur la même figure (V-30A), on remarque que la majeure partie des phénomènes (plus de 70%) se partage entre deux classes (2^{ème} et la 3^{ème}) de pentes, avec un maximum qui représente environ la moitié de la globalité des phénomènes au niveau de la deuxième classe (10 – 20°). Cette classe des pentes est définie comme étant la plus favorable 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).

La même évolution de la fréquence globale des phénomènes est transposable sur celle de chaque type de mouvement individuellement (Figure V-30B, E, et F), sauf pour les coulées de débris qui semblent se développer avec un maximum d'abondance vers 50° d'avantage en présence des pentes assez élevées que celles de la deuxième classe. Ce constat est tout à fait normal, puisque les coulées de débris du secteur d'étude se répandent strictement sur les versants des massifs de la Dorsale calcaire. Les écroulements, malgré leur grande fréquence (43.57%) pour la pente comprise entre 10 et 20°, présentent des fréquences assez comparables pour les classes de pentes comprises entre 20 – 30°, et 30 – 40° avec respectivement 31.25% et 16.14%.

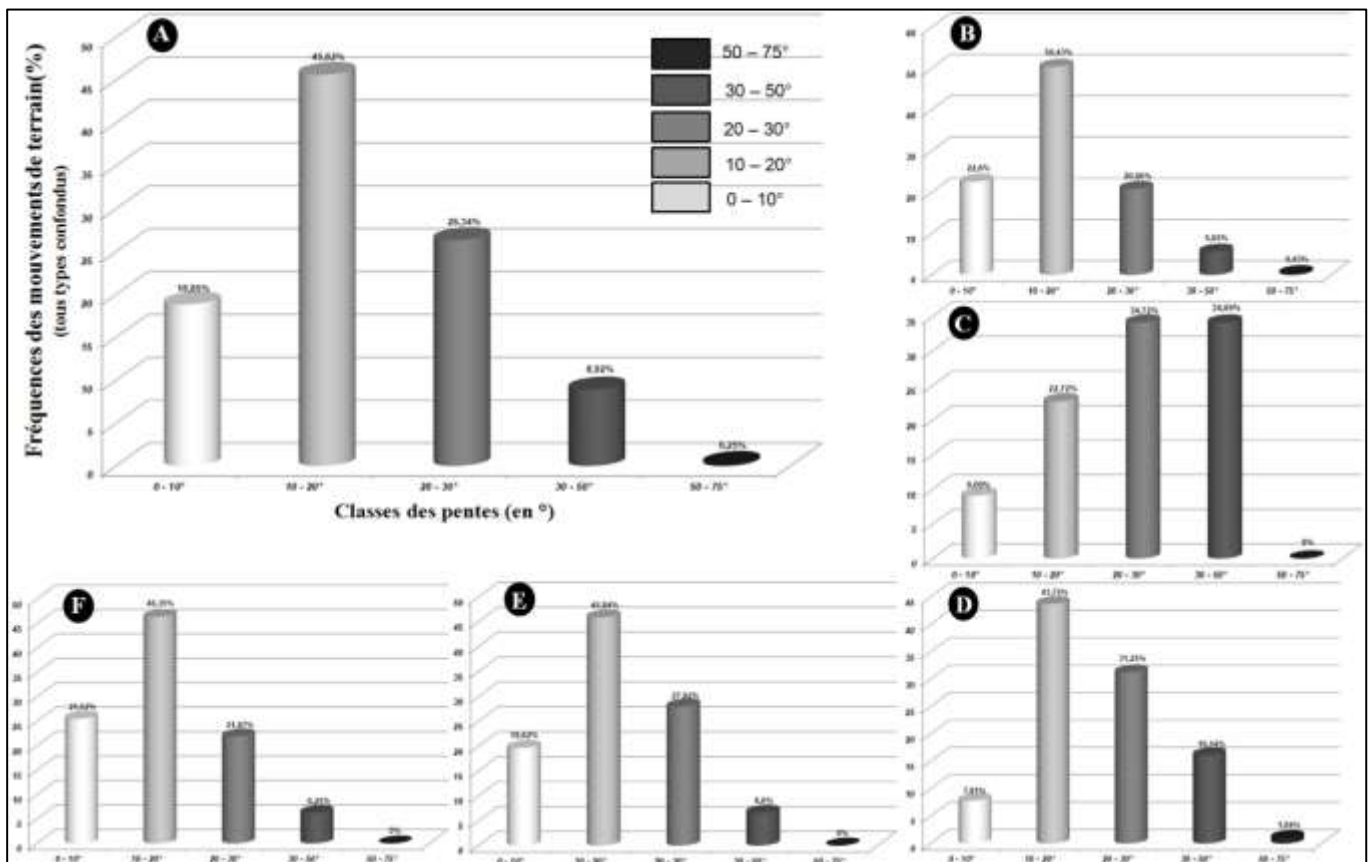


Figure V-30 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de degré de pente (en °) de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe de degré de pente ; C : Fréquences des coulées de débris par classe de degré de pente; D : Fréquences des écroulements par classe de degré de pente; E : Fréquences des sapements par classe de degré de pente; F : Fréquences des badlands par classe de degré de pente.

En étudiant les fréquences spécifiques de toutes les catégories des phénomènes pour chaque classe de degré de pente (Figure V-31), deux grandes constations peuvent être énumérées, et qui sont les suivantes :

- Seuls les glissements et les écroulements se rencontrent sur toutes les pentes de la province de Chefchaouen. Les glissements ont des fréquences relativement proches (15~33%), mais qui chutent à 12.26% au niveau de la dernière classe des pentes (50 – 75°). Les écroulements deviennent de plus en plus abondant avec l'augmentation du

degré de pente (Figure V-31A, B, C, D), jusqu'à atteindre le maximum de leur présence par 66.66% de la totalité des phénomènes inventoriés dans la classe de pente 30 – 50°, qui diminue de la moitié vers la classe de pente qui suit (50 – 75°). les sapements, et les badlands se rencontrent sur toutes les pentes de la province de Chefchaouen

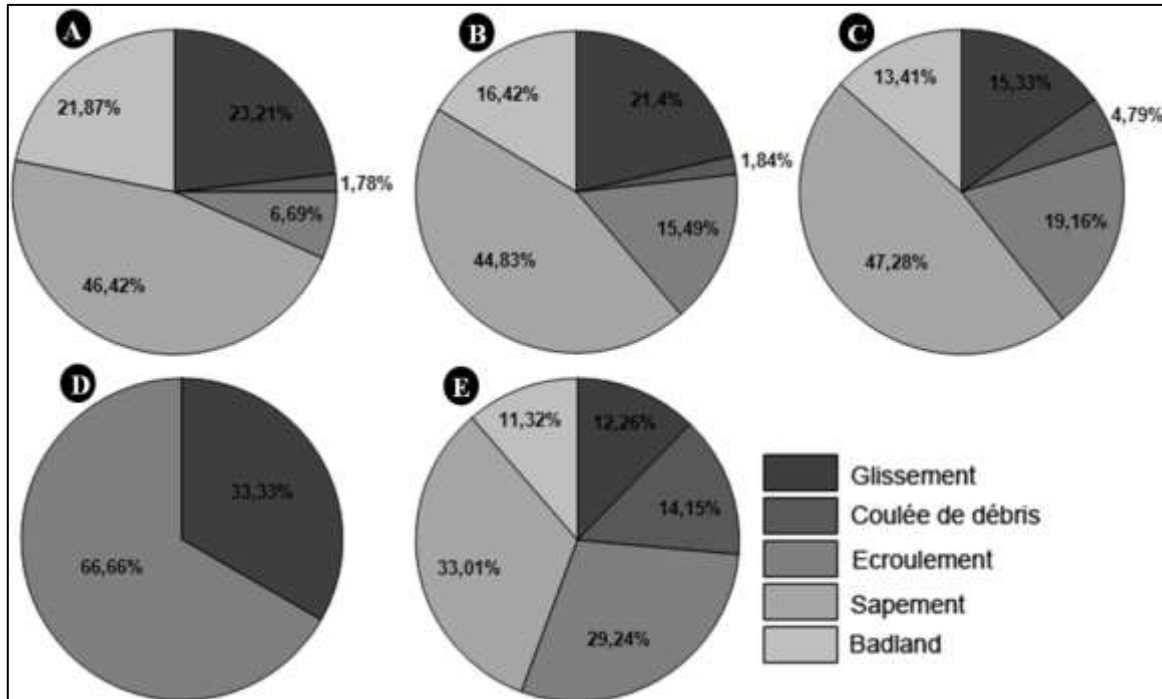


Figure V-31 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain par classe de degré de pente de la province de Chefchaouen; A : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de degré de pente 0 – 10° ; B : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de degré de pente 10 – 20° ; C : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de degré de pente 20 – 30° ; D : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de degré de pente 30 – 50° ; E : Fréquences des différents mouvements de terrain dans la classe de degré de pente 50 – 75°.

- Le coulées de débris montrent une évolution étroitement sensible à l'augmentation du degré de pente (Figure V-31A, B, et C) avec successivement 1.78%, 1.84%, 4.79% et puis atteindre un pic de fréquence avec 14.15% au niveau de la dernière classe de pente (50 – 75°). Ce comportement, démontre que la pente constitue en toute logique un élément fondamental d'érosion mais qui participe activement à la destruction progressive des reliefs (des massifs calcaires, quartzitiques ou gréseux dans notre cas) sous l'influence déterminante de la pesanteur et des agents climatiques, elle est responsable pour la préparation et le stockage d'un volume suffisant de matériel qui alimentera la coulée de débris lorsque les autres conditions hydrologiques sont réunies.

3.6.2. Relation avec l'hypsométrie

L'analyse générale de la relation mouvements de terrain – hypsométrie montre que ces derniers deviennent de plus en plus abondants avec l'altitude (Figure V-32A) et les précipitations. Si l'on essaye de faire un focus sur l'évolution de chaque type de mouvements, on note que les glissements, les sapements et les badlands (Figure V-32B, E, et F) se développent plutôt dans les premières classes hypsométriques où ils présentent plus que la

moitié des fréquences totales, que dans les dernières classes à hypsométries assez élevée. Quant aux coulées de débris et les écroulements ils se répandent d'avantage sur les zones à hypsométrie élevés, ce qui est tout à fait normal puisque ces deux familles de mouvement sont essentiellement conditionnées par la présence des massifs rocheux (Dorsale calcaire, et les barres quartzitiques et gréseuses).

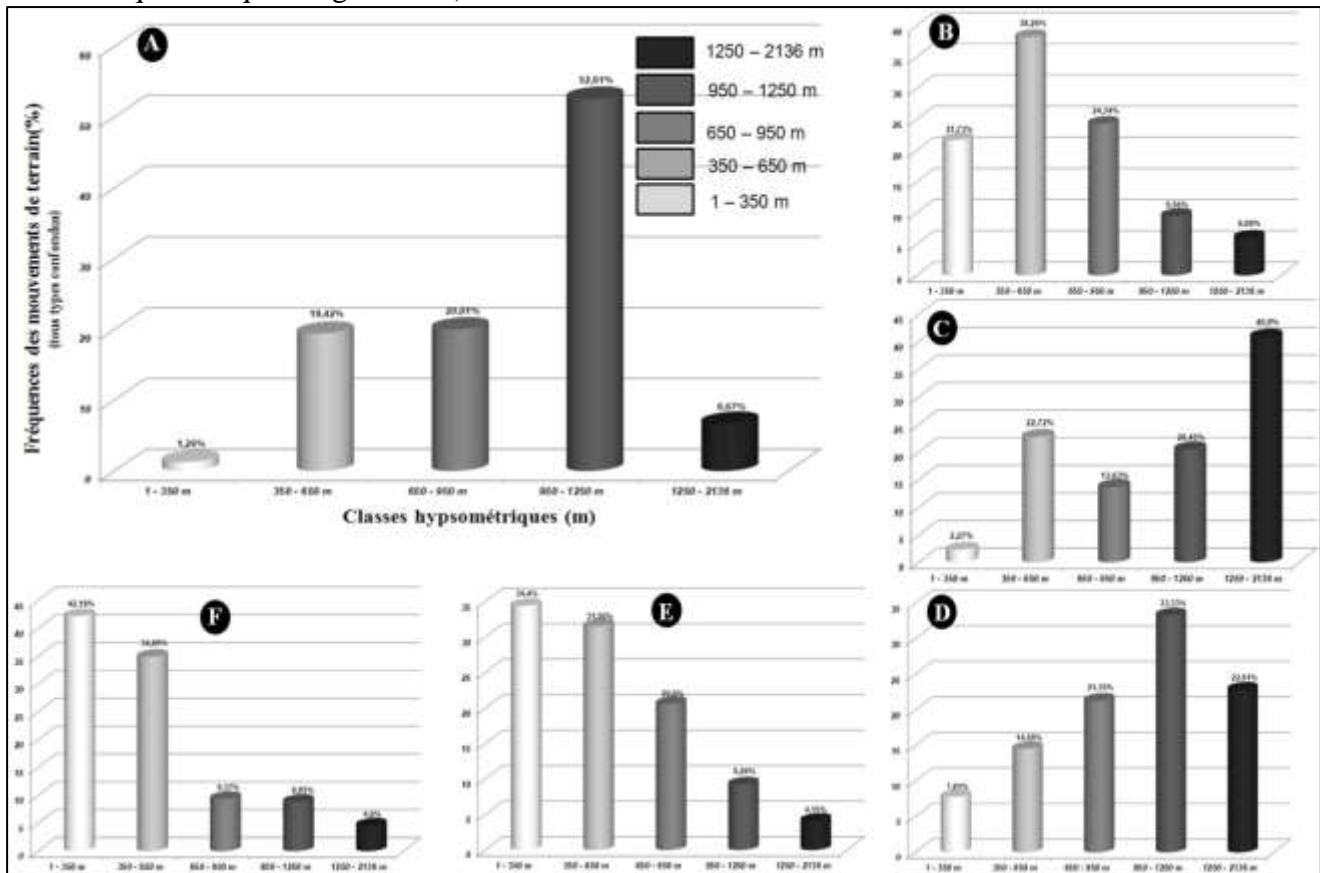


Figure V-32 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe hypsométrique (m) de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe hypsométrique ; C : Fréquences des coulées de débris par classe hypsométrique; D : Fréquences des écroulements par classe hypsométrique ; E : Fréquences des sapements par classe hypsométrique ; F : Fréquences des badlands par classe hypsométrique.

3.6.3. Relation avec l'exposition

Il est évident que la distribution spatiale des mouvements de terrain est étroitement corrélée avec l'exposition des versants d'une région donnée, puisqu'elle en contrôle en grande partie le régime hydrique et thermique (l'interception pluviale, l'évapotranspiration, l'écoulement en surface et/ou en profondeur, le type de végétation et d'enracinement, etc). Cependant et en temps normal, les versants les plus humides (les moins ensoleillés) sont les plus prédisposés pour la genèse des mouvements de terrain. Pour vérifier la validité de cette théorie dans notre secteur, une analyse de l'abondance des mouvements inventoriés en fonction du changement de l'orientation des versant a été effectuée (Figure V-33).

En regardant la figure V-33A qui résume les fréquences générales des MT par classe d'exposition, on remarque qu'il y a trois grandes classes d'orientation de versants qui recouvrent les fréquences les plus élevées en MT. Elles sont par ordre d'importance : l'exposition Nord, Sud – Ouest, et Ouest avec respectivement 15.58%, 15.08% et 14.57%,

alors que les fréquences les moins importantes se rencontrent sur les versants orientés Sud – Est (8.76%), Est (9.26%) et Nord – Est (11.54%).

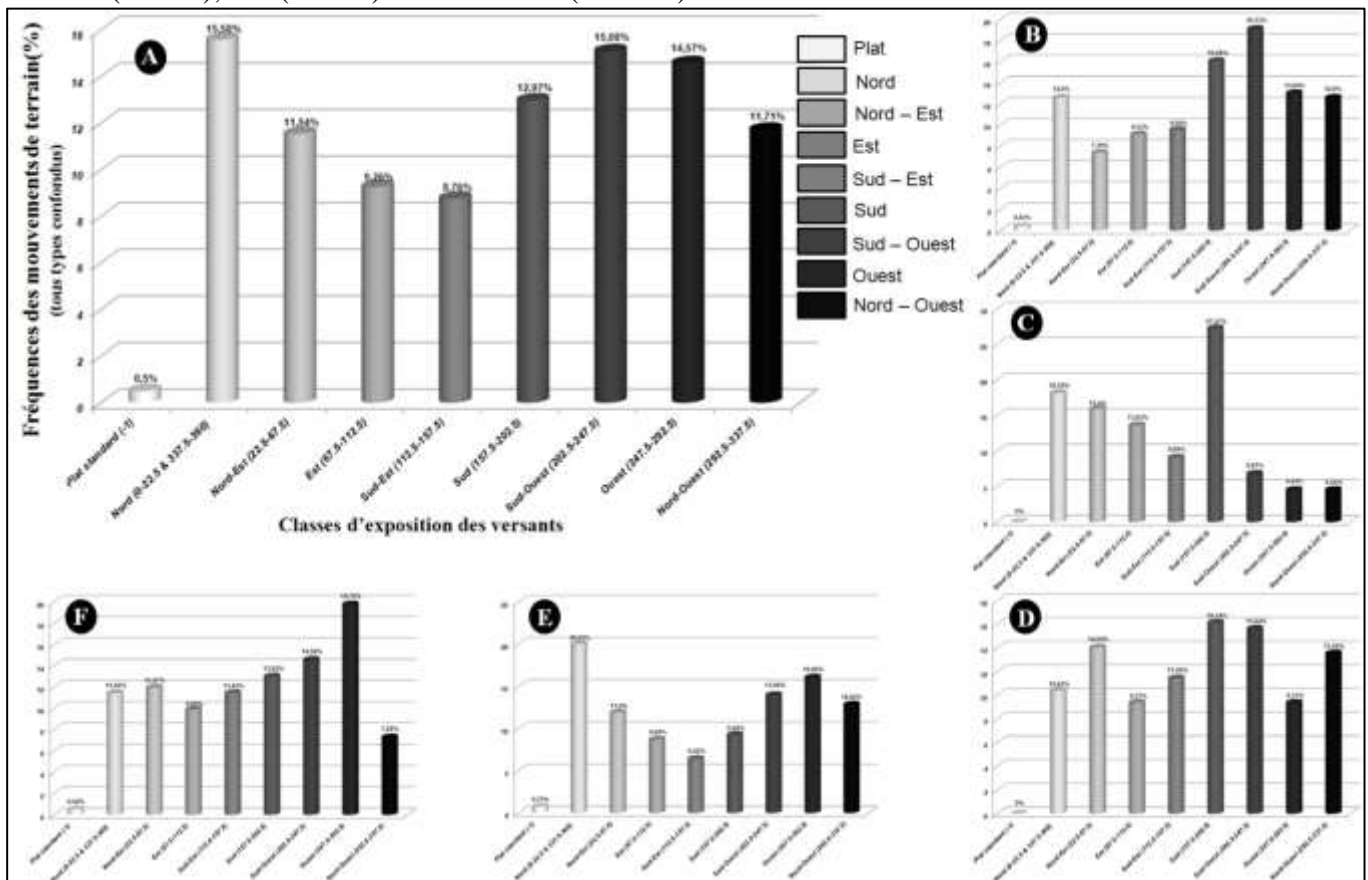


Figure V-33 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'exposition de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe d'exposition ; C : Fréquences des coulées de débris par classe d'exposition; D : Fréquences des écroulements par classe d'exposition ; E : Fréquences des sapements par classe d'exposition ; F : Fréquences des badlands par classe d'exposition.

Cependant, pour comprendre plus en détail la relation exposition – mouvements dans notre secteur plus en détail et connaître son impact spécifique sur chaque catégorie de phénomènes, nous avons établi des histogrammes qui illustrent les fréquences relatives des glissements (Figure V-33B), coulées de débris (Figure V-33C), écroulements (Figure V-33D), sapements (Figure V-33E), et les badlands (Figure V-33F) par rapport à chaque exposition, et il en ressort que :

- Les glissements se rencontrent au niveau de toutes les expositions des versants avec des fréquences assez comparables, mais avec un maximum pour l'orientation Sud – Ouest (19.13%). Cette valeur est tout à fait raisonnable si l'on évoque l'effet des principaux fronts de chevauchement orientés NE – SW et à vergence Sud – Ouest, au niveau desquels la plus part des glissements de la région Rifaine prennent naissance. En plus de l'effet de spécifique de ces failles régionales, il ne faut pas oublier l'incidence d'humidité cyclonique en provenance de l'Atlantique.
- Les coulées de débris et les écroulements atteignent le maximum de leur fréquence sur les versants orientés Sud, ce qui correspond aux versants dont les sommets sont formés par les massifs rocheux de calcaires, quartzites, et grès indispensables pour la

formation des coulées de débris et des écroulements, mais également aux alternances de gel-dégel plus importante et à une fonte brutale de neige en altitude.

- Pour le reste des phénomènes, y compris ceux décrits précédemment, ils présentent des fréquences élevées dans les versants complètement ou en partie orientés Nord, ou Ouest.

4. La variable : réseau hydrographique

4.1. Introduction

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

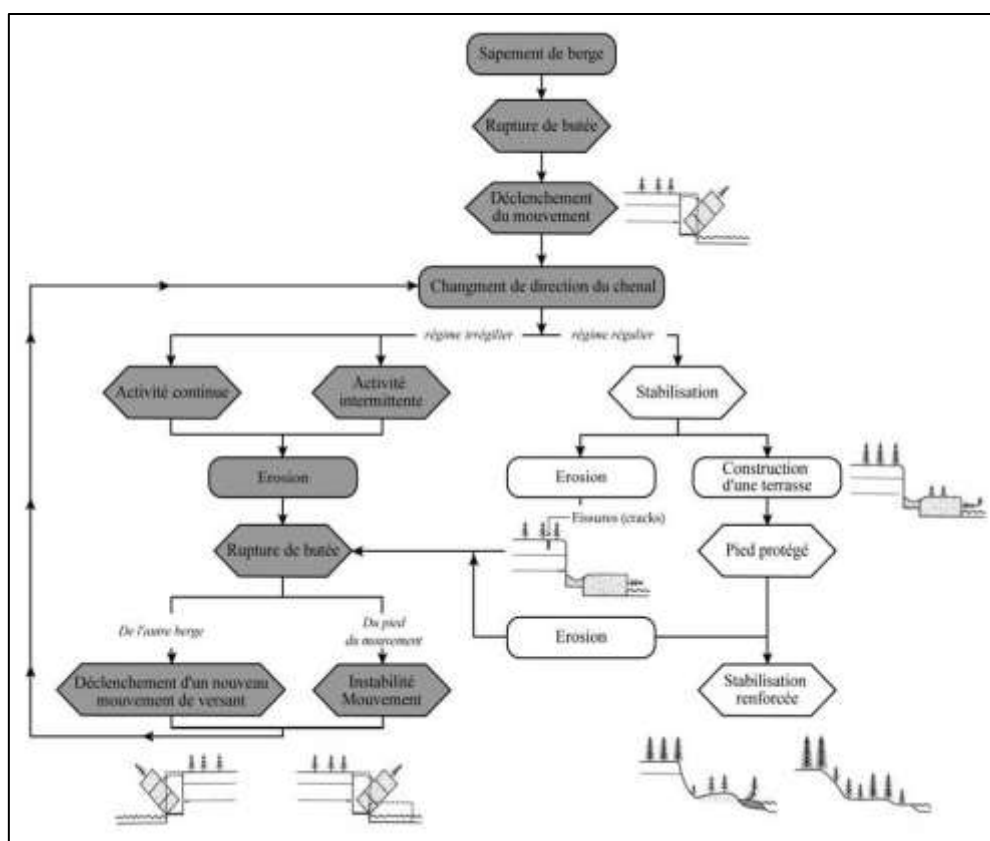


Figure V-34 : Schéma conceptuel de la relation torrents - mouvements de terrain (Dikau *et al.*, 1996 ; adapté par Thiery, 2007).

Les versants peuvent se trouver perturbés par les torrents, ce qui est considéré comme un important facteur d'instabilité. Le réseau de drainage par sa mobilité et son pouvoir érosif donne naissance à des perturbations notables et génère des instabilités sur les versants. Le ruissellement superficiel génère des zones d'intense ravinement (badlands) dans le cas de formations géologiques tendres. Il peut cependant avoir un effet déstabilisant par sapement de berges. Il en résulte le déclenchement d'un nouveau mouvement de versant ou sa réactivation s'il s'agit d'un mouvement stabilisé. Les conséquences de l'érosion par torrents sur les versants que ce soit dans le cadre d'un rythme érosif régulier ou irrégulier sont illustrées dans la figure V-34.

4.2. Les eaux souterraines

Dans la province de Chefchaouen, à l'exception des terrains occupés par la Dorsale Calcaire et la plaine côtière de l'oued Laou, la présence d'aquifères souterrains semble être limitée, puisque la majeure partie du secteur d'étude est entaillée dans des terrains imperméables comme les flyschs et marno-schisteux ou plus rarement des terrains de nature cristalline. Seules les formations carbonatées karstifiées appelées « châteaux d'eau » de la chaîne calcaire et les plaines alluviales bénéficient d'aquifères importants. Ainsi les eaux souterraines ne seront pas incluses dans l'analyse de la susceptibilité et de l'aléa mouvements de terrain, puisqu'elles ne sont pas généralisées sur tout le secteur d'étude, et d'autant plus que la Dorsale calcaire, principal réservoir très fracturé et karstifié, permet la résurgence de ses eaux en surface en plus d'un ruissellement limité.

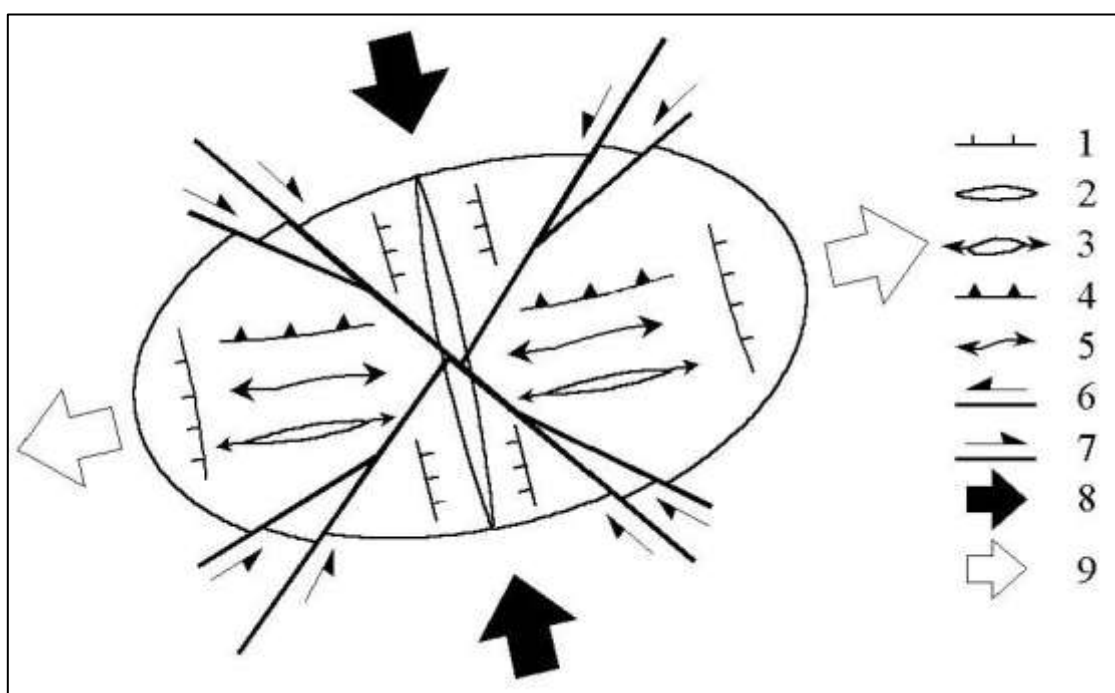


Figure V-35 : Modèle de circulation des eaux dans le domaine rifain interne dans les conditions de la déformation actuelle. Fractures ouvertes : 1- Failles normales ; 2- Fente de tension ; 3- Fente d'extrados. Fractures fermées : 4- Failles inverses ; 5- Plis faillés. Fractures semi-fermées, semi-ouvertes : 6- Décrochement senestre ; 7- Décrochement dextre ; 8- Axe de compression σ_1 (N167) ; 9- Axe de distension σ_3 (N077), d'après Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003.

Un modèle de circulation des eaux en relation avec les épisodes tectoniques cassants a été proposé pour la première fois par [Grillot & Almeida, 1982](#) ; pour décrire le lien entre les systèmes aquifères karstiques des calcaires méso-cénozoïques de l'Algarve en Portugal, et les phases de compression – distension actuelles. Cependant, lors du 21ème congrès de l'Association Internationale des Hydrogéologues d'autres spécificités en été rajoutées au modèle initial ([Shouyune et al., 1988](#) ; [Buachidze et Kiknadze, 1988...etc](#)) au modèle initial.

A ce même propos, la circulation des eaux dans le Rif en relation avec déformation actuelle a été abordée par [Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003](#), et [Sossey Alaoui, 2005](#) et, peut se résumer comme dans la Figure V-35. Il faut noter que ce même

modèle est généralement valable aussi bien pour les roches calcaires ou d'autres natures à condition qu'elles soient fracturées et/ou suffisamment diaclasées, comme c'est le cas pour le bassin de Barcelonnette situé dans les Alpes de Haute Provence au Sud – Est de la France (Le Mignon, 2004 ; Maquaire, 2002 ; Le Mignon et Cojean, 2002 ; Flageollet et al., 1999).

D'après les auteurs marocains (Ait Brahim et Sossey Alaoui, 2003 ; Sossey Alaoui, 2005), la contrainte compressive principale (σ_1) et la contrainte d'extension horizontale (σ_3) actuelles auraient respectivement les directions N167±10, et N077 ± 10. Pour eux, le comportement hydraulique de chaque famille de fractures dépend de l'orientation de cette dernière par rapport à σ_1 . Les fractures parallèles à σ_1 , se comporteraient comme des fractures ouvertes (fentes de tension ou failles normales) favorisant les transferts des eaux. Celles perpendiculaires à σ_1 (N077 ± 10), auraient un comportement de fractures fermées, ce qui rend très difficile la circulation de l'eau. Les fractures de direction NE-SO et NO-SE, auraient un comportement hydraulique plus imprévisible (semi fermées ou semi ouvertes).

4.3. Les eaux de surface

4.3.1. Document de base et type du réseau hydrographique

A l'échelle du secteur d'étude voir même celle de tout le Rif nord – occidental, l'essentiel des ressources en eau est constitué des eaux de surface. 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, il présente généralement un caractère torrentiel (Chaouni, 1999 ; Sossey Alaoui, 2005). Les écoulements des oueds, se caractérisent donc par l'importance des débits spécifiques journaliers des crues en hiver et par des débits d'étiages faibles ou nuls.

La préparation tectonique du réseau hydrographique de la région d'étude a été préalablement bien détaillée dans le chapitre 3 (section 3.3). Concernant le type du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen, il est généralement dendritique (terrains imperméables) en se basant sur la classification descriptive proposée par Le Pape en 1998.

4.3.2. Comment intégrer le réseau hydrographique ?

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

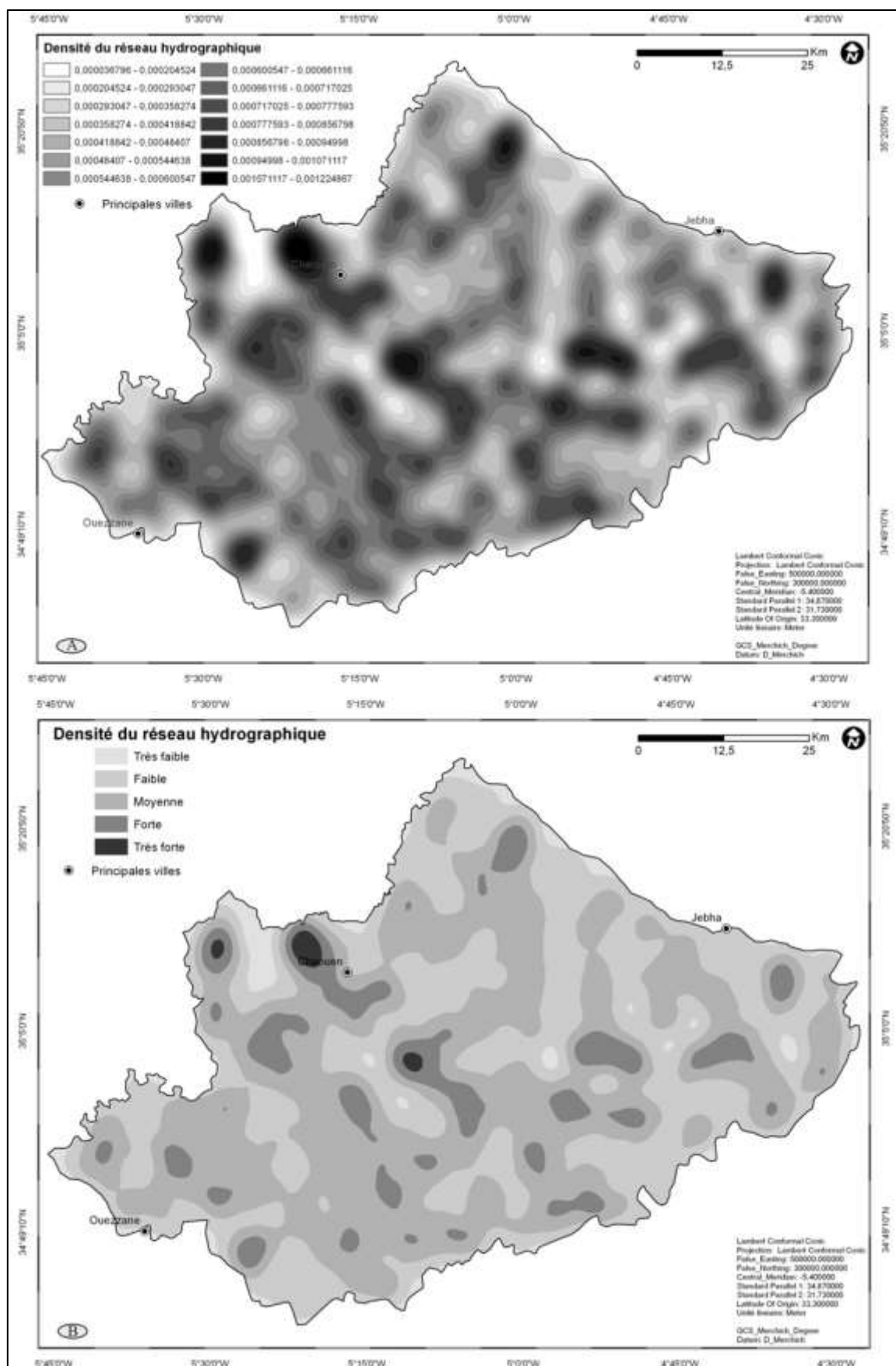


Figure V-36 : Cartes de densité du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen. A : Carte initiale avec 14 classes obtenues automatiquement ; B : Carte reclassifiée en 5 classes (très faible, faible, moyenne, élevée, et très élevée).

Cela, nous a permis de retenir qu'il n'existe entre les auteurs à l'heure actuelle aucun accord sur les paramètres à intégrer, leur nombre minimal et/ou maximal, leurs spécificités, la façon dont ils doivent être hiérarchisés...etc.

En revanche, seuls deux auteurs (Melchioore et al., 2011 ; Das et al., 2010) ont abordé ce facteur en prenant en considération sa densité. Pour nous, raisonner en terme de distance par rapport au réseau de drainage revient à exclure l'effet généralisé que peut avoir ce dernier sur les versants du secteur d'étude, que ce soit par son pouvoir torrentiel, érosif, d'infiltration, d'évapotranspiration, déstabilisateur des formations superficielles...ou autre. De la même façon, un tel choix peut être justifiable dans la mesure où seuls des mouvements de terrain déclenchés le long des berges des cours d'eaux ou à proximité de ceux-ci sont pris en compte et intégrés dans l'analyse. Ce n'est pas du tout le cas pour notre recherche. Pour cette raison, le réseau hydrographique sera incorporé dans notre étude via sa densité, telle que définie par Horton, 1945. Elle sert à matérialiser le degré de développement d'un réseau hydrographique, par le calcul de longueur totale (Km) 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.

4.4. La densité du réseau hydrographique

La densité telle que nous l'avons défini précédemment pour le paramètre fracturation ou tout élément linéaire, correspond au kilométrage linéaire cumulé des cours d'eau reconnus par unité de surface (km²). Elle est calculée à l'aide du module *Spatial Analyst Tools* d'ArcGis 10, via la fonction *Line Density*. La carte de densité réalisée (Figure V-36B) tient compte aussi bien de la longueur cumulée du réseau de drainage, que de la présence des nœuds hydrographiques (affluents et confluents). Cette carte a été élaborée en 5 classes de densité par rééchantillonnage et simplification de la première carte obtenue automatiquement (Figure V-36A). Cette dernière, est rendue plus lisible par reclassification des 14 classes en 5 classes de densité, à savoir : très faible ; faible ; moyenne ; élevée ; et très élevée.

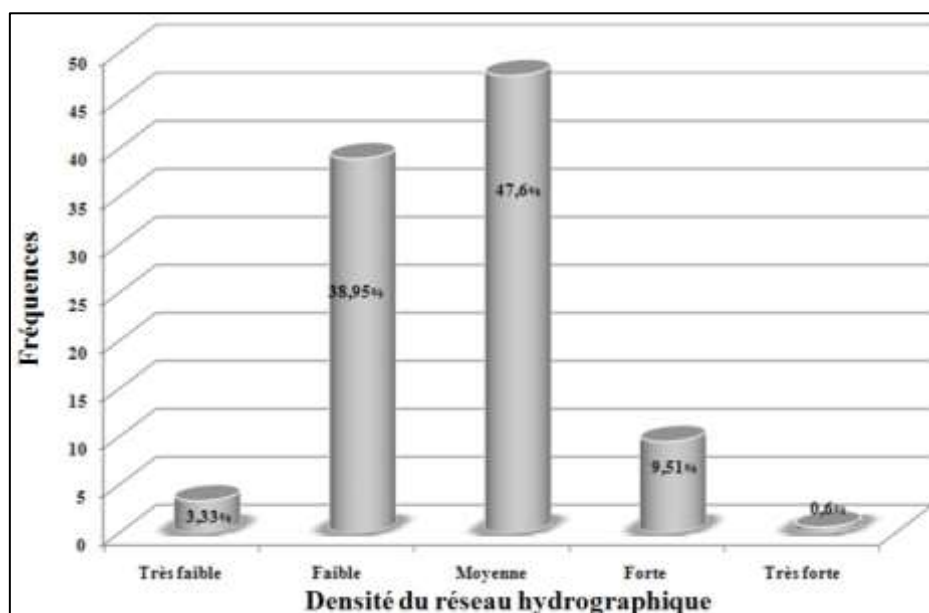


Figure V-37 : Fréquences des différentes classes de densité du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen.

La figure V-37 montre les fréquences relatives de chaque classe de densité du réseau de drainage. Les deux classes à densité faible et très faible couvrent à elles seules environ 43% de la superficie globale du secteur d'étude. La classe à densité très forte est presque négligeable en se limitant à moins de 1% des fréquences totales. Quant à la densité moyenne et celle forte, elles occupent avec 57% plus que la moitié de la zone d'étude. Cette distribution semble être liée au caractère juvénile du réseau de drainage conditionné par un style tectonique actif, dans le cadre du rapprochement des deux plaques tectoniques Afrique – Europe.

4.5. Dynamique des eaux et dégradation des sols

Le secteur d'étude est sillonné par plusieurs oueds dont la longueur totale est de l'ordre de 3020 Km. ceux-ci, ne comportent pas de lits majeurs mais possèdent des lits mineurs épisodiques, qui sont délimités la plus part du temps par des berges instables. Au cours de la période hivernale et lors des pluies exceptionnelles, l'activité hydrodynamique du réseau de drainage s'intensifie en catalysant le déclenchement des sapements et des écroulements de berges. Ils peuvent aussi réactiver d'anciens glissements scelés, notamment dans les concavités des méandres.

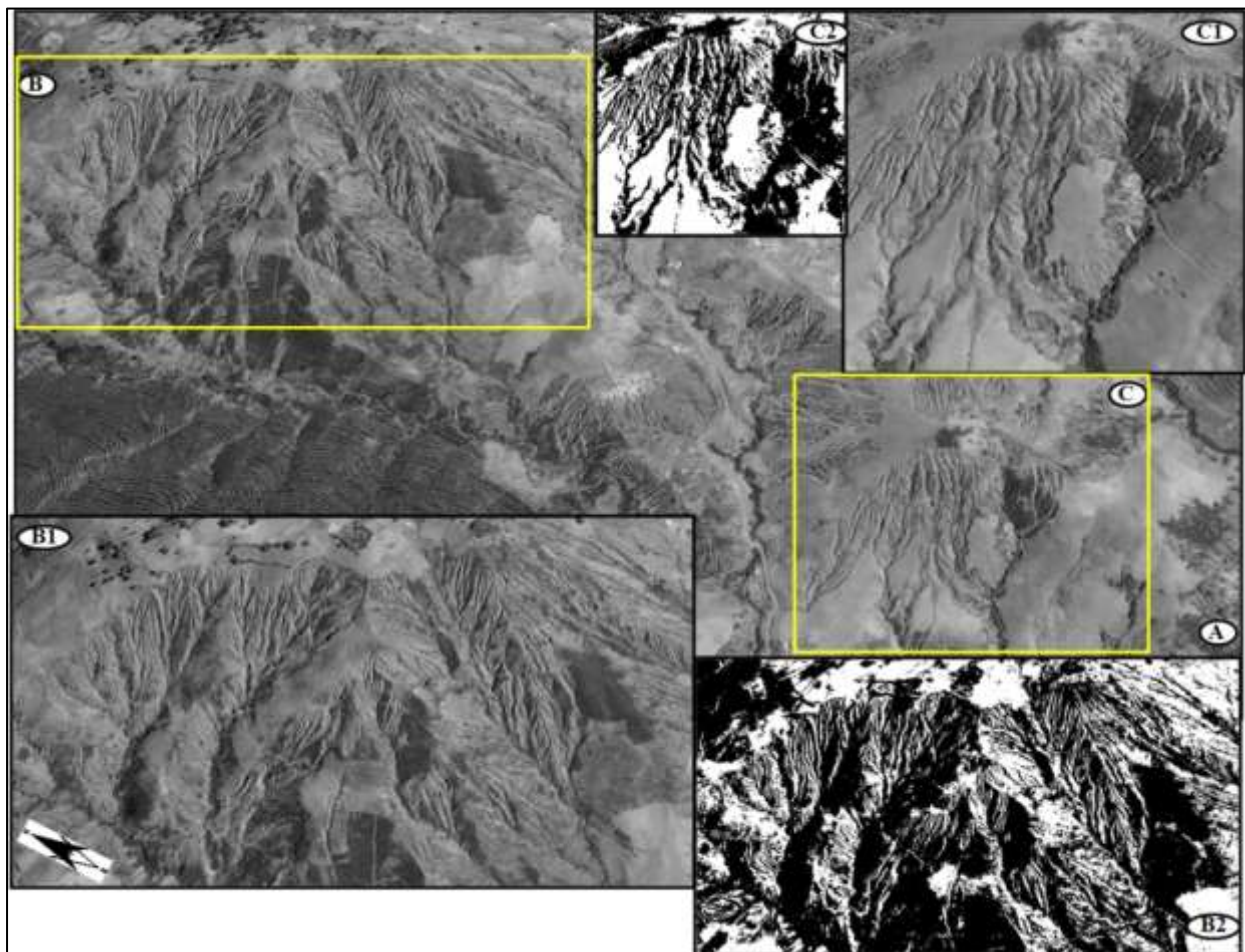


Figure V-38 : A : Vue d'ensemble d'un paysage en badlands de la région d'Ouazzane ; B et C : sections de badlands entaillées dans les formations péliques de Zoumi, avec leurs zooms respectifs B1 et C1. B2 et C2 : étant leurs filtres respectifs montrant l'intensité de la dégradation par ravinement subie par les versants.

Au comportement torrentiel des eaux de surface, s'ajoute la lithologie dominante. Comme nous l'avons précédemment décrit au début de ce chapitre, la plus grande partie de notre secteur d'étude, est constituée par l'UG5, formée essentiellement par les marnes de l'unité de Tanger (interne et externe), de l'unité mésorifaine interne, l'unité d'Izarène et celles de l'unité de Loukkos. Ce sont des argiles ou des faciès argileux-schisteux qui affleurent en surface et qui limitent la percolation en profondeur des eaux, favorisant leur écoulement torrentiel en surface. Le résultat est une érosion généralisée sur l'ensemble des versants qui subissent un ravinement en *badlands* (Figure V-38). La formation de nouvelles ravines peut déclencher des coulées, comme on peut le remarquer sur les formations les plus argileuses du domaine interne.

D'autres facteurs sont mis en jeu, tels que – 1° l'extension accélérée de l'agriculture sur des terres de plus en plus raides et marginales, - un déboisement accru et - la négligence des pratiques agricoles traditionnelles en montagne et le caractère rudimentaire de ces pratiques, - 2° le contexte compressif (surrection) de la chaîne rifaine...etc. Cela aboutit à une dégradation des bassins versants et à des pertes en terres arables dans le Rif nord – occidental ; elles dépassent de loin les seuils de tolérances soutenables au Maroc nord (Ait Brahim et al., 2002 ; Sossey Alaoui, 2005).

1.1. Discussion : les interrelations du réseau hydrographique avec les MT

Le réseau hydrographique, par sa densité exprime plusieurs processus physiques, parmi lesquels la part relative de l'écoulement de surface (superficiel), l'écoulement souterrain et même la vigueur des reliefs. Pour comprendre l'implication sur le conditionnement des mouvements de terrain de ces phénomènes hydrologiques qui se résument dans notre secteur d'étude par la densité du réseau hydrographique (DRH), nous avons procédé à l'intersection et la superposition des phénomènes inventoriés avec la carte de DRH, afin de recueillir leurs fréquences générales et relatives. Ainsi, la figure V-39A illustre l'abondance des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de DRH de la province de Chefchaouen. Elle montre que les hautes fréquences des mouvements de terrain sont propices au niveau de deux classes de DRH, à savoir la DRH moyenne avec 53.41% de la totalité des instabilités recensées, et puis la classe à faible DRH avec 37.32% des phénomènes inventoriés. La même remarque est globalement vérifiée pour chaque famille spécifique de mouvements de terrain (Figure V-39B, C, D, E, et F) avec toujours plus de 80% de la globalité des mouvements qui se situent au niveau des deux classes de densité moyenne et faible.

Cela pourrait paraître anormal, que les mouvements ne sont pas concentrés dans les secteurs où la densité est élevée à très élevée or que ce n'est pas le cas. Cela se justifie par le fait que la classe à forte densité couvre une superficie qui atteint à peine 10% de la totalité de la zone d'étude, alors que les secteurs à très forte densité sont pratiquement inexistant, ce qui est dû au caractère intermittent des cours d'eau, et qui laisse croire que le réseau hydrographique de la région contrôle l'occurrence des mouvements de terrain beaucoup plus par les processus d'infiltration et de circulation souterraine, ainsi que par sapement lors des périodes notablement pluvieuses.

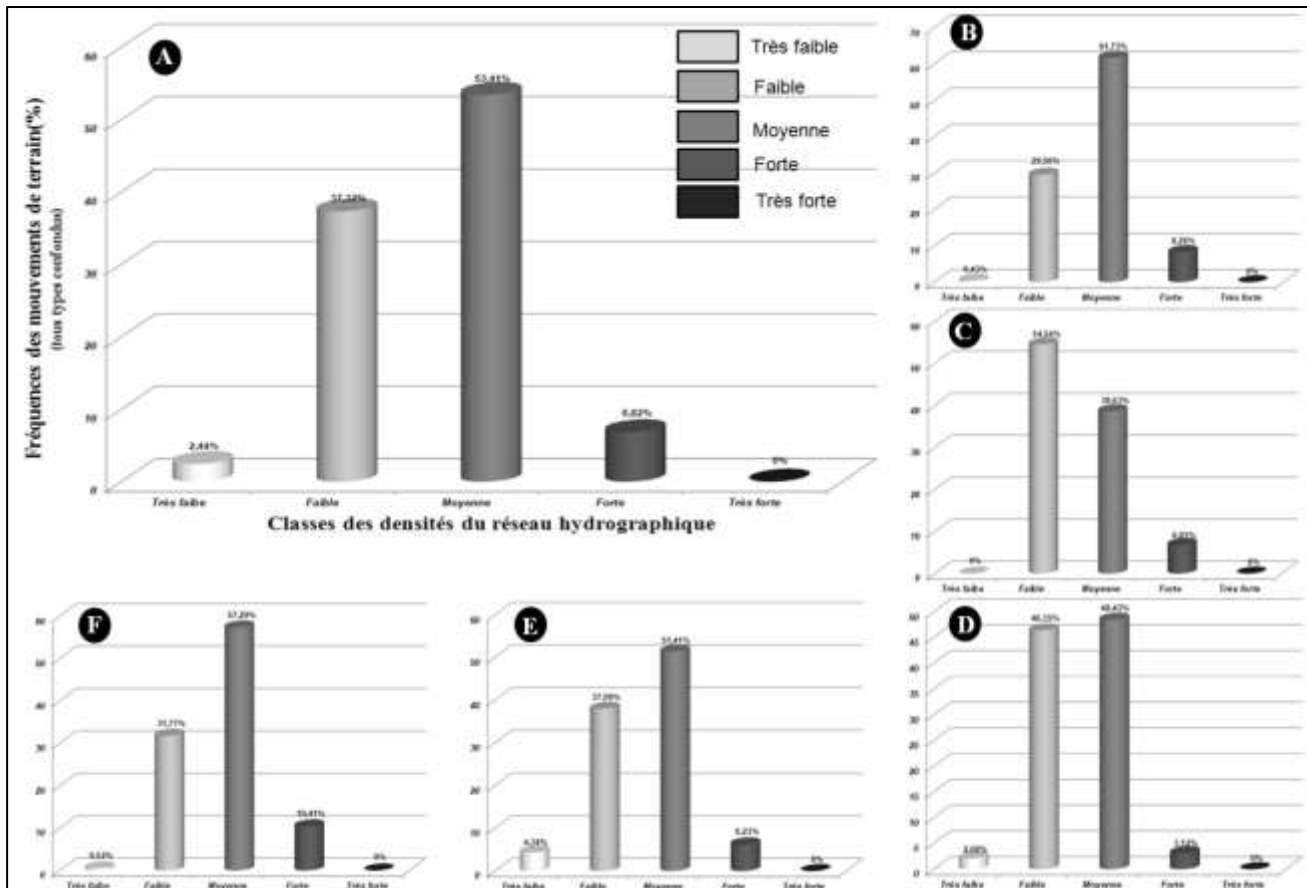


Figure V-39 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité du réseau hydrographique (DRH) de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe de DRH ; C : Fréquences des coulées de débris par classe de DRH; D : Fréquences des écroulements par classe de DRH ; E : Fréquences des sapements par classe de DRH ; F : Fréquences des badlands par classe de DRH.

5. La variable : Précipitations

5.1. Caractéristiques générales

La chaîne Rifaine est caractérisée par une opposition climatique fondamentale, entre les deux versants méditerranéen et atlantique. Elle se traduit par une brutalité des précipitations plus élevée sur le versant Atlantique que le méditerranéen, une grande variabilité des températures, la diversité du couvert végétal...etc. Cependant, en fonction des facteurs géographiques, de l'altitude, du volume montagneux, de l'exposition des versants et de plusieurs d'autres paramètres, c'est l'une ou l'autre, des influences méditerranéennes, océaniques ou continentales qui l'emportent. Notre secteur d'étude, s'étendant sur toute une région, de la ville de Jebha au Nord – Est à la ville d'Ouazzane au Sud – Ouest, il peut être subdivisé en deux sous régions climatiques, séparées par une barrière naturelle de haute montagne :

1° un climat humide et doux de la basse montagne, de la région s'étalant du pied de la Dorsale Calcaire et les crêtes des nappes de Kétama et celle de Tisirène, jusqu'à la région d'Ouazzane. Cette région dont l'altitude moyenne se maintient en dessous de 1000 m, l'hiver, est très humide puisque le total des précipitations est compris entre 800 et

1200mm. Les périodes pluvieuses sont prolongées et très abondantes, avec un maximum principal qui atteint 1500 mm durant les mois de novembre, décembre, et janvier. Elles induisent une intense érosion des sols avec un ravinement intense (badlands) (Figure V-38) comme c'est le cas pour le secteur de Zoumi (Chapitre 7).

2° un climat méditerranéen, caractérisé par un été chaud et sec et un hiver subhumide et froid; caractérisant la région s'étendant de la partie de haute montagne de la Dorsale Calcaire et les nappes de Kétama et celle de Tisirène. Les régions les plus basses de ce versant méditerranéen se caractérisent par contre par une plus grande sécheresse avec des précipitations comprises entre 300 et 400 mm, rendant les cultures sèches en la limite de possibilités.

En plus de ces deux principales subdivisions climatiques, il faut également distinguer un climat très humide et frais dans un domaine géographiquement très restreint. Il se limite aux crêtes qui culminent entre 1500 et 2000m d'altitude présentes essentiellement entre les deux régions de Bab-Taza et Bab-Berred.

5.2. Analyse des données de précipitations

5.2.1. Caractéristiques temporelles des précipitations

Pour décrire les caractéristiques temporelles des précipitations, nous avons pris comme exemple la localité de Chefchaouen, étant la plus représentative de la province de Chefchaouen. Les données des précipitations utilisées ont été fournies par le ministère de l'agriculture et de la pêche maritime

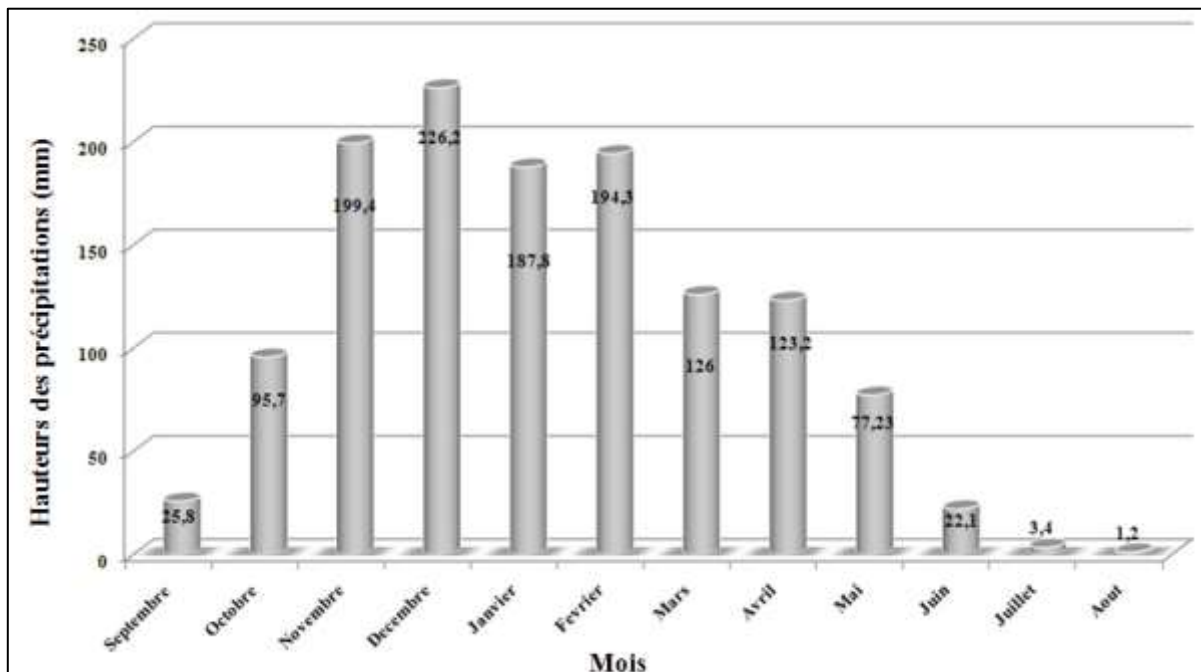


Figure V-40 : variations des précipitations moyennes mensuelles de la station météorologique de Chefchaouen entre 1941 et 2011.

Nous avons établi deux types de diagrammes. Le premier (Figure V-40), représente les précipitations moyennes mensuelles calculées sur les dernières soixante-dix ans (entre 1941 et 2011). Il montre que les maximas pluviométriques se situent en général en

novembre et décembre, avec un maximum secondaire en janvier et février. Les mois les plus secs sont toujours juillet et août, ce dernier recevant néanmoins, surtout sur les reliefs, quelques orages qui peuvent être violents, suite à la présence des nuages orographiques enclavés entre les sommets.

Le second diagramme (Figure V-41) présente les variations interannuelles des hauteurs des précipitations sur la même période (70 ans). Il montre une certaine alternance, sans périodicité régulière, entre les périodes à forte précipitations et celles à faibles à très faibles précipitations. Cependant, sept périodes humides alternées par d'autres moins humides peuvent être reconnues, tout en signalant éventuellement la résurgence de phases bi- à tri-annuelles relativement humides perturbant la tendance générale.

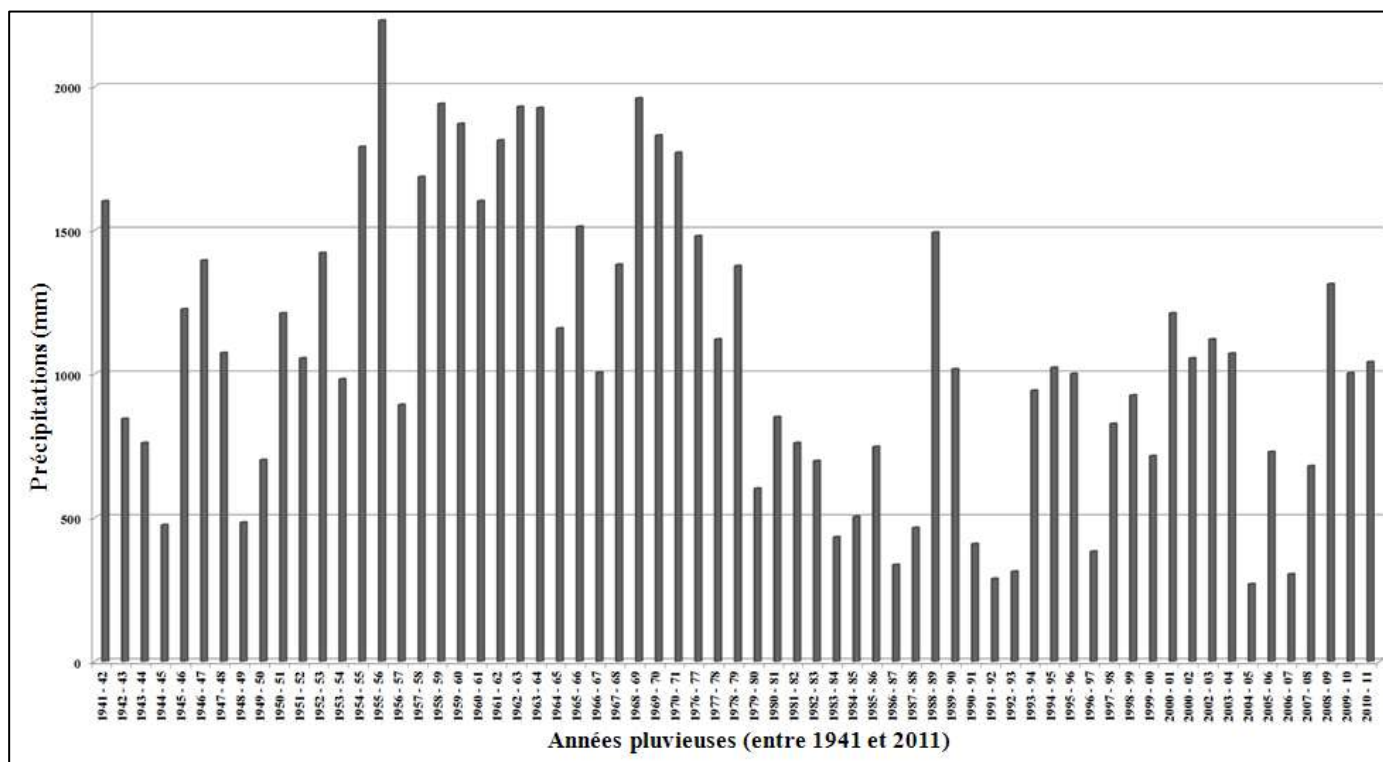


Figure V-41 : variations interannuelles des hauteurs des précipitations de la station météorologique de Chefchaouen.

Une première année est très humide, avec un maximum annuel de 1601.7 mm correspond à l'année hydrologique 1941 – 1942. Une période plus sèche limitée à 475 mm a succédé à cette phase. Une seconde période humide démarre en 1951 et va perdurer jusqu'en 1980, avec un pic annuel de 2230mm pour la période 1955 – 1956. Cet épisode très pluvieux est suivi d'une baisse des P-ann qui a atteint 483mm en 1983. La période 1980 – 1988 se distingue par un déficit considérable des P-ann, période récente la plus longue correspondant à la sécheresse des années 80. Cette sécheresse a marqué la mémoire de tous les Marocains partout dans le pays puisque nos parents nous en parlent encore. Juste après, une reprise des précipitations entre 1989 et 1991, en enregistrant deux maxima successifs de 1492 mm et 1017 mm, et suivi d'une nouvelle année sèche : 288 mm en 1992. A partir des années 1983 et jusqu'en 2011, la province de Chefchaouen subit une nouvelle et longue phase pluvieuse avec des maximums qui varient entre 800 et 1300mm. Cette période longue et relativement humide a été traversée par trois courtes phases à pluviosité réduite, en 1996 – 1997, 2004 – 2005, et 2006 – 2007, correspondant

respectivement des maximums annuels de 382, 269, et 275 mm, ce qui s'explique très clairement par les indices NAO négatifs de ces périodes (voir plus loin).

5.2.2. Rôle des pluies

Le paragraphe précédent montre, qu'aux variations spatiales des précipitations, s'ajoutent les variations temporelles qui ont un enjeu tout aussi conséquent. En moyenne, il pleut 78 jours par an. Ces jours de pluie peuvent être continus, avec des pluies torrentielles pendant plusieurs jours. Elles alimentent dans la Dorsale Calcaire très fracturée, un réseau karstique développé et ancien qui à son tour alimente les formations sous-jacentes (marnes, marno-calcaires, schistes, argiles...). La cause la plus importante dans la genèse des mouvements n'est pas la quantité de pluies annuelles en elle-même, mais plutôt la conjonction, sur une même "année pluvieuse" de plusieurs phénomènes, dont l'intensité et le rythme des précipitations. Lorsque plusieurs mois successifs concentrent des précipitations dépassant les 900mm en trois mois (novembre, décembre, et Janvier), avec P mensuelles supérieures à la moyenne, ces précipitations ont un effet morphogénétique certain comparé à une même pluviosité répartie sur toute l'année. Cette concentration exceptionnelle s'est produite les années 1947, 1979, 1989, 2001, et 2009. Ainsi, même avec un décalage de quelques mois déficitaires, les effets des pluies sont cumulatifs. Les pluies qui tombent sur un terrain saturé en profondeur et sec en surface trouveront une infiltration facilitée en surface (retrait) et déclencheront des mouvements. C'est le cas pour le glissement de Bou Halla qui a rejoué dès les premières précipitations de la période pluvieuse de 2009 – 2010, et ceux des régions avoisinantes où la chaussée de la route Nationale 2 a été carrément démolie.

Des pluies intenses concentrées sur une courte période de l'année accroissent également la capacité érosive des oueds et rivières, en donnant naissance à des phénomènes de sapements de berge (charge hydrostatique), des badlands sur les formations tendres (nappes de flyschs, Tisirène, Chouamate, Kétama, Tanger..), des écroulement et chutes de blocs par détente des escarpements des falaises, notamment au niveau de la Dorsale Calcaire et les massifs gréseux en particulier de la région de Zoumi. Elles peuvent aussi saturer les terrains sur une forte épaisseur, ce qui augmente la charge hydraulique des versants, diminue leur résistance au cisaillement et génère des instabilités donnant lieu à d'important mouvements de terrain.

5.2.3. Réalisation de la carte des précipitations

La carte des précipitations a été réalisée par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles, calculées sur l'ensemble des données que nous avons pu avoir, soit 70 ans (1941 – 2011). Cependant, il serait judicieux de mentionner que le nombre des stations météorologiques reste insuffisant pour effectuer une étude climatique très fine, que ce soit pour l'ensemble du secteur Rifain, ou notre zone d'étude d'une façon plus précise. Pour cette raison, et en plus des stations situées dans l'aire d'étude, nous avons intégré les données pluviométriques des stations météorologiques situées en dehors de notre secteur d'étude (Figure V-42), afin de limiter l'effet du faible nombre de stations sur l'interpolation à effectuer.

Cependant, nous sommes passés par quatre types d'interpolation pour obtenir notre carte finale, à savoir :

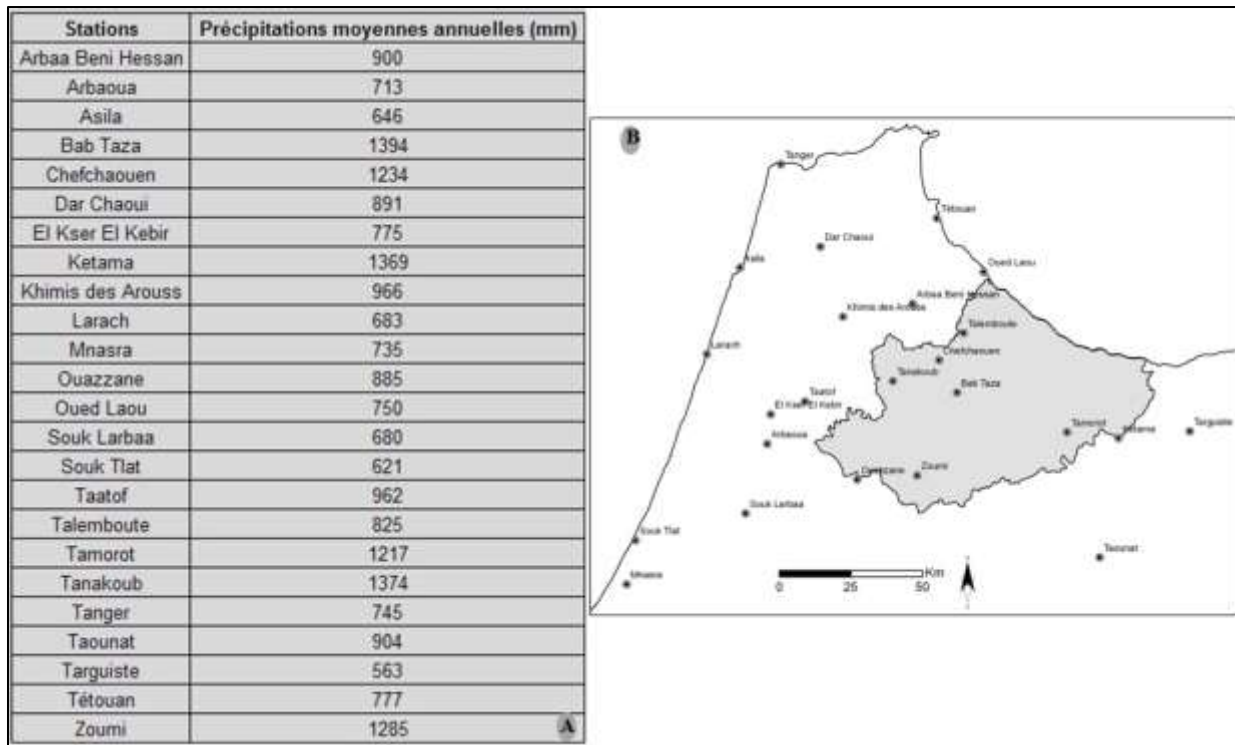


Figure V-42 : A : Stations météorologiques et précipitations moyennes mensuelles intégrées dans l'interpolation, et B : leur positionnement géographique.

- i. **L'Interpolation polynomiale globale (IPG)** (Global polynomial interpolation, GPI), qui est une technique qui permet l'interpolation d'un type de données par polynôme. Cela, en partant de points qui ont des valeurs données (en occurrence les précipitations), pour obtenir des polynômes qui passent par tous ces points, ces polynômes correspondent à des polygones dans notre cas. La fonction mathématique de cette méthode est largement décrite dans les guides mathématiques. La carte obtenue par cette voie, présente les classes des précipitations par des zones rectangulaires (Figure V-43A), ce qui nous a vite poussés à écarter ses résultats, et appliquer ;
- ii. **L'Interpolation polynomiale locale (IPL)** (Local polynomial interpolation, LPI), par opposition à la IPG qui effectue l'interpolation à l'aide de la même formule pour tout le secteur d'étude, se base sur plusieurs formules, dont chacune est optimisée et adaptée pour une partie donnée du secteur. La forme du calcul par voisinage, et le nombre minimum de points, peuvent être paramétrés. Ainsi, les résultats obtenus par l'IPL sont généralement beaucoup plus proches de la réalité que ceux produits par l'IPG, comme c'est le démontre la Figure V-43B. Toutefois, cette carte contient des irrégularités linéaires, que l'on remarque en direction N – S passant par Chefchaouen, à NNE – SSW à l'est de cette région. Au sud de Ouazzane, nous remarquons une irrégularité de direction NE – SW. Pour ce, nous avons appliqué ;
- iii. L'Interpolation à noyaux (IN) (Kernel interpolation, KI), qui représente la variante du premier ordre de l'IPL. En se basant sur des techniques de régression rigides, elle permet de corriger les erreurs qui peuvent résulter des instabilités de calculs par l'IPL (Figure V-43C). Néanmoins, les résultats obtenus ne se comparent que très grossièrement à la varié distribution des précipitations de la région, et c'est pourquoi, nous avons eu recours à l'application de ;

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

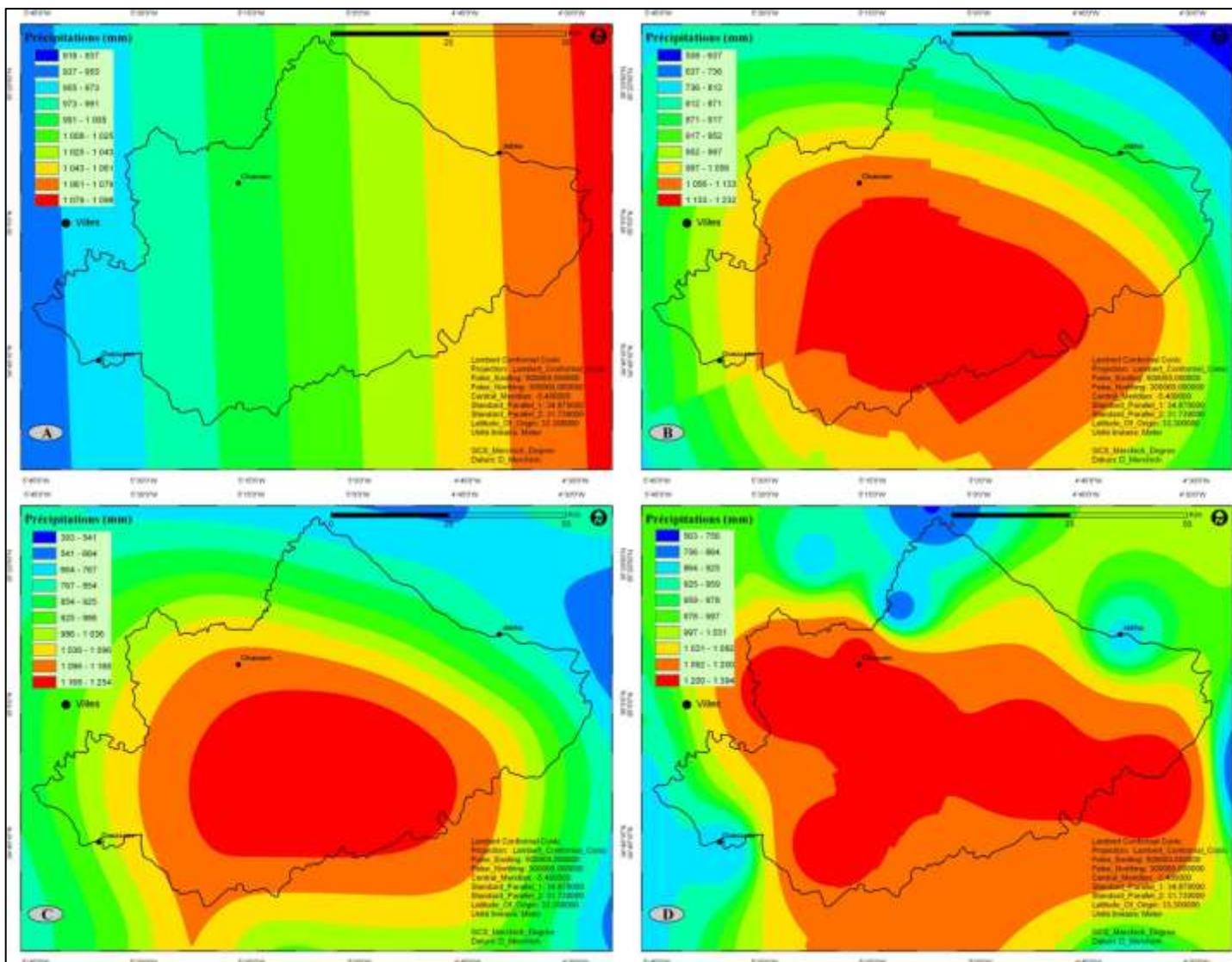


Figure V-43 : Carte des précipitations du secteur d'étude. A : interpolation polynomiale globale ; B : interpolation polynomiale locale ; C : interpolation Kernel ; et D : interpolation IDW.

- i. **L'Interpolation par pondération de l'inverse de la distance (IPID)** (Inverse distance weighted interpolation, IDWI). Il s'agit d'une méthode d'interpolation spatiale qui permet d'attribuer des valeurs à des aires non connues à partir d'un minimum de points connus. **Elle s'avère donner des résultats plus cohérents que les précédents**, puisque la carte obtenue traduit la distribution des précipitations généralement en accord avec le changement du relief de la province de Chefchaouen (Figure V-43D), et fait ressortir deux zones à faibles précipitations sur la façade méditerranéenne du secteur d'étude, précisément au niveau de la zone de Jebha et l'alignement de la vallée de l'Oued Lao, ce qui semblent être en relation avec l'effet de foehn¹⁴. La carte obtenue par IPID, en sera extraite la partie couvrant le secteur d'étude (Figure V-44) à l'aide du module spatial analyst tools d'ArcGis 10.

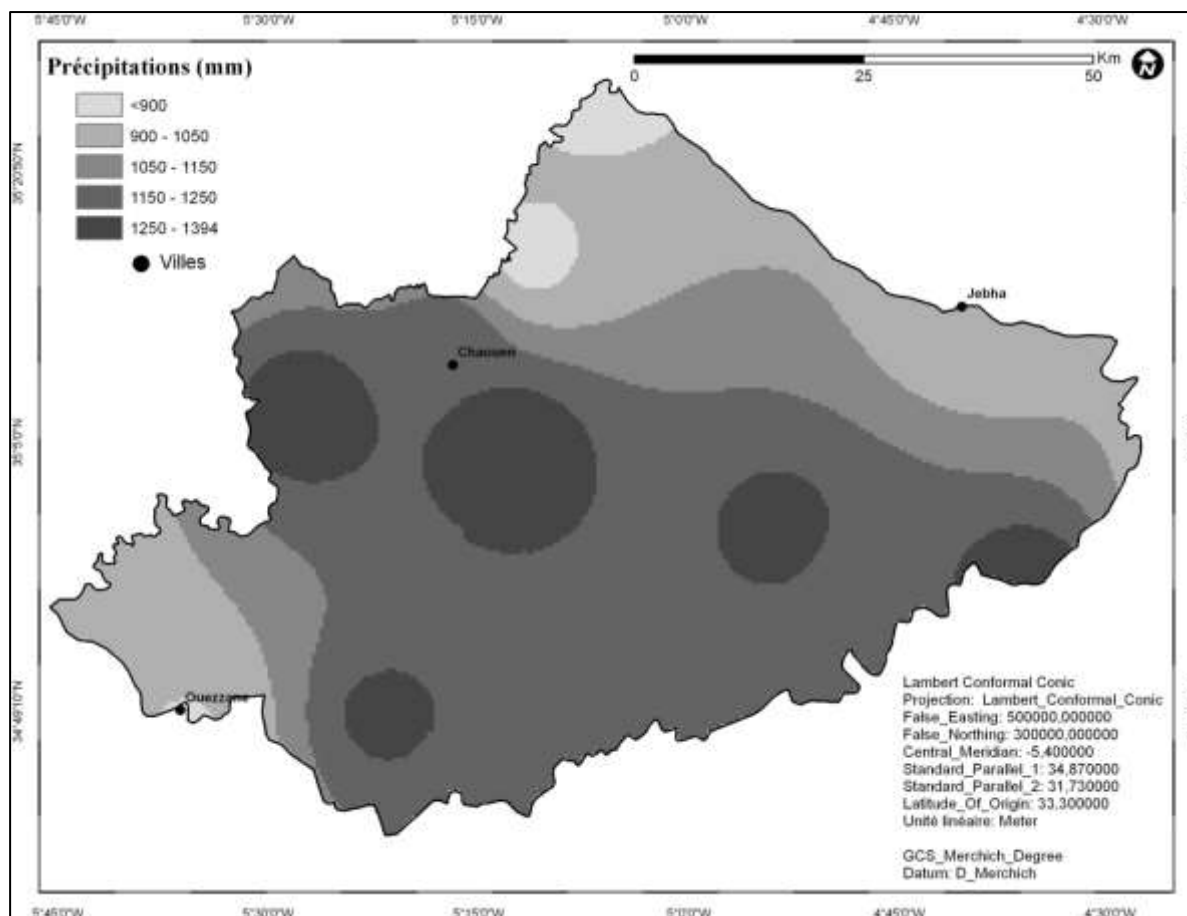


Figure V-44 : Carte des précipitations de la province de Chefchaouen par interpolation IDW.

Elle contient 5 classes de précipitations (Figure V-44) et qui sont les suivantes : inférieur à 900mm, 900 – 1050mm, 1050 – 1150mm, 1150 – 1250mm, et 1250 – 1394mm. Leurs fréquences respectives sont représentées dans la Figure V-45. La première classe (<900mm) ne dépasse guère les 3%, se concentre dans la partie intermédiaire et aval du couloir de l'oued Laou, et à la ville d'Ouazzane. La seconde (900 – 1050mm) avec 20.42% de la fréquence totale des précipitations couvre la façade méditerranéenne du secteur d'étude, ainsi que la partie Sud – Ouest de ce dernier. La classe des précipitations comprises entre 1050 et 1150mm, se limite à 15.67% de la superficie totale du secteur d'étude, et se localise essentiellement dans la partie intermédiaire de la Dorsale Calcaire et les terrains les moins élevés de la nappe de Tisirène, ainsi que le côté Sud – Ouest de la localité de Zoumi. La

¹⁴ L'effet de foehn: L'effet de foehn, ou effet de föhn, est un phénomène météorologique qui résulte de la rencontre entre les mouvements ascendants et descendants des masses d'air avec des reliefs.

quatrième classe (1150 – 1250mm) présente à elle seule presque la moitié de la fréquence totale avec 47.96% et s'étale sur toute la partie centrale de la province de Chefchaouen. La dernière classe quant à elle, matérialisée par la couleur grise foncée, représente les précipitations les plus élevées (1250 – 1394mm) avec une fréquence de 13.38%, et coïncidant avec les hautes crêtes de la dorsale calcaire au niveau de la zone de Chefchaouen et Bab Taza, les crêtes de la région de Bab Barred, Kétama, et celle de Zoumi.

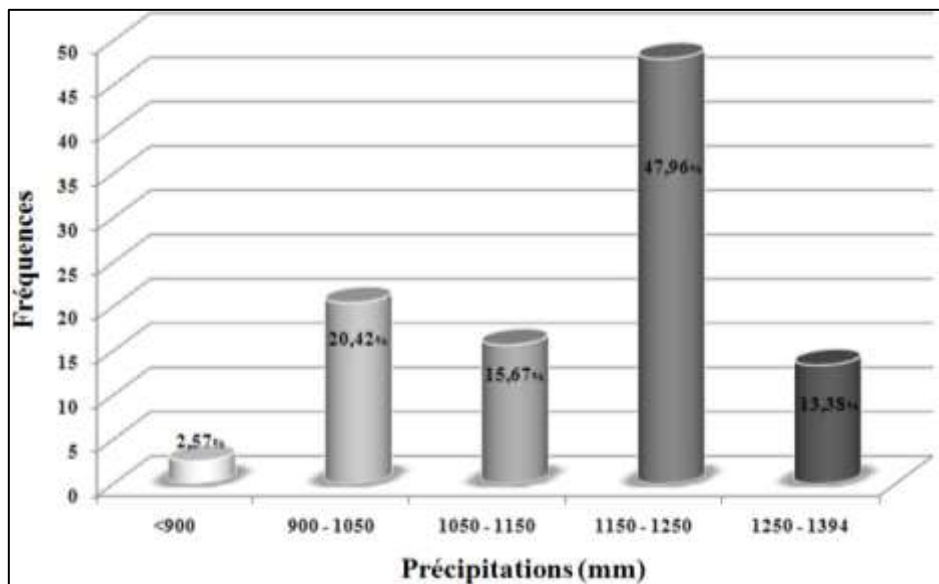


Figure V-45 : Fréquences des précipitations de la région de Chefchaouen.

5.2.4. Interaction avec le relief

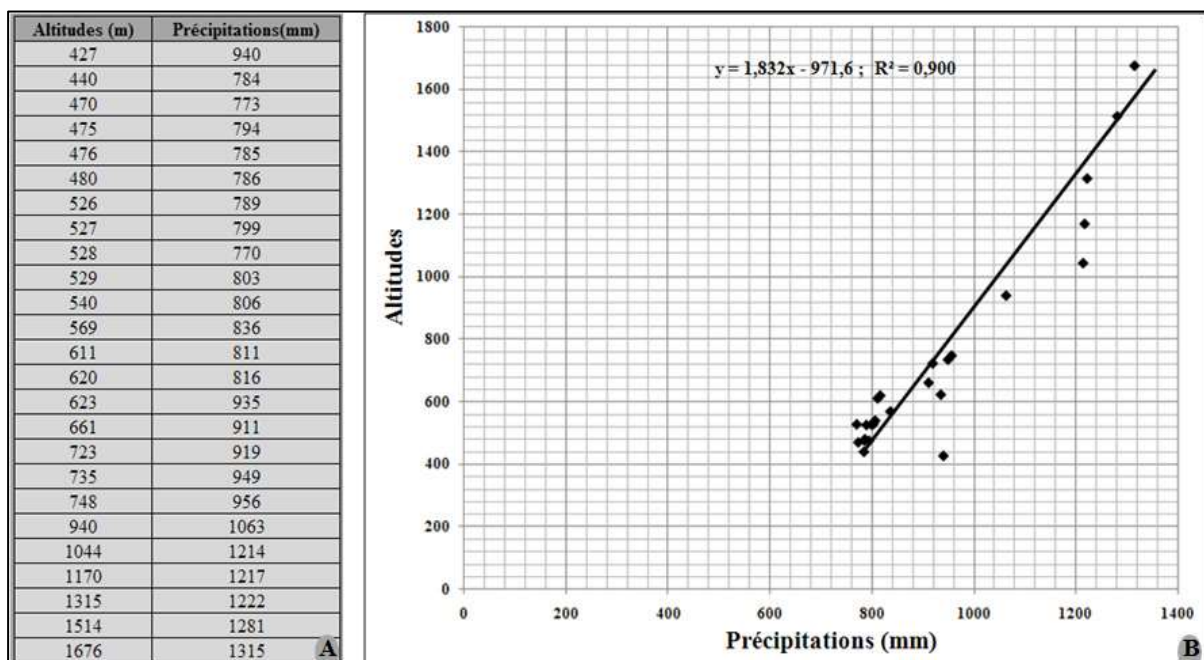


Figure V-46 : A : Précipitations moyennes annuelles et altitudes respectives des 25 points échantillonnés selon le modèle ; B : corrélations des précipitations moyennes annuelles avec les altitudes de la province de Chefchaouen.

En règle générale, les précipitations augmentent avec l'altitude et la proximité d'une montagne, puisque les masses d'air vont subir un double effet de refroidissement, aussi bien par leur détente que par le contact avec des surfaces froides. Pour étudier la relation entre les précipitations et l'altitude au niveau de la province de Chefchaouen, nous avons utilisé deux méthodes. La première où nous avons procédé en un échantillonnage arbitraire de 25 points en définissant aussi bien leurs altitudes que leurs précipitations moyennes annuelles, comme c'est montré dans la Figure V-46A. La Figure V-46B permet de retenir que les précipitations augmentent généralement d'environ 120mm tous les 200m.

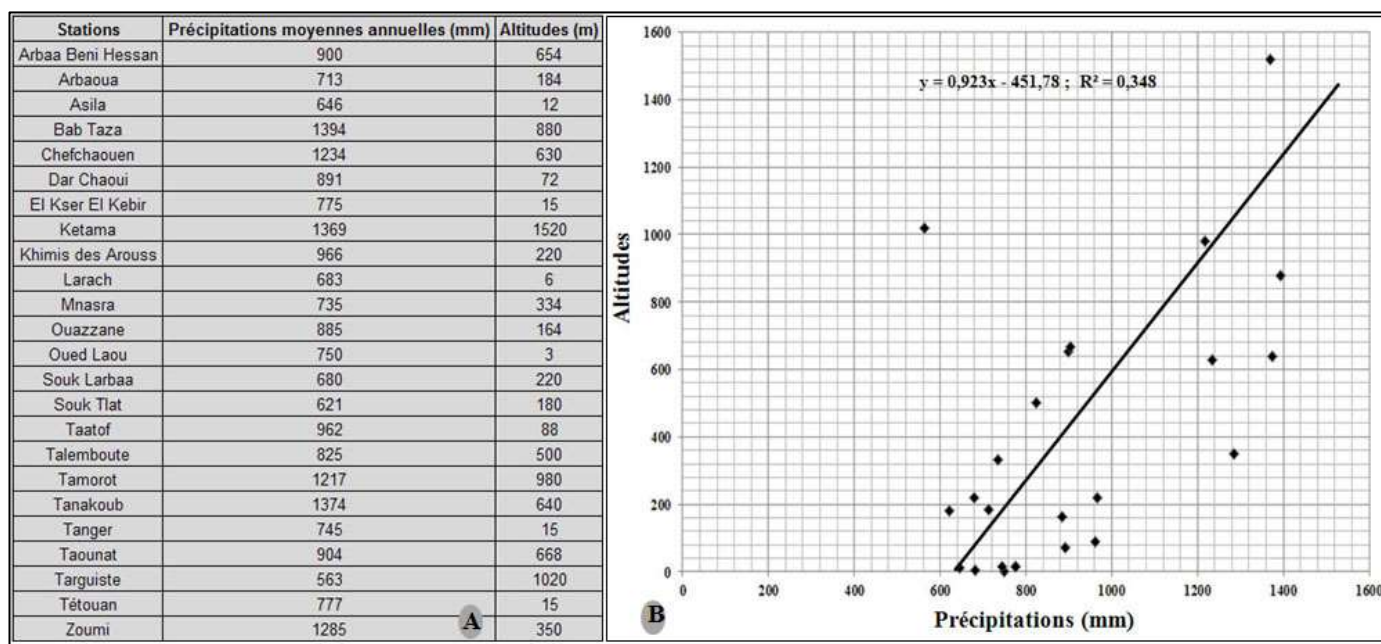


Figure V-47 : A : Précipitations moyennes annuelles effectives et altitudes respectives des stations ; B : corrélations des précipitations moyennes annuelles avec les altitudes de la province de Chefchaouen.

La deuxième méthode permet de définir la relation entre les précipitations mesurées représentant la variable dépendante, et les altitudes réelles des stations représentant la variable indépendante (Figure V-47A), par régression linéaire. Le graphique obtenu (Figure V-47B) montre que les précipitations augmentent d'environ 150 à 200mm tous les 100m, ce qui ne correspond pas totalement à la vérité terrain. Cependant, en comparant les coefficients de régression linéaire calculés pour les deux méthodes, la corrélation précipitation – altitude qui semble la plus valide en raison du caractère discontinu des données climatiques et utilisable pour notre approche numérique est celle obtenue par échantillonnage arbitraire des points, ce qui est cependant confirmé si l'on compare les deux coefficients de régression obtenus.

5.2.5. Rôle de l'évapotranspiration

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

est le cas dans la province de Chefchaouen puisqu'ils en témoignent quelques diagrammes ombrothermiques (Figure V-48) de la zone d'étude.

Cette évapotranspiration se manifesterait avec un certain retard par rapport aux pluies, et conduira à la mise en place d'une grande fissuration (fentes de dessiccation) en période estivale. Celle-ci contribuera à une augmentation de l'infiltration de l'eau (argiles gonflantes de l'UG3, UG5, et UG7) dans le sol lors des premières pluies favorisant les mouvements de terrain, les ravinements et la suffosion (écoulement de sub-surface ou *piping*).

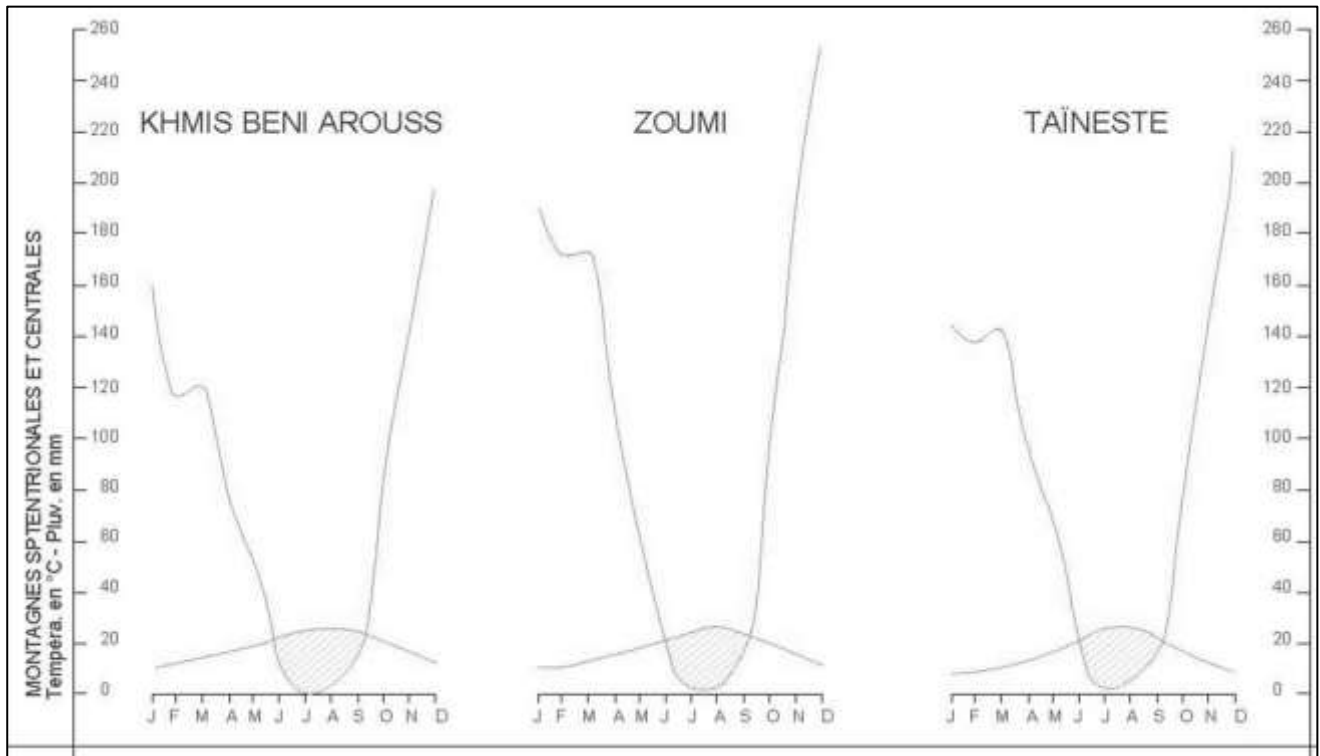


Figure V-48 : Diagrammes ombrothermiques de trois des stations représentatives du climat de la province de Chefchaouen et ses alentours, *Direction de l'Hydraulique, 2010*.

5.2.6. Rôle de la neige

Le contexte climatique méditerranéen et Nord Atlantique se caractérise par un enneigement en période hivernal. La chute de neige en région Rifaine peut s'étaler sur une période d'une vingtaine de jours en moyenne. A l'échelle superficielle, la neige, à cause de sa capacité isolante d'un point de vue thermique, réduit la pénétration profonde du gel (Van-Vliet Lanoë, 2008) mais favorise l'imbibition au dégel. Ce gel superficiel en alternance avec le dégel provoque d'importantes variations de volumes d'un matériau donné, et contribue à la dégradation de ses propriétés mécaniques, et l'augmentation de la perméabilité, ce qui favorise la rupture par charge hydrostatique. Les fractions fines produites par gélifraction peuvent augmenter la rétention en eau et favoriser le glissement et les déformations plastiques des masses de débris produites. Après la fonte, l'infiltration et le ruissellement prennent naissance, ou s'intensifient dans le cas de leur existence préalable à la fonte de la neige. Comme exemple, on peut citer en premier lieu celui de la coulée de débris, les écroulements du massif de Chrafate, les écroulements du Jbel Akroud...dont plusieurs blocs se sont détachés après la fonte de la neige selon les témoignages locaux.

5.2.7. Rôle de la gélifraction

La gélifraction ou appelée aussi cryoclastie est défini comme étant l'action exercée par le gel sur la roche. Il s'agit d'un facteur de désagrégation des roches résistantes telles que les calcaires et les grès (Etlicher et Lautridou, 1986), sous forme de bloc ou même à l'échelle de la fraction fine par délitation des argiles ce qui intervient fortement dans le contrôle de la dynamiques des mouvements de pentes (Van Vliet Lanoë, 1995 ; Van Vliet Lanoë et Valadas, 1992). Dans notre secteur, la gélifraction s'applique beaucoup plus sur les roches calcaires dolomitiques, qui ne contiennent pratiquement pas d'argiles mais subissent plutôt une décarbonatation (disparition de la calcite par dissolution différentielle, Van Vliet Lanoë, 1995) qui épargne les cristaux automorphes de dolomie de la taille du limon. Ce phénomène est en grande partie responsable de la production de la fraction fine indispensable pour le déclenchement du mouvement.

5.3. L'Oscillation Nord Atlantique

5.3.1. Définition

L'Oscillation Nord Atlantique (ONA) ou *North Atlantic Oscillation* (NAO) en anglais, est l'un des plus importants phénomènes de la variabilité récurrente de la circulation atmosphérique. Elle se réfère aux alternances atmosphériques à très grande échelle avec le changement et le déplacement des masses d'airs de la côte Est des États-Unis à la Sibérie, et de l'Arctique à l'Atlantique subtropical, particulièrement pendant l'hiver boréal (Lamb et Pepler, 1987 ; Trouet et al., 2009). Ces oscillations peuvent avoir de multiples conséquences et implication, notamment sur le climat. Elle contrôle directement le régime de températures et de précipitations sur le bassin Atlantique Nord donc notre secteur d'étude.

5.3.2. Impacts sur les températures et les précipitations

La NAO conduit à des variations du climat naturel, et dont les effets sont bien plus importants en hiver qu'en été, en régissant le positionnement et la trajectoire des dépressions de l'hémisphère Nord. La NAO peut être quantifiée par un indice. Ce dernier est calculé chaque année à partir de la différence de pression entre Lisbonne (Portugal) et Reykjavik (Islande), en appliquant la formule de Rogers, 1984. Cet indice peut avoir des valeurs comprises entre -5 et +5, d'où on parle d'un indice positif (NAO⁺), ou d'un indice négatif (NAO⁻).

- i. La phase positive se traduit par un vent important de direction W – E en apportant la douceur de l'océan Atlantique sur l'Europe centrale et méridionale ainsi que la partie Nord – Occidentale de l'Afrique ; et la pluie sur l'Europe du nord et en repoussant la masse d'air froide venue de la Sibérie. Le sud-est des Etats-Unis a un hiver plus doux et humide mais le Québec et le Groenland ont un hiver plus froid et sec (Figure V-49A). Durant une phase NAO positive, le secteur d'étude est à l'image du pourtour méditerranéen, avec des hivers plutôt secs et doux. Cela va conduire à l'absence des précipitations accrues, et par conséquent une prédisposition moins importante des versants pour le déclenchement des mouvements de terrain.

- ii. La phase négative, se manifeste par d'importantes anomalies de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, par opposition à la phase positive. Par conséquent, les vents de direction W – E ne sont pas très puissants d'où la possibilité d'apparition de tempêtes devient pratiquement négligeable. Cela confère à la partie sud-est des Etats-Unis un hiver plus froid, tandis que le Québec et le Groenland ont un hiver plus doux. En outre, la masse d'air froid va stagner et s'engouffrer en Méditerranée, apportant des pluies très accrues sur ses rivages (Figure V-49B) dont notre secteur d'étude. Ces pluies ont une influence indirecte sur la genèse des mouvements de terrain.

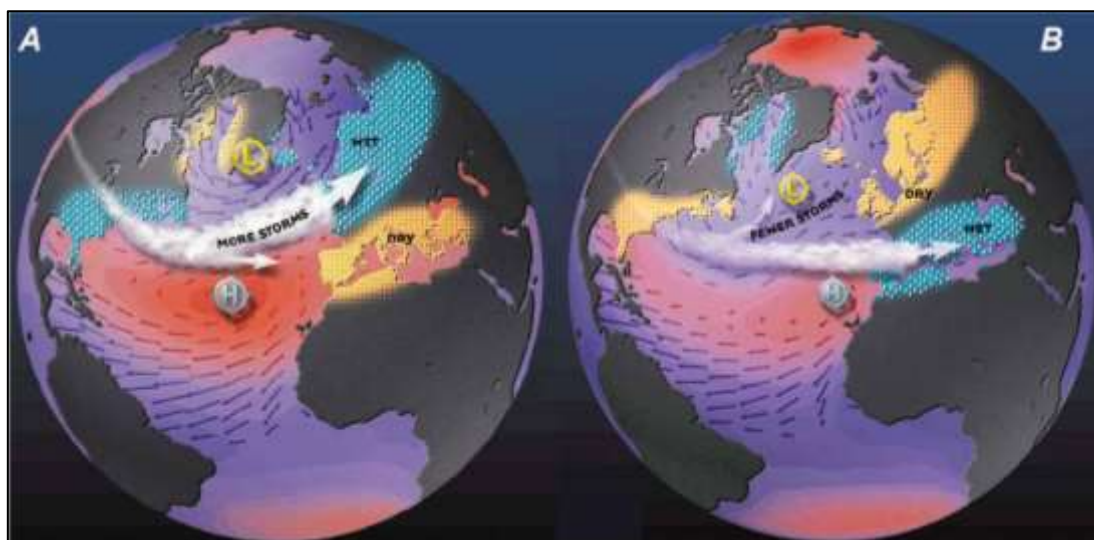


Figure V-49: A: Phase NAO positive; B: Phase NAO négative (Source : <http://www.ifremer.fr>)

5.3.3. Impacts de la NAO sur le Maroc

Il n'est pas nouveau de rencontrer une alternance de périodes pluriannuelles relativement sèches et humides à l'échelle de tout le royaume, puisque des études dendrochronologiques dans les Atlas signalent de telles alternances au cours des trois derniers siècles (Lamb et Pepler, 1987). Dans le Rif, les cèdres et les sapins de Kétama et Chefchaouen sont les témoins des épisodes froids pluvieux, comme le sont les groizes, les coulées kilométriques des terrasses fluviales anciennes et les dépôts de travertins (El Gharbaoui, 1981).

Suite à ces travaux, de nouvelles analyses ont permis de mettre le point sur l'impact de la NAO sur le Maroc, notamment ceux de Lamb et Pepler, 1987 ; Lamb et al., 1997 ; Portis et al., 2001 ; Terray et al., 2004 ; Driouech et al., 2009, Trouet et al, 2009 ; Driouech et al., 2010...etc ; dans lesquels des modèles permettant de prédire les variations des précipitations au Maroc ont été établis en se basant sur les variations futures de la NAO.

Par ailleurs, Berger et al, 1979 ; Till, 1987 et notamment Till et Guiot, 1990 ont pu reconnaître de grandes corrélations entre les précipitations et les variations NAO en se basant sur une très longue série dendrochronologique pour les derniers 1000 ans, qui est établie par l'étude des cernes du Cèdre atlantique (*Cedrus Atlantica*). Ces travaux ont montré donc, que les périodes pluvieuses les plus importantes au Maroc ont tendance à coïncider avec de grands indices négatifs de la NAO, et le contraire est vrai pour la

sécheresse. Une telle correspondance est parfaitement décalquable dans l'évolution du climat à l'échelle nationale et non seulement dans le Maroc Nord – Occidental, où nous avons décelé de grandes correspondances en tentant de trouver des corrélations entre les périodes pluvieuses du secteur d'étude qui coïncident globalement avec les phases négatives de la NAO (Figure V-50). Il est donc fort envisageable, que les phases froides quaternaires du Rif voir même tout le Maroc, correspondraient à des périodes pluviales nivales et humides, et des phases interpluviales sèches, à des périodes chaudes, ces périodes correspondant respectivement à la dominance NAO- et NAO+ (Dickson et al., 1996 ; Trouet et al., 2009).

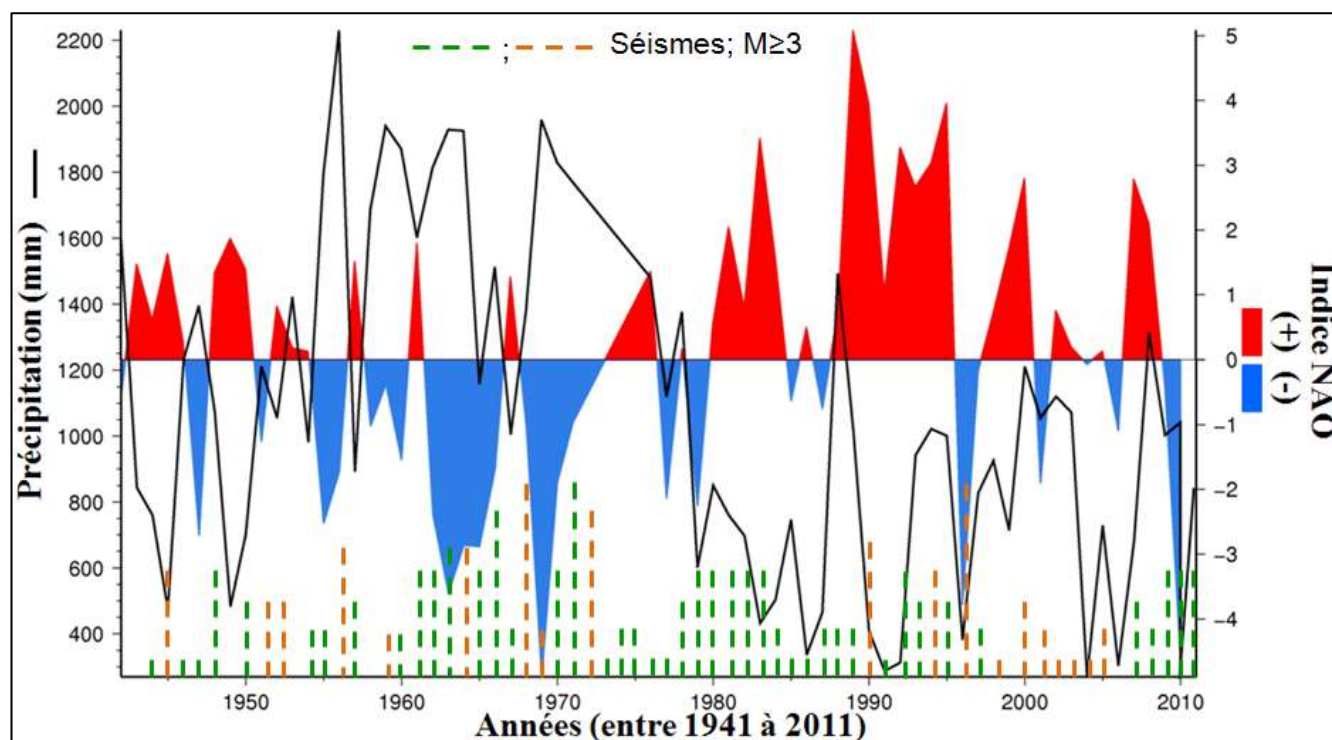


Figure V-50 : Corrélation entre les indice NAO, les précipitations hivernales (ONDJE, trait) et la sismicité (le nombre de tirets indique le nombre des séismes, seuls les tirets en orange contiennent des séismes avec $7.9 \geq M \geq 5$) de la province de Chefchaouen et son pourtour entre 1941 et 2011. Les données NAO proviennent du site internet de Jim Hurrell (<http://www.cgd.ucar.edu/cas/jhurrell/indices.html>); les données des précipitations proviennent du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche Maritime (<http://www.madrpm.gov.ma/>); les données de la sismicité proviennent du catalogue de Pelaez et al., 2007 pour la période 1941 à 2005, et du catalogue de Cherkaoui, à paraître pour la période 2006 à 2011.

La Figure V-50 représente les valeurs annuelles de l'indice NAO entre 1941 et 2011 matérialisé par une double couleur, où le bleu correspond aux épisodes négatifs de la NAO, alors que le rouge en présente les positifs. Quant aux précipitations matérialisées par la courbe noire, elles sont présentées pour la même période (entre 1941 et 2011).

Cette figure, montre que la valeur annuelle de l'indice NAO est négatif pour la période 2008 – 2010, ce qui est en accord avec les fortes précipitations qu'a connu le secteur d'étude d'après les données de la station météorologique de Chefchaouen (Figure V-50). Cette tendance semblerait devoir se poursuivre dans les années à venir (cycle de 30 ans) d'où l'intérêt de prédire les endroits susceptibles aux mouvements de terrain dans le futur, afin de prendre les mesures nécessaires pour éviter les éventuels dégâts qui peuvent en résulter. En fin, pour éviter que la hauteur des précipitations (2010-2011) semble être

en désaccord avec la phase négative de la NAO installée depuis 2008, on rappelle que les précipitations sont calculées à cheval sur deux années (année pluvieuse : OND de la première, et JF de la suivante et dont on disposait pas des valeurs au moment de la rédaction.

5.4. Discussion : relation des précipitations avec les MT

Il est certain que les précipitations font partie des facteurs intervenant dans la mise en mouvement des versants, grâce à l'apport particulier en eau. En l'absence de modifications géomécaniques des formations géologiques par les sollicitations sismiques, la réactivation des mouvements est essentiellement expliquée par l'accroissement des précipitations qui elles même se trouvent contrôlées par les variations NAO. Une telle dualité d'implications justifie l'activité récurrente des mouvements de versants d'Amtrass, Chrafate, et Bou Halla comme nous l'avons détaillé dans le chapitre précédent (Section 3).

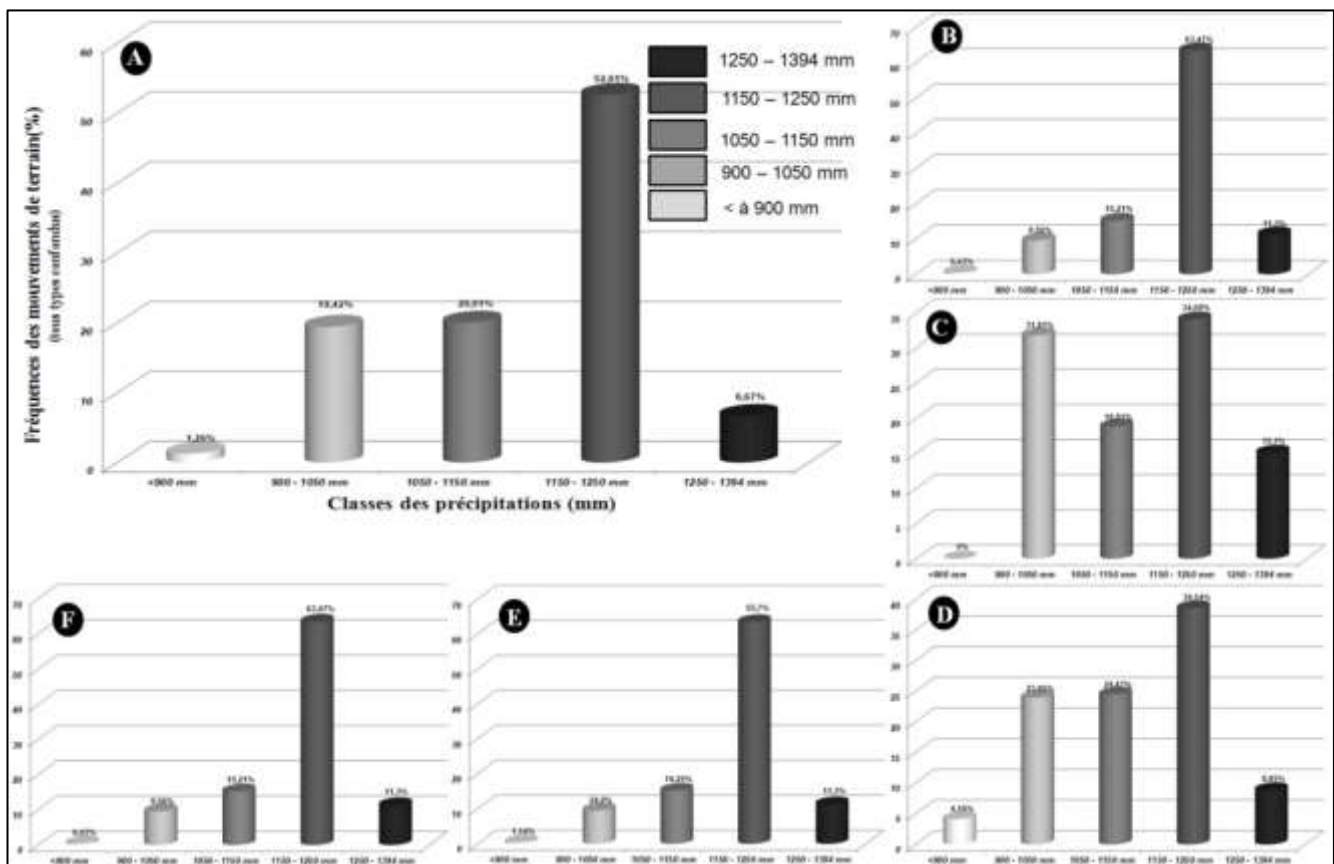


Figure V-51 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de précipitations de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain en fonction des précipitations ; C : Fréquences des coulées de débris en fonction des précipitations ; D : Fréquences des écroulements en fonction des précipitations ; E : Fréquences des sapements en fonction des précipitations ; F : Fréquences des badlands en fonction des précipitations.

Ensuite et en regardant des glissements sur le terrain lors de la dernière période pluvieuse (hiver 2010), nous nous sommes aperçu que les eaux des précipitations affectent particulièrement la tranche superficielle du terrain. Or, il est certain que l'eau interagit beaucoup plus profondément en présence de discontinuités (tectoniques et/ou stratigraphiques), pouvant même atteindre le substratum, qu'en milieu non-fracturé.

Cependant, pour pouvoir comprendre la relation entre les hauteurs des précipitations dans la province de Chefchaouen et la distribution spatiale des mouvements de terrain, une étude de l'abondance globale et spécifique a été conduite (Figure V-50). La figure V-50A montre que la fréquence des mouvements augmente avec l'augmentation des précipitations jusqu'à atteindre son maximum avec 52.61% dans les secteurs de pluviosité comprise entre 1150 – 1250mm, et puis chuter au niveau de la classe à plus grande pluviosité. Cela peut paraître contradictoire, or que ce n'est pas du tout le cas, puisque les plus grandes précipitations (1250 – 1394mm) se restreignent au niveau des points les plus culminants du secteur où la neige joue le rôle prédominant dans l'évolution des versants. Ceux-ci n'occupent que 13% de la superficie totale du secteur d'étude, et sont formés essentiellement par les calcaires dolomitiques du domaine rifain interne. La même tendance d'évolution de la fréquence générale des phénomènes, est recalquable sur les fréquences spécifiques des glissements, sapements, et badlands (Figure V-50B, E, et F). Toutefois, il est à noter que les mouvements de terrain ne sont pas toujours directement en corrélation avec les pics pluviométriques, puisqu'on assiste à des fréquences assez importantes à partir des premières classes des précipitations, comme c'est le cas pour les coulées de débris et les écroulements. La réactivité des coulées de débris peut être décalée dans le temps en fonction de la présence ou non de matériel mobilisable (Figure IV-16), celle des écroulements peut être contrôlée par la préparation co-séismique. De plus, pour les écroulements, c'est beaucoup plus l'intensité et le rythme des précipitations qui présentent l'aspect déterminant dans leur genèse, en association étroite avec la densité de la fracturation et les caractéristiques géotechniques des formations constituant les versants en question. Il semblerait aussi, que ces derniers se déclenchent après des épisodes de sécheresse qui fissurent la partie superficielle des formations sur plusieurs mètres en profondeur. Les premières pluies même moins intenses réussissent facilement à s'infiltrer et saturer rapidement les formations au niveau des discontinuités (stratigraphiques et structurales) en catalysant le déclenchement des mouvements.

6. La variable : Occupation des sols

6.1. Introduction

Dans les régions dominées par des mouvements de terrain le paramètre occupation des sols joue un rôle via le caractère stabilisant de la couverture végétale. Celle-ci, peut, en favorisant un ruissellement de subsurface (matte racinaire), et un enracinement profond, limiter le développement des mouvements de terrain sur les versants à matériel dont les caractéristiques géotechniques sont médiocres (argileux, argilo-marneux...). Lors de son absence, ou sa rareté sur les versants, l'effet érosif par ruissellement peut être accéléré, ce qui peut constituer un facteur catalysant dans ce cas. La relation entre les mouvements de terrain et le paramètre occupation des sols s'avère être complexe, et dépendre a priori du type d'occupation. 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 Chefchaouen.

6.2. Types d'occupation des sols

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

- i. 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. Elle a fait l'objet aussi (procédure très laborieuse), de plusieurs fusionnement et ajustement dans un souci de simplification de la lecture.
- ii. Les zones urbaines, les terrains agricoles, les terrains nus et les surface d'eau, ont été reconnus par classification multispectrale supervisée des données Landsat7 ETM+.
- iii. Le réseau hydrographique représentant les principaux oueds de la région, et le réseau routier ont été digitalisés à partir de la couverture topographique IGN. On a eu recours à une vérification sur les images satellitaires récentes pour actualiser cette couche d'information.

A cela, s'ajoute plusieurs informations qui ont été collectées sur le terrain (fiches de terrain, photos...).

6.2.1. L'occupation humaine

Le secteur d'étude est constitué de 40 communes au total, avec 37 communes rurales et 7 communes urbaines (Figure V-51 bis A et B). Les montagnes de la région sont peu occupées; la population se regroupe de préférence où se trouvent l'eau et les terres cultivables au pied des reliefs calcaires ou gréseux et dans les vallées. Selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) de 2004, la population de la région s'élevait à 524 602 habitants, dont la vocation est essentiellement agricole. La population rurale représente 90.23 % de la population totale, alors que la population urbaine ne dépasse guère les 9.77% dont plus de 30% se concentre à la commune de Chefchaouen. La densité moyenne est de 101 habitants par Km².

A l'échelle de tout notre secteur d'étude, il est à noter que, nous avons assisté à d'importantes extensions urbaines depuis les années 1990. Ces dernières se sont faites sans schéma directeur d'aménagement ni plan d'occupation des sols. Elle est liée à une forte croissance démographique, et à l'exode rural des paysans et des habitants des villages enclavés, vers les autres endroits moins enclavés et relativement desservis par des routes. Ces nouvelles zones urbaines sont éparées et peuvent se situer tantôt dans les hauts sommets à des altitudes allant jusqu'à 1500m, tantôt sur des zones de basses plaines (<900m d'altitude). C'est l'exemple de toutes les habitations situées aux pieds des versants de la Dorsale calcaire, et celles des grandes barres quartzitiques numidiennes. C'est le cas aussi pour l'extension de la localité de Chefchaouen qui a été construite anarchiquement sur le reste des «replats» qui juxtaposent les falaises et les grands escarpements de la Dorsale Calcaire. Cette zone (commune urbaine de Chefchaouen) sera abordée plus loin, en analysant le risque qu'encourent les habitations par les mouvements de terrain.

6.2.2. Types de cultures

D'après nos missions de terrain et en examinant la base de données fourni par le ministère de l'agriculture et de la pêche maritime, on peut retenir trois types cultureux :

- i. Les cultures annuelles, où les céréales sont les cultures dominantes tant en superficie qu'en valeur. Parmi les autres cultures annuelles pratiquées dans la

région, on peut citer les légumineuses et les cultures fourragères. Les rendements sont variables mais peu élevés en moyenne.

- ii. Les cultures irriguées, couvrent une superficie très réduite. Elles se répartissent sur un grand nombre de petites parcelles alimentées surtout par des sources. Ces parcelles, peu importantes par leur extension, présentent cependant une valeur économique très appréciable.
- iii. L'arboriculture, où l'olivier est l'arbre le plus important pour les recettes des paysans de la région de Chefchaouen.

6.2.3. La forêt : essences forestières et reboisement

La diversité des reliefs, et la grande variabilité des précipitations tout au long de l'année dans notre secteur, lui confère une couverture végétale très diversifiée réparties en forêts, matorrals, jachères et cultures. La dynamique de la dégradation des formations végétales engendre souvent des paysages composites.

Les essences forestières essentielles sont le sapin, le cèdre, le chêne vert et le pin maritime. Deux autres espèces forestières secondaires peuvent être distinguées, à savoir : le chêne zen, et le pin d'Alep. Cependant, et d'une manière générale, l'étagement de la végétation peut se répartir sur six classes (Benabid, 1994 ; Benabid, 2000), à savoir :

- i. Tétracinaie : est une formation qui se présente très souvent en mélange avec les formations de chêne vert ou avec de lentisque, d'oléastre, de caroubier, de lierre. Des mosaïques de thuya en mélange avec le pin d'Alep sont fortement présentes sur les berges des oueds et avec le pin d'Alep sur les replats et le thuya sur les falaises et les pentes.
- ii. Subéraie : est une formation qui se présente en groupements très clairsemés, rarement denses. Le chêne liège se trouve la plus part du temps en mélange avec le chêne vert.
- iii. Pinède : formée essentiellement par du Pin maritime occupe préférentiellement les fonds des vallons, notamment sur les dolomies altérées.
- iv. Chênaie : elle existe rarement en forêt, vue la grande dégradation qu'elle a subie. Elle est très hétérogène, et succède vers le bas au sapin et occupe les versants ouest du secteur d'étude.
- v. Sapinière : est une essence qui se répartit généralement entre 1200 à 2000m d'altitude, et montre son développement optimal sur les versants les plus froids (orientés vers le nord).
- vi. Cédraie : vient après les formations de sapin en altitude, et se présente en groupements clairsemés sur les versants emmagasinant plus de chaleur.

La couverture végétale est représentée par classes : forêt dense, matorral, et les terrains reboisés (Figure V-52). De plus les plantations se font selon les courbes de niveaux pour limiter le ruissellement direct.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

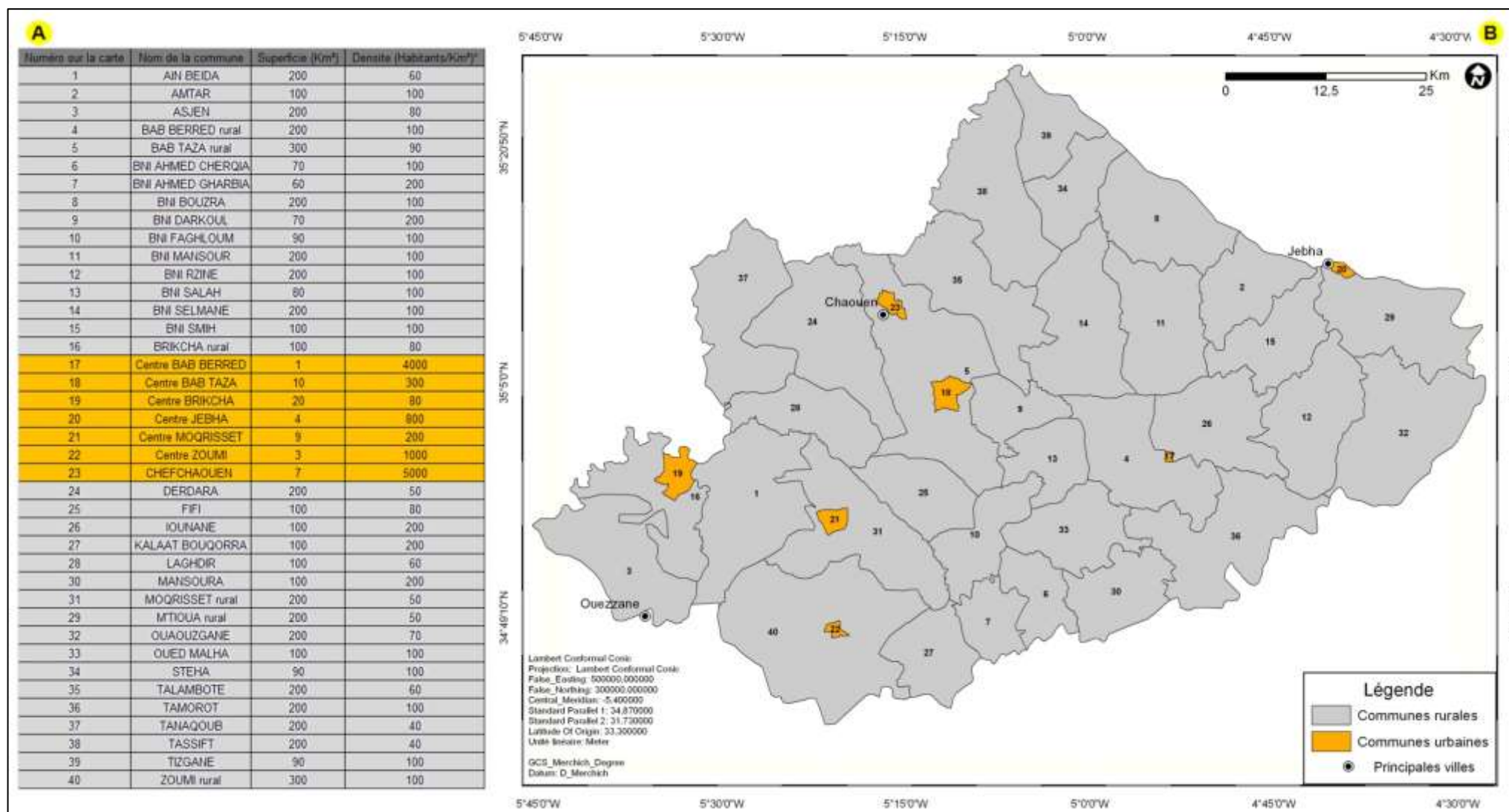


Figure V-51 bis : A : Noms, superficies, et densité de la population par communes; (*) : RGPH, 2004 ; B : Distribution des communes rurales et urbaine du secteur d'étude.

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

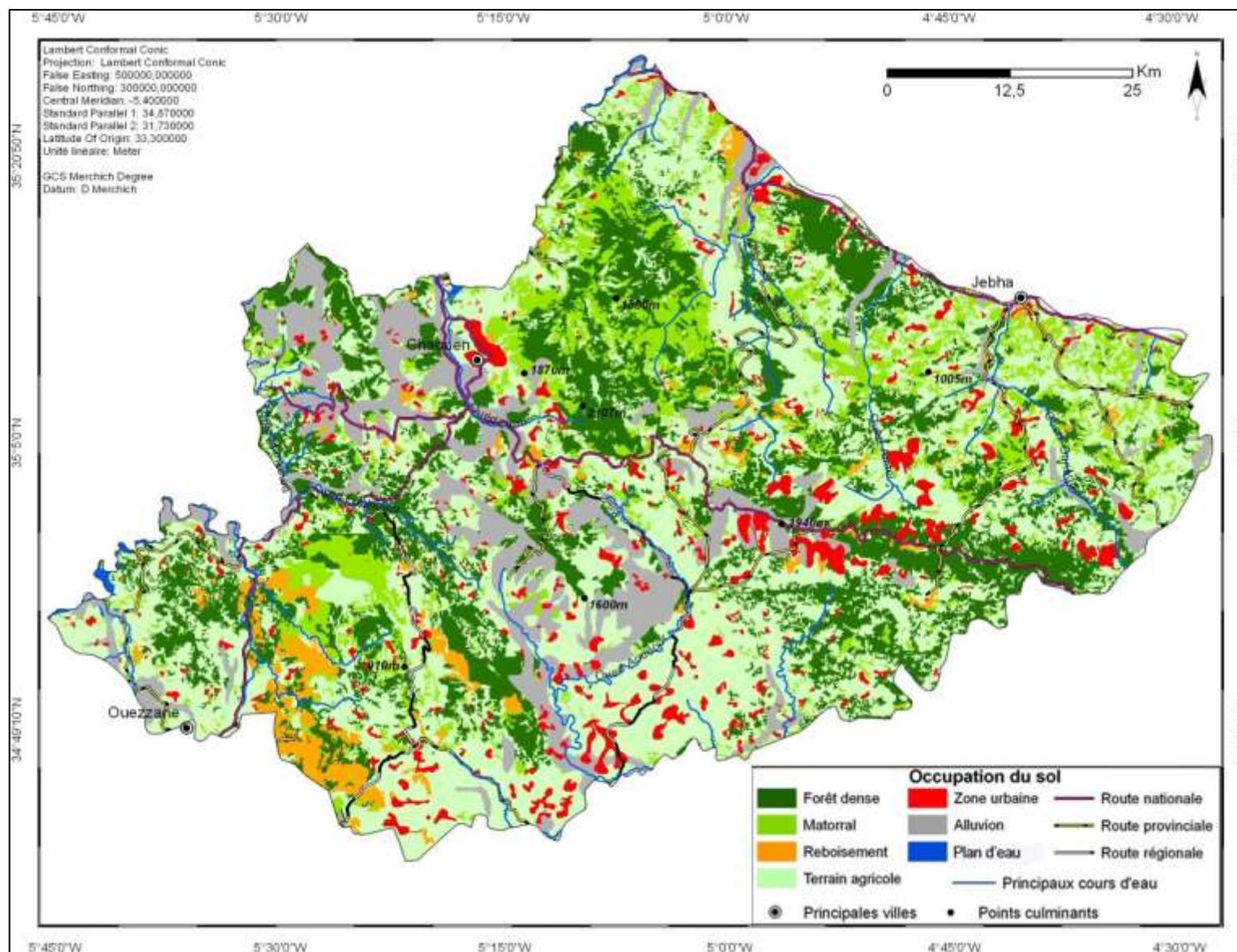


Figure V-52 : Carte d'occupation des sols de la province de Chefchaouen.

6.2.4. Le déboisement : défrichement et incendies

Le déboisement peut être lié à plusieurs causes qui peuvent se résumer en deux grands types, d'ordre naturel ou d'ordre anthropique. Concernant le secteur d'étude, lors de nos missions de terrain le déboisement constaté résulte de deux actions principales, à savoir :

- ✓ Le défrichement, qui résulte de l'agriculture sur brûlis qui constitue un moyen pour les autochtones comme en a témoigné plusieurs habitants de Had Ouled Beni Rezaïn (Bab Barred). La pauvreté de la population engendre la coupe des arbres pour en faire du bois de chauffage ou du charbon de bois.
- ✓ Les incendies, qui ont des conséquences beaucoup plus graves que celles du défrichement parce que non-sélectifs. Ils représentent un danger permanent pour la forêt et l'équilibre des versants (combustion des racines, hydrophobie des zones brûlées). Ils se produisent généralement en période estivale. Lors de notre mission de juillet 2010, nous avons assisté à plus de 5 incendies, qui ravagé des centaines d'hectare des forêts de la province de Chefchaouen.

6.2.5. Les routes et les carrières

Les routes peuvent constituer un des paramètres anthropiques générateur de mouvements de terrain, comme cela a été démontré pour le glissement du versant de Bou Halla (Cf. Chapitre 4, section 3). Elles peuvent jouer le rôle d'une barrière causant la rupture de pente d'équilibre (naturelle) du versant surtout à cause des entailles dans les parties amont de ce dernier. Elles peuvent aussi constituer des couloirs de circulation et d'infiltration des eaux ce qui catalyse la formation des mouvements de terrain. Tout comme les routes, les carrières représentent une activité humaine qui peut être considérée comme un facteur générateur des mouvements de terrain, par modification de la surface naturelle du versant comparable à un sapement de berge par une rivière ou par une route, par accélération de l'infiltration, ou par désorganisation totale de la structure interne des formations sur quelques mètres à cause du dynamitage très souvent utilisé dans de tels contextes (fracturation en étoile, ébranlement, détente). Le secteur d'étude est desservi par trois types de routes, avec une longueur totale d'environ 653 Km. Par ordre d'importance on peut distinguer des routes nationales, provinciales, et régionales ; avec respectivement 300 Km, 257 Km, et 96 Km de longueur. Quant aux carrières, une fois que celles-ci sont rencontrées sur le terrain ou positionnées par interprétation des images satellitaires très haute résolution, il est sûr qu'elles correspondent aux lieux de déclenchement de mouvements de terrain

6.3. La carte d'occupation des sols de la province de Chefchaouen

Toutes les couches précédemment décrites, ont été superposées en utilisant la même référence spatiale à l'aide de notre SIG pour obtenir notre carte d'occupation des sols finale (Figure V-52). Elle contient sept classes principales, à savoir : les forêts denses, les matorrals, les zones de reboisement, les terrains agricoles, les zones urbaines, les surfaces d'alluvions et les surfaces d'eau. Elle présente aussi le réseau routier, les principaux cours d'eau et les points culminant de la région. Les fréquences relatives des sept classes principales sont représentées dans la figure V-53. Celle-ci montre, que presque la moitié (45%) de la superficie totale du secteur d'étude est représentée par les terrains agricoles, ce qui rend ces terres les plus exposées au risque mouvements de terrain. En deuxième viennent les terrains correspondant aux forêts denses en tant que deuxième importante classe d'occupation des sols avec 24.29%.

Ces forêts se répartissent sur l'ensemble du secteur, notamment dans les régions relativement accidentés et d'accès très difficile pour l'homme (Dorsale Calcaire, le massif de Beni Bouzera, les terrains culminant de la nappe d'Ouazzane et la nappe des grès du numidien...). Les matorrals présentent la troisième classe d'occupation en terme de fréquence avec 11.27% et forme une sorte d'auréole pour les forêts denses, ou en zones bien individualisées surtout dans la partie NE du secteur. Les terrains alluvionnaires, avec la quatrième fréquence (10.73%) se présente sous forme de couloirs perpendiculaire à la côte méditerranéenne du secteur. Le reste de ces terrains traverse le secteur d'étude suivant une direction NW ~ SE entre Chefchaouen et Ouazzane. Les zones urbaines, les zones reboisées, et les surfaces d'eau viennent en dernier lieu avec respectivement des fréquences de 4.25%, 3.06% et 1.27%. Les deux tiers des zones reboisées et des surfaces d'eau se concentrent au niveau de la région d'Ouazzane et ses alentours. Quant aux zones urbaines elles sont éparées sur tout le secteur d'étude avec des maximums au niveau des localités de Chefchaouen, Bab Barred et Bab Taza.

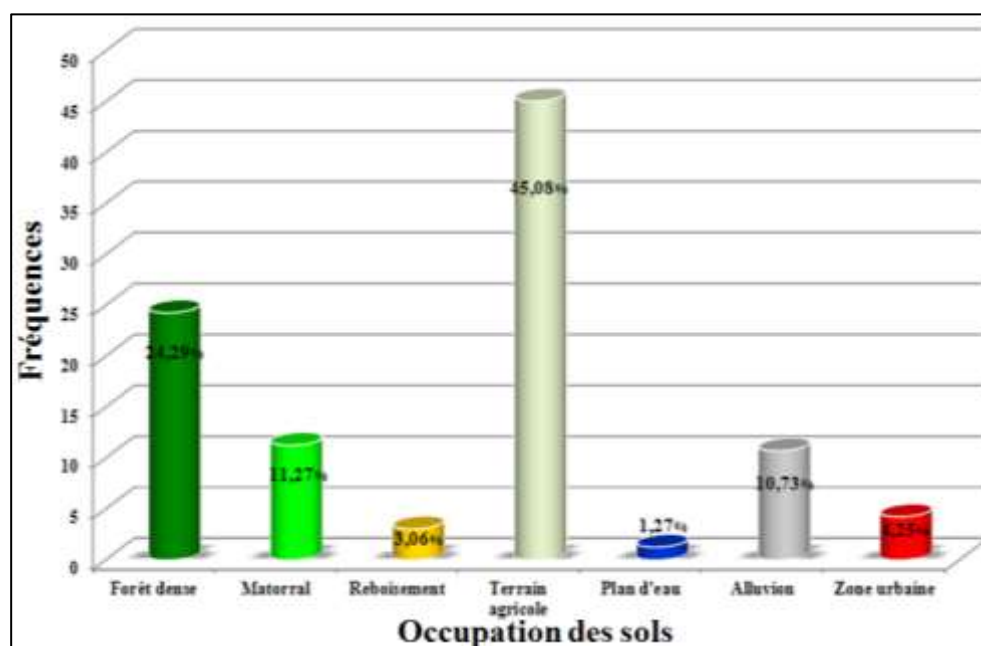


Figure V-53 : Fréquences des différentes classes d'occupation des sols de la province de Chefchaouen.

6.4. Discussion : relation de l'occupation des sols avec les MT

L'occupation des sols de la province de Chefchaouen est caractérisée par une grande empreinte de l'activité humaine qui se manifeste 1° tantôt 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 la travaux de construction et les remblais, le débuttement 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 ; 2° tantôt par des actions positives telle que l'action de reboisement mené par la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification.

En dépit de la difficulté de la tâche, nous avons tenté de comprendre la relation entre la distribution spatiale des différents mouvements de terrain du secteur d'étude et les principales classes d'occupation des sols. Les fréquences globales et spécifiques des phénomènes inventoriés ont été donc calculées (Figure V-54). La figure V-54A, montre que les fréquences

les plus importantes se localisent prioritairement dans trois classes d'occupation des sols et qui par ordre d'importance sont, les terrains agricoles avec 44.46%, suivis des zones des forêts denses qui subissent un défrichement accru avec 26.07%, et puis les matorrals avec 17.92%. Pour les classes restantes les fréquences des mouvements ne dépassent guère les 7%. La même constatation est généralement valable pour les glissements, les sapements et les badlands (Figure V-54A, E, et F), puisque leur abondance est maximale au niveau des terrains agricoles. Quant aux coulées de débris et les écroulements, ils se développent plutôt dans les classes des matorrals et des forêts denses où les principaux massifs rocheux (calcaires, grès, et quartzites), la forêt favorisant l'infiltration profonde.

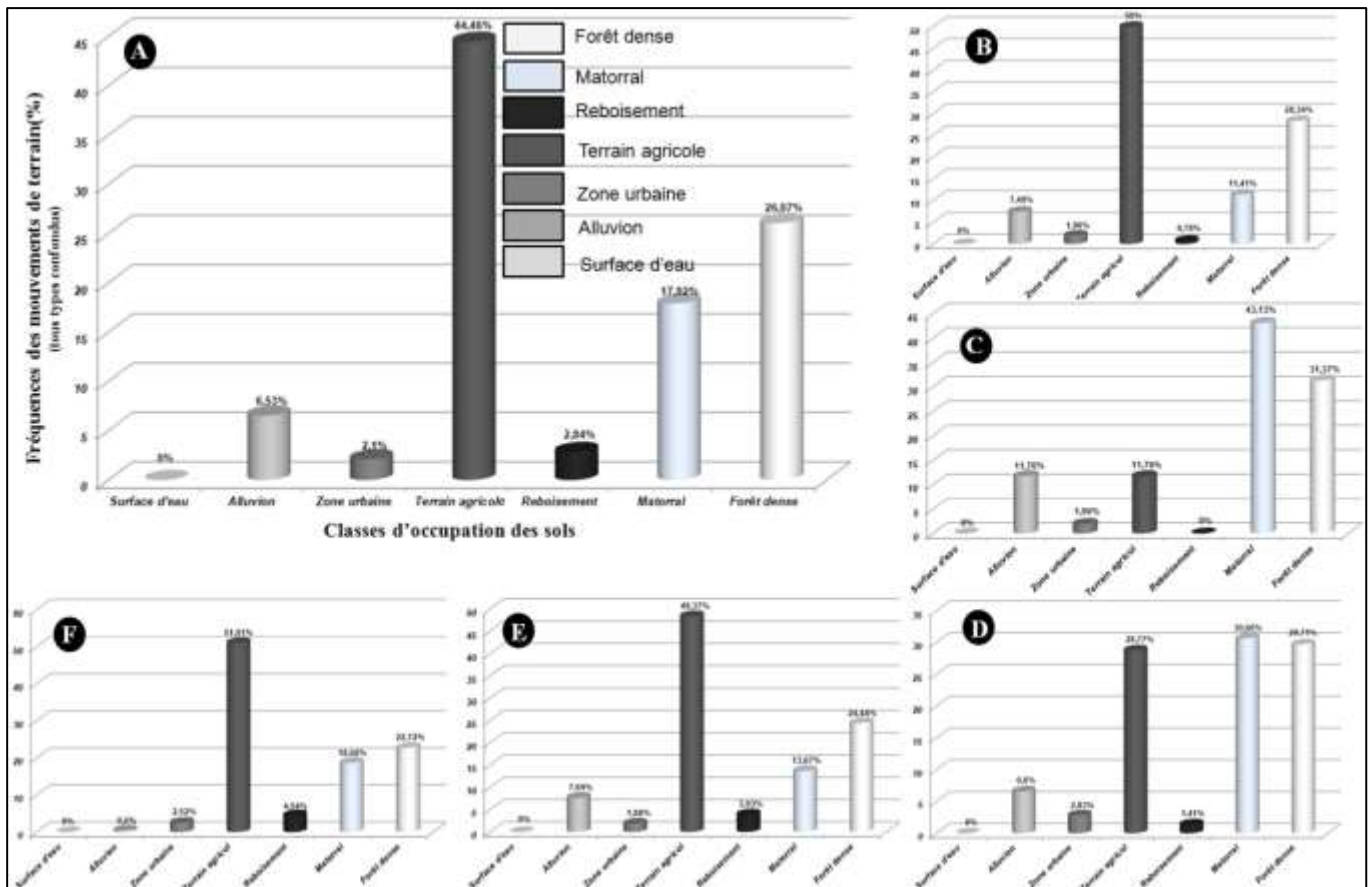


Figure V-54 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe d'occupation des sols de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain en fonction des classes de l'occupation des sols ; C : Fréquences des coulées de débris en fonction des classes de l'occupation des sols; D : Fréquences des écroulements en fonction des classes de l'occupation des sols; E : Fréquences des sapements en fonction des classes de l'occupation des sols; F : Fréquences des badlands en fonction des classes de l'occupation des sols.

7. Conclusion chapitre 5

Ce chapitre a été axé sur l'étude des variables prédictives (facteurs conditionnant de l'occurrence des mouvements de terrain) par leur acquisition, description, ainsi que leur spatialisation et intégration dans une base de données multi-sources et multi-échelles, permettant leur superposition, consultation, mise à jour, ainsi que leur croisement avec la variable à modéliser (les mouvements de terrain) afin d'étudier leur relation avec celle-ci dans la province de Chefchaouen.

1° La lithologie, en termes d'affinités géotechniques et géomorphologiques, est la première variable prédictive à cartographier. Cette carte a été inspirée de la carte géologique à l'échelle de 1/500 000ème de la chaîne Rifaine (Suter, 1980a), et basée à la fois sur le découpage géotechnique proposé par l'AIGI, 1976, et morphologique proposé par Van Westen, 1993, ce qui nous permis de reconnaître huit UG.

2° La fracturation est la deuxième variable géologique à cartographier. Celle-ci est établie en plusieurs étapes qui rassemblent la fracturation en provenance des travaux antérieurs, les nouvelles failles que l'on a extraites par l'interprétation des données satellitaires, et puis la fracturation récente obtenue par l'analyse morphostructurale du MNT ainsi que par l'analyse du réseau hydrographique en termes d'anomalies et perturbations. Le tout a été rassemblé dans une même carte de fracturation globale que l'on a matérialisée en termes de densité.

3° Le facteur sismicité, intégré en tenant compte des isoprofondeurs des séismes constitue la troisième variable prédictive de cette étude. Le modèle numérique de terrain extrait à partir des données Radar Aster (25x25) a fait l'objet d'un certain nombre de traitements qui ont permis de corriger les artefacts dus à la nature du capteur ASTER avant qu'il ait servi de base pour la construction des trois paramètres géométriques intégrés dans cette étude, et qui sont le gradient de pente, l'altitude ou hypsométrie et l'exposition des versants.

4° La variable réseau hydrographique a été incorporé en se basant sur la densité exprimée en cinq classes (Très faible à très forte) tout comme pour la fracturation. Concernant le **facteur précipitations** il a été cartographié par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles, calculées sur l'ensemble des données que nous avons pu avoir, soit 70 ans (1941 – 2011), où nous avons testé quatre modèles d'interpolation dont on obtenu le résultat le plus plausible, c'est-à-dire obtenu par la méthode *IDW*.

5° Le dernier paramètre établi est l'occupation des sols. Il s'agit d'un agent de contrôle majeur. Il a été cartographié par l'association des missions de terrain aux données sur les essences forestières fournies par le HCEFLCD, ainsi que l'interprétation des images satellitaires Spot5.

La distribution spatiale ou l'abondance des mouvements de terrain en fonction de la lithologie, semble être contrôlée essentiellement par l'**UG5** qui contient à elle seule 37% de phénomènes, sauf pour les coulées de débris et les écroulements, qui leur distribution s'avère être régie par l'**UG4**. Pour la fracturation, nous avons remarqué que les badlands et les sapements se comportent indépendamment de la fracturation, sans écarter la possibilité que les badlands et les sapements s'intensifient en présence d'une importante fracturation. En revanche, l'abondance du reste des **phénomènes gravitaires** semble être **tributaire du degré de la fracturation**, notamment les coulées de débris qui évoluent très sensiblement par rapport à ce paramètre clef. Concernant le **paramètre sismicité**, les fréquences de tous les mouvements varient sensiblement avec la variation de la profondeur des séismes, où leur fréquence est inversement proportionnelle à la profondeur, à l'exception des écroulements, les seuls à avoir une fréquence qui augmente proportionnellement avec l'augmentation des profondeurs. Il est donc vraisemblable que l'occurrence des écroulements est intensifiée avec les séismes les plus profonds, puisqu'on général sont les plus puissants et avec des amplitudes significatives.

Cependant, en tentant d'explorer la relation mouvements de terrain – gradient de pente, nous avons retenus que les différents types de mouvements se rencontrent sur toutes les

pentés, mais avec de grandes fréquences au niveau des deux classes de 10 – 20° et 20 – 30° avec plus de 70% de la totalité des phénomènes inventoriés. Les écroulements sont tributaires de l'existence des massifs rocheux, et de pentes fortes (plus de 50°), largement supérieure à la pente d'équilibre (30°). En outre l'analyse générale de la relation mouvements de terrain – hypsométrie montre que ces derniers deviennent de plus en plus abondants avec **l'altitude**. Mais si l'on essaye de se focaliser sur l'évolution de chaque type de mouvements, il ressort que les glissements, les sapements et les badlands se développent plutôt dans les classes hypsométriques basses alors que les coulées de débris et les écroulements se forment d'avantage sur les zones à hypsométrie élevée, conditionnées par la présence des massifs rocheux résistants (Dorsale calcaire, et les barres quartzitiques et gréseuses).

Quant aux expositions des versants, ce sont ceux orientés Nord, Sud – Ouest, et Ouest qui abritent les plus grandes fréquences des mouvements de terrain avec environ 15%, en regard des précipitations et de la persistance de l'humidité. Pour le réseau hydrographique, ce sont la classe densité moyenne avec 53.41% de la totalité des instabilités recensées, et puis celle à faible densité avec 37.32% qui présentent les endroits les plus propices pour le développement des instabilités des versants, témoignant d'une infiltration. Une notable évolution proportionnelle est retenue pour l'évolution des mouvements de terrain en fonction des précipitations, sauf pour la classe à plus grande pluviosité où la fréquence des mouvements chute (ruissellement direct, karst ou neige). Cela peut paraître contradictoire, mais ce n'est pas le cas, puisque les plus grandes précipitations (1250 – 1394mm) se restreignent au niveau des points les plus culminants du secteur. Ceux-ci n'occupent que 13% de la superficie totale du secteur d'étude, et sont formés essentiellement par les calcaires dolomitiques du domaine rifain interne. Enfin et par rapport à la variable occupation des sols, les fréquences globales et spécifiques les plus importantes des mouvements de terrain se localisent préférentiellement dans trois classes qui par ordre d'importance sont, les terrains agricoles avec 44.46%, suivis des zones des forêts denses qui subissent un défrichement accru avec 26.07%, et puis les matorrals avec 17.92%.

Dernièrement, il est important de rappeler l'effet des oscillations NAO, où nous avons démontré (corrélation) que la majorité des séismes se produisent lors de périodes à NAO négative, c'est-à-dire de précipitations hivernales anormalement élevées. Cela explique que l'activité sismique du nord du Maroc n'est pas purement (et seulement) tributaire du contexte compressif (Afrique – Europe) contrairement à ce qu'on pensait, mais est révélée par le rôle de l'eau interstitielle qui, pour la libération du stress sismique, exerce un contrôle positif par une augmentation de la lubrification au niveau des plans de failles superficielles.

CHAPITRE VI : ZONAGE DE LA SUSCEPTIBILITE

Résumé du chapitre

Ce chapitre a été focalisé sur l'analyse de la susceptibilité aux mouvements de terrain à trois différentes échelles dans la province de Chefchaouen. D'abord à échelle régionale (provinciale 1/100 000) par approche heuristique par combinaison de cartes d'index. Ensuite, à échelle moyenne (méso-échelle 1/50 000) par deux approches d'analyse spatiale fondée sur des méthodes probabilistes à savoir : l'approche bivariée basée sur le théorème de Bayes (Théorie de l'Evidence ou Weight of Evidence) et l'approche multivariée fondée sur les régressions logistiques (Weighted Logistic Regression). Il s'agit ici d'une démarche exploratoire où il a été possible de définir la meilleure combinaison de paramètres pour la construction de la carte de susceptibilité. Les résultats obtenus par les deux approches sont ensuite comparés entre eux, ce qui nous permis de constaté que les régressions logistiques sont les plus performant pour prédire la susceptibilité aux mouvements de terrain à méso-échelle dans la région de Bab Taza. Enfin, à échelle large (grande ou détaillée 1/5000) par zonage géomorphologique effectué directement sur le terrain.

1. Méthodologie générale d'approche : Approche d'Analyse Multi-échelle (AAM)

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

Cependant, le Rif Marocain et plus particulièrement la province de Chefchaouen, constitue l'une des zones du Maroc qui présente une fréquence élevée en mouvements de versant en réponse à une importante variabilité morphologique, lithologique, et structurale. Cette situation nous a motivés pour appliquer une analyse multi-échelle de la susceptibilité aux mouvements de terrain pour la première fois à cette région. Une autre raison pour cette motivation, est la disponibilité d'un jeu de données requises pour une telle approche dans ce secteur région.

Quant à l'analyse multi-échelle proposée, elle évaluera la susceptibilité de cette province en procédant par zoom (d'une petite vers une grande échelle) :

1° partant d'une échelle régionale pour la province de Chefchaouen (1/100 000 à 1/500 000) (Figure VI-1A),

2° passant par une échelle moyenne (1/25 000 à 1/50 000) pour le secteur de Bab Taza (Figure VI-1B et C), et,

3° arrivant à une échelle large ou de détail (1/15 000 à 1/5 000) pour le village de Chefchaouen (Figure VI-1D).

Il s'agit donc d'une approche où la SMT sera évaluée à plusieurs (trois) niveaux (Régionale ou provinciale, Moyenne, et puis Grande). En effet, pour chaque niveau (échelle) d'analyse, les objectifs fixés à travers l'étude, la méthode d'évaluation adaptée à utiliser, l'utilisateur final, et la pertinence des résultats à obtenir, changent largement.

- Le premier niveau d'analyse correspond à une **petite** échelle (1/100 000), dite "**régionale**", que nous appellerons dans notre cas "**provinciale**" car coïncide avec le découpage administratif de la province de **Chefchaouen** (Figure VI-1A), et avec l'utilisation d'une **approche heuristique par combinaison de cartes d'index**, adaptée à cette échelle ;
- Le deuxième niveau d'analyse correspond à une échelle **moyenne** (1/50 000), que nous appellerons "**méso-échelle**" entrepris au niveau d'un environnement fortement montagneux (2136m d'altitude) par rapport aux secteurs avoisinants (Figure VI-1B et C) à l'échelle de la chaîne Rifaine. Il s'agit de la région de Bab Taza dont les limites coïncident avec celles de la **carte IGN** de Bab Taza à l'échelle de 1/50 000^{ème}.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

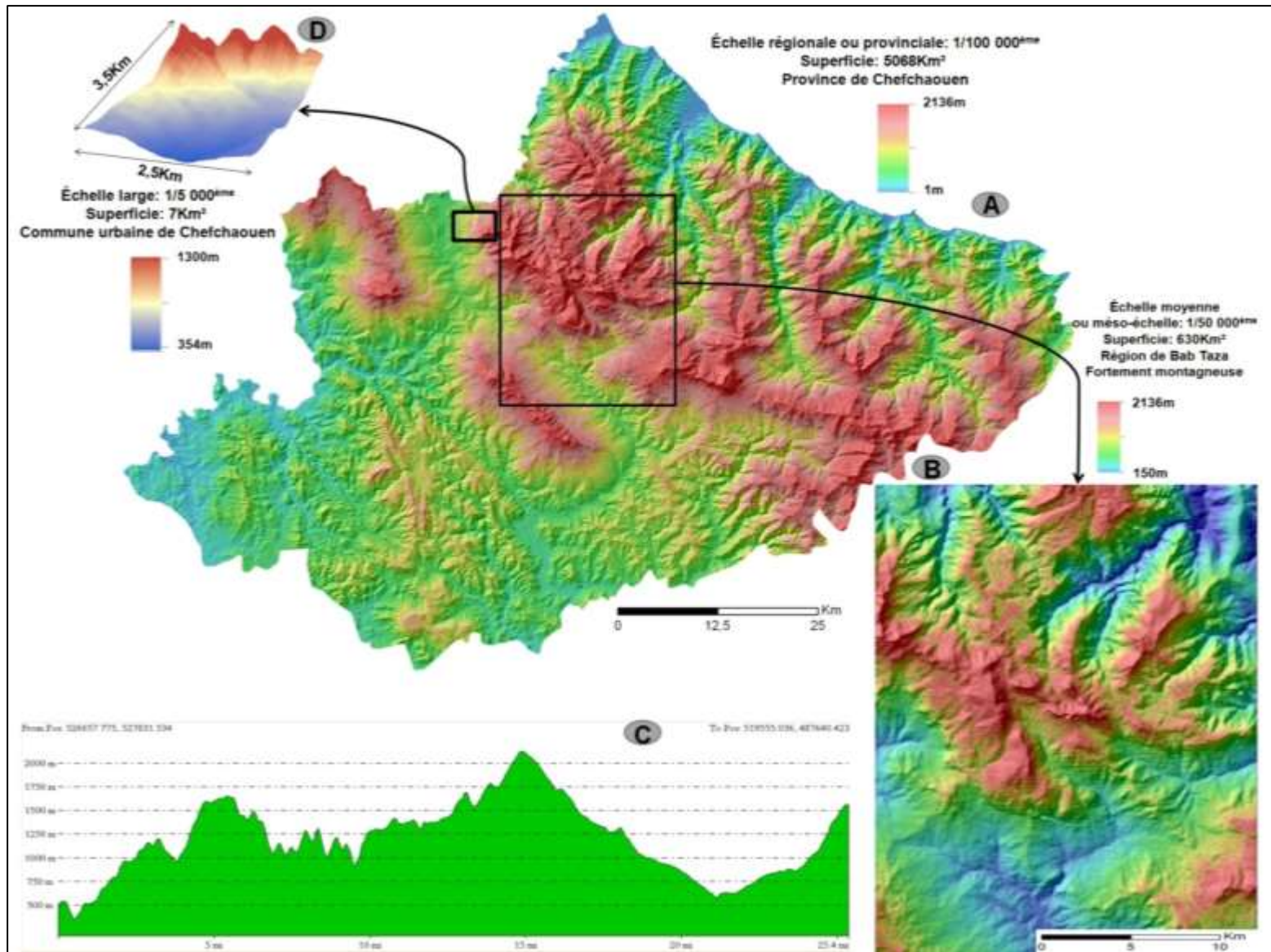


Figure VI-1 : les secteurs d'étude sélectionnés à trois différentes échelles pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain.

Cependant, pour la zone de Bab Taza deux approches probabiliste statistiques et adaptées pour l'analyse de la susceptibilité à **méso-échelle** ont été sélectionnées. Il s'agit d'une **méthode bayésienne bivariée** connue sous le nom de la **théorie de l'évidence**, et une autre **multivariée** et connue sous le nom des **régressions logistiques**. L'objectif de cette partie, est de modéliser la SMT dans une même région par l'utilisation de deux approches différentes, afin de sélectionner le modèle le plus adapté pour l'évaluation de la SMT dans un environnement montagneux rifain par la comparaison des résultats obtenus.

- Le troisième niveau d'analyse correspond à une **grande** échelle (**1/5 000**), dite "**large**", que nous appellerons dans notre cas "**détaillée**" elle coïncide avec les limites du plan urbain de la commune urbaine de la ville de Chefchaouen à l'échelle de 1/5 000^{ème}, et avec l'utilisation d'une **approche déterministe**, adaptée à cette échelle (Figure VI-1D). A cette même échelle, nous tenterons d'effectuer une analyse du risque mouvements de terrain en tenant compte des enjeux et de la vulnérabilité des éléments exposés.

La démarche méthodologique utilisée pour chaque niveau (échelle) d'analyse sera détaillée dans la partie correspondante.

2. Zonation de la susceptibilité à échelle régionale (1/ 100 000) de la province de Chefchaouen par approche heuristique

2.1. Sélection des paramètres générant les mouvements de terrain

La formation d'un mouvement de terrain dépend de la conjonction de plusieurs paramètres (facteurs). Ces derniers peuvent être rassemblés en cinq grands groupes (Tableau VI-1) à savoir : la sismicité, l'occupation des sols, la géologie, la géomorphologiques, et les conditions hydrologiques. Les facteurs utilisés pour notre secteur d'étude ont été soigneusement sélectionnés et examinés, en se basant sur leur pertinence, leur disponibilité (ou existence) et leur échelle. Par conséquent, neuf cartes matérialisant les paramètres ont été intégrées: lithologie, failles, sismicité, gradient de pente, hypsométrie, exposition des versants, réseau hydrographique, précipitations, et occupation des sols.

Groupes	Source	Echelle et/ou Résolution	Paramètres
Sismicité	-Archives et catalogues des enregistrements sismiques	—	-Isopropondeurs des séismes
Occupation des sols	-Images Spot THR -Base de données existantes	2.5m 1/500 000ème	-Occupation des sols
Géologie	-Carte géologique -Ortho images	1/500 000ème 2.5, 25, et 30m	-Unités géotechniques et géomorphologiques -Densité de la fracturation
Géomorphologie	-Image Radar Aster GDEM	25m	-Gradient de pente -Hypsométrie -Exposition
Hydrologie	-Image Radar Aster GDEM -Cartes topographiques -Enregistrements des précipitations	25m 1/100 000ème —	-Précipitations -Densité du réseau hydrographique

Tableau VI-1 : Groupes et liste des paramètres sélectionnés dans la présente étude ainsi que les données utilisées.

2.2. Méthodologie : Combinaison de cartes d'index

Le zonage de la susceptibilité et de l'aléa par combinaison des cartes d'index a été proposée initialement par [Anbalagan et al., 1992](#). Il s'agit d'une méthode heuristique indirecte et qualitative. Elle permet d'évaluer la susceptibilité en se basant sur la hiérarchisation des différents paramètres (matérialisés par des cartes) significatifs de terrain, en procédant à l'attribution des poids relatifs à chaque classe (ou subdivision) de ces derniers selon leur importance relative dans la genèse des MT. Le nombre de carte en entrée (paramètres) dépend de l'avis du chercheur effectuant l'analyse qui décide à l'avance quels sont les facteurs importants, et qui doivent donc être cartographiés et numérisés, ce qui peut être influencé par la pertinence du (quelconque) sur la carte finale en sortie. Quant aux poids relatifs, ils peuvent être attribués en se basant sur les connaissances de l'expert (géologue, géomorphologue...) menant cette analyse ([Anbalagan et al., 1992](#); [Nagarajan, 2000](#); [Saha et al., 2002](#)), et qui peut se faire aider des statistiques basées sur la relation entre phénomènes inventoriés (MT) et les paramètres significatifs précédemment sélectionnés ([Dai et al., 2001](#); [Lee et Min, 2001](#); [Lee et al., 2004](#); [Lee et Talib, 2005](#)). Cependant, une fois que les différents poids sont assignés, tous les paramètres sont rassemblés dans une seule et unique carte d'index de susceptibilité aux mouvements de terrain (IS_{MT}), et ce à l'aide de la formule (Equation.1) proposée par [Voogd, 1983](#), et permettant le calcul des sommations linéaires pondérées. La démarche est résumée dans la figure VI-2.

$$\text{Equation.1 } IS_{MT} = \sum_{j=1}^n W_j w_{ij}$$

Avec :

IS_{MT} : Index de la susceptibilité aux mouvements de terrain

(Mass movements susceptibility index).

W_j : Valeur de la pondération assignée au paramètre 'j'

(Weight value of parameter 'j')

w_{ij} : Valeur de la pondération assignée à la classe 'i' paramètre 'j'

(Weight value of class 'i' in parameter 'j')

n : Nombre de paramètres

(Number of parameters)

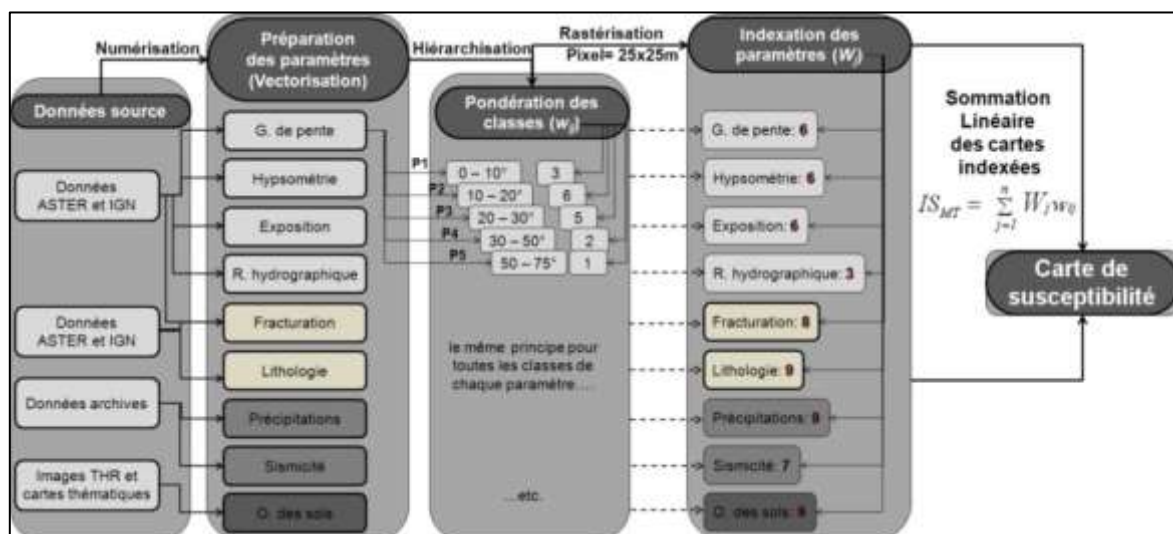


Figure VI-2 : Résumé du déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain par combinaison des cartes d'index dans la province de Chefchaouen.

2.3. Indexation des paramètres

Pour l'évaluation de la SMT par combinaison de cartes d'index, la première étape est la détermination des poids relatifs. Ceux-ci, changent en toute logique, d'un paramètre à l'autre, étant donné que chaque poids reflète l'importance de chaque paramètre dans le conditionnement des instabilités des versants. Dans cette méthode, il est classiquement admis que l'affectation ne peut s'effectuer par voie quantitative, et dépend seulement du scientifique. Dans notre cas, les deux voies seront combinées pour l'indexation nos paramètres, et qui se déroulera à deux niveaux :

-1° pour chaque paramètre (W_j) avec des valeurs variant de 1 à 9, valeurs qui reflètent l'importance de chaque paramètre gérant le processus de l'instabilité des versants dans le secteur d'étude. Pour cela, nous nous baserons en première approximation sur notre compréhension sur l'analyse des interrelations des différents paramètres. Pour cette valeur, nous l'avons fait correspondre dans notre cas, à la valeur maximale affectée à une ou plusieurs classes d'un même paramètre ;

-2° pour chaque classe (W_{ij}) avec des valeurs variant de 1 (classe faiblement susceptible) à 9 (classe fortement susceptible), **essentiellement basées sur l'étude statistique** (évaluation quantitative) effectuée sur **des données réelles de terrain** (Cf. conclusions des sections du Chapitre 5), à la base de l'examen de la relation entre la distribution spatiale des phénomènes inventoriés et les différentes classes des tous les facteurs sélectionnés et considérés comme causatifs (ou causaux) après les avoir hiérarchisés.

Tableau VI-2 : Pondération des différentes classes et poids relatifs des paramètres pris en compte pour la genèse des mouvements de terrain dans le province de Chefchaouen, SC : superficie de la classe ; FC : Fréquence de la classe ; NBR de MT : Nombre de mouvement de terrain ; F de MT : Fréquence des mouvements de terrain ; PRC : Poids relatifs de chaque classe W_{ij} ; et PRF : Poids relatif de chaque facteur (W_j = valeur max du PRC du paramètre).

Paramètres sélectionnés	SC	FC	NBR de MT	F de MT	PRC	PRF
Lithologie: UG						9
UG1	463,21	8,11	98	7,72	2	
UG2	245,25	4,29	31	2,44	1	
UG3	623,48	11,18	85	6,69	2	
UG4	377,07	6,6	144	11,34	5	
UG5	2020,37	35,4	470	37,03	9	
UG6	487,50	8,57	124	9,77	3	
UG7	656,25	11,5	138	10,87	4	
UG8	818,34	14,34	179	14,1	6	
Fracturation: Densité						8
Très faible	37,15	0,73	6	0,5	1	
Faible	633,65	12,5	133	11,2	2	
Moyenne	1425,20	28,12	277	23,33	6	
Elevée	1878,62	37,07	514	43,3	8	
Très élevée	1093,67	21,57	257	21,65	7	
Sismicité: Isoprofondeur (Km)						7
0 - 10	491,45	9,68	136	11,45	4	

10 - 20	2642,00	52,13	629	52,99	7	
20 - 30	1061,10	20,93	205	17,27	5	
30 - 40	631,17	12,45	172	14,49	5	
40 - 100	242,18	4,77	45	3,79	2	
Gradient de pente: Degré						6
0 - 10°	1377,30	27,55	224	18,85	3	
10 - 20°	2164,46	43,29	542	45,62	6	
20 - 30°	1151,91	21,73	313	26,34	5	
30 - 50°	365,51	7,31	106	8,92	2	
50 - 75°	5,52	0,1	3	0,25	1	
Hypsométrie: Altitude (m)						6
1 - 350 m	1265,20	23,98	329	1,26	1	
350 - 650 m	1656,03	33,14	360	19,42	3	
650 - 950 m	966,07	19,31	230	20,01	3	
950 - 1250 m	649,63	12,97	161	52,61	6	
1250 - 2136 m	530,46	10,6	107	6,67	2	
Expositions: Angle avec le N						6
Plat standard (-1)	0,00	2,22	6	0,5	1	
Nord (0-22.5 & 337.5-360)	600,00	12,01	185	15,58	6	
Nord-Est (22.5-67.5)	645,29	12,71	137	11,54	3	
Est (67.5-112.5)	654,89	12,89	110	9,26	2	
Sud-Est (112.5-157.5)	533,72	10,51	104	8,76	2	
Sud (157.5-202.5)	601,08	11,83	154	12,97	4	
Sud-Ouest (202.5-247.5)	651,68	12,83	179	15,08	5	
Ouest (247.5-292.5)	682,62	13,44	173	14,57	5	
Nord-Ouest (292.5-337.5)	598,46	11,78	139	11,71	4	
RH: Densité						3
Très faible	169,48	3,33	29	2,44	1	
Faible	1974,63	38,95	443	37,32	2	
Moyenne	2412,77	47,6	634	53,41	3	
Forte	482,61	9,51	81	6,82	1	
Très forte	28,37	0,6	0	0	1	
Précipitations: Hauteur (mm)						9
<900 mm	128,03	2,57	15	1,26	1	
900 - 1050 mm	1035,94	20,42	230	19,42	7	
1050 - 1150 mm	794,72	15,67	237	20,01	7	
1150 - 1250 mm	2430,96	47,96	623	52,61	9	
1250 - 1394 mm	678,08	13,38	79	6,67	3	
Occupation des sols						9
Plan d'eau	11,11	1,27	0	0	1	
Alluvion	638,08	10,73	85	6,53	3	
Zone urbaine	253,26	4,25	28	2,1	2	
Terrain agricole	2745,38	45,08	578	44,46	9	
Reboisement	182,38	3,06	37	2,84	2	
Matorral	669,58	11,27	233	17,92	4	

Forêt dense	1444,37	24,29	339	26,07	6	
-------------	---------	-------	-----	-------	---	--

Ainsi, les caractéristiques lithologiques, les précipitations, et l'occupation des sols qui contrôle l'infiltration, sont considérées comme étant facteurs majeurs influençant l'occurrence des MT dans la province de Chefchaouen, et donc la valeur **9**, la plus importante, leur a été assignée comme poids relatif. Ce choix est tout à fait valide, qu'il soit basé - sur les statistiques obtenues, ou, - sur une évaluation purement naturaliste émanant des observations de terrain et de la connaissance du contexte (secteur ou environnement) de l'étude. Le facteur fracturation vient en second lieu d'où l'attribution de la valeur **8** comme poids relatif, puisqu'il est caractérisé par une grande densité dans le secteur d'étude, et qui parallèlement se trouve exacerbé l'activité sismique, et à qui nous avons attribué le poids **7**.

Les facteurs géométriques ou topographiques à savoir, le gradient de pente, l'hypsométrie et l'exposition des versants, sont aussi importants dans le contrôle des MT dans la province de Chefchaouen et partout dans la chaîne Rifaine, mais secondaires, par rapport aux paramètres précités, ce qui fait que la valeur **6** leur a été attribuée. Quant au réseau hydrographique, dont l'effet se fait sentir par l'impact du sapement latéral des torrents, ou celui du drainage et l'évacuation des débris, son impact est beaucoup moins important que les facteurs précédents, vu la faible densité qu'il présente dans le secteur d'étude ; nous lui attribuons une valeur pondérale de **3**. Les valeurs des poids relatifs affectées aux différentes classes pour chacun des neuf facteurs ont été assignées de la même façon (Tableau VI-2).

2.4. Résultat : Zonage de la susceptibilité à échelle régionale

Pour obtenir la carte de SMT à échelle régionale (1/100 000) pour la province de Chefchaouen l'importance de chaque facteur a été exprimée par le produit des valeurs pondérales des différentes classes et le poids du paramètre lui-même. Après quoi, il a été possible de générer la carte de SMT par sommation linéaire des cartes indexées à l'aide de l'équation.1.Celle-ci (Figure VI-3B), montre des valeurs comprises entre 156 et 473, avec une valeur moyenne de 360, et une déviation standard de 46. Toute la chaîne de traitement, incluant l'attribution des pondérations des classes, des poids relatifs, le calcul de la carte de SMT, s'est effectuée sous ArcGis 10 et à l'aide de plusieurs modules, notamment :

- *ArcToolbox, Data management tools, indexes, et puis addattribute indexes*, pour assigner les pondérations des différentes classes ;
- *ArcToolbox, Conversion tools, To Raster, et puis Polygon to raster*, pour la rasterisation des paramètres ;
- *ArcToolbox, Spatial analyst tools, Overlay, et puis Weighted overlay*, pour attribuer les poids aux différents paramètres et établir la carte de susceptibilité.

Cependant, pour faciliter la lecture et l'interprétation de notre carte, il est essentiel de traduire les valeurs de susceptibilité obtenues (156 – 473) en termes de niveaux (classes) de susceptibilité. Ceci, n'est pas du tout évident à réaliser, puisqu'aucune démarche automatique n'existe pour l'effectuer (Ayalew et al., 2004 ; Ayalew et Yamagishi, 2005), car dans la plus part des études antérieures, les cartographes de la susceptibilité se basent sur leurs propres expériences et avis pour passer d'une carte présentée en valeurs continues (*continuous data*) à des classes ou niveaux d'une façon manuelle (Süzen et Doyuran 2004 ; Guzzetti et al., 1999 ; Lee et Min, 2001 ; Dai et Lee, 2002 ; Ohlmacher et Davis, 2003...etc). Une telle démarche, en plus de sa subjectivité, elle est inutilisable dans le cas d'une distribution multimodale (Süzen et Doyuran, 2004), raison pour laquelle nous avons opté pour l'utilisation

d'une méthode basées sur des lois à la fois empiriques et mathématiques, déjà présentes dans notre programme SIG, où on distingue :

- a. La méthode « Intervalle égale » “*Equal interval*” est la plus simple. Elle donne une subdivision en intervalles (classes) de tailles égales, ce qui ne réponds pas à l'objectif souhaité en donnant des classes de susceptibilité de la même taille, ce qui totalement différent de la réalité ;
- b. La méthode « Quantile » “*Quantil*” reclassifie la carte en plusieurs gammes en se basant sur des points essentiels pris à des intervalles réguliers, sachant que la variable en question peut avoir un comportement très aléatoire. Cela, fait que les différentes classes ou gammes ont des tailles très inégales puisqu'obtenue d'une façon cumulative. Il en résulte que les pixels regroupés dans chaque intervalle ont des valeurs très variables, ce qui revient à rassembler plusieurs niveaux de probabilité (susceptibilité) dans un même intervalle, d'où la non utilisation de cette dernière ;
- c. La méthode « Déviation standard » “*Standard deviation*” reclassifie les données continues en se basant sur la valeur de la déviation standard et de la moyenne des probabilités obtenues, ce qui rend cette méthode relativement logique que les précédentes, et aussi utilisable dans notre cas.

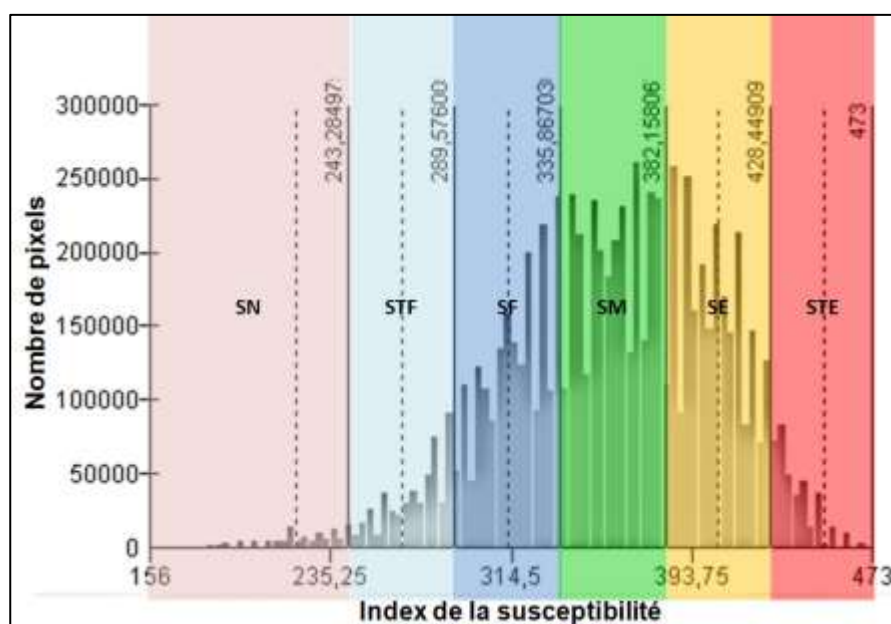


Figure VI-4 : Histogramme d'indices (index) de la susceptibilité par combinaison de carte d'index. Reclassification par la méthode de la déviation standard (Standard deviation) ; SN : susceptibilité nulle ; STF : susceptibilité très faible ; SF : susceptibilité faible ; SM : susceptibilité moyenne ; SE : susceptibilité élevée ; et STE : susceptibilité très élevée.

Ainsi, elle nous a permis de subdiviser l'histogramme des indices de la susceptibilité en 6 catégories (Figure VI-4). Ces dernières correspondent chacune à une classe ou niveau de susceptibilité (Figure VI-6A), à savoir : **Nulle** (indices : 156 – 243) qui représente 1.23% de la superficie totale de la province de Chefchaouen d'après cette méthode de reclassification, et elle couvre essentiellement les plaines alluviales de la région, notamment la plaine de l'oued

Laou ; **très faible** (indices : 243 – 289) 5.76%, qui correspond en grande partie aux zones des différents lits des oueds ; **faible** (indices : 289 – 335) 22.86% qui caractérise les zones du domaine rifain interne formant les unités géotechniques et géomorphologiques UG1 (terrains cristallins), UG2 (terrains métamorphiques), UG4 (terrains calcaires et dolomitiques). Cela montre le rôle primordial exercé par le paramètre lithologie dans le conditionnement des mouvements de terrain ; **moyenne** (indices : 335 – 382) 35.8% qui se concentre dans toutes les extrémités du secteur à l'exception de la partie NW de ce dernier ; **élevée** (indice : 382 – 428) 29.39% qui forme une sorte d'auréole de celle **très élevée** (indice : 428 – 473) qui présente à peine 5% de la totalité du secteur d'étude. Il en ressort que la subdivision de la susceptibilité par la méthode de la déviation standard, sous-estime largement la classe à susceptibilité très élevée, ce qui un grand inconvénient et d'où l'obligation de procéder en une autre subdivision par une méthode plus adaptée.

- d. La méthode « Discontinuités naturelles » « Natural breaks » semble être une des meilleurs méthodes de classification, puisqu'elle permet de rassembler les pixels dont les valeurs sont similaires ou très comparables dans des groupements communs en maximisant la différence entre ces derniers. Les limites entre les différents groupements (classes ou subdivisions) correspondent à des changements brutaux (ou sauts, breaks) dans les valeurs de la variable (susceptibilité) matérialisée dans notre cas par les valeurs de pixels. Comme montré dans l'histogramme des indices de la susceptibilité (Figure VI-5), 5 subdivisions de cette dernière variant entre la catégorie très faible à celle très élevée ont été définies par la méthode des ruptures naturelles.

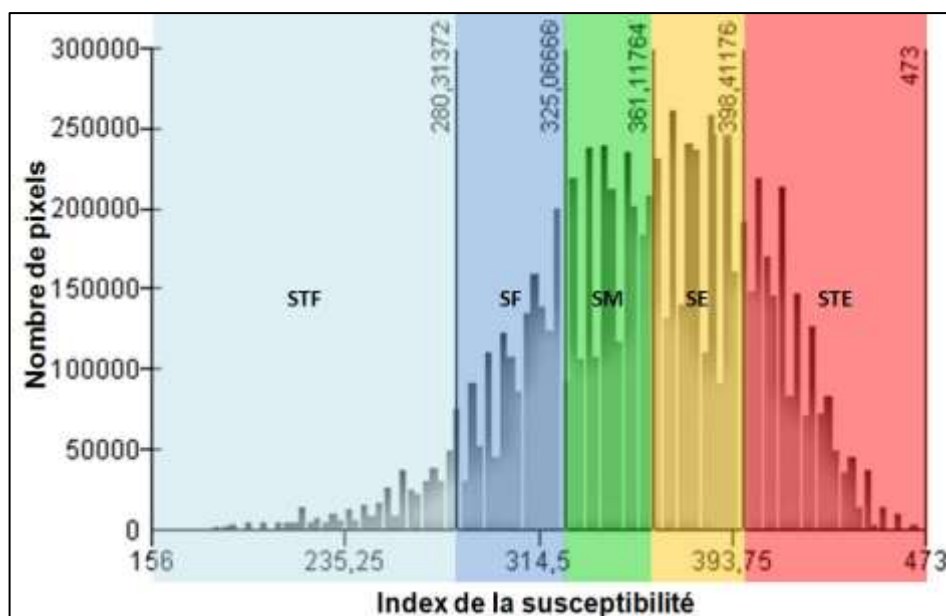


Figure VI-5 : Histogramme d'indices (index) de la susceptibilité par combinaison de carte d'index. Reclassification par la méthode des ruptures naturelles (Natural breaks) ; SN : susceptibilité nulle ; STF : susceptibilité très faible ; SF : susceptibilité faible ; SM : susceptibilité moyenne ; SE : susceptibilité élevée ; et STE : susceptibilité très élevée.

- A l'exception de la classe à **STF** et celle **très élevée**, les autres subdivisions ont généralement des indices comparables à ceux obtenus par la déviation standard. La classe à STF (indice : 156 – 280) présente environ 5% de la superficie totale

de la province de Chefchaouen (Figure VI-6B), et donc environ la même superficie présentée par l'ensemble de la **SN** et **STF** obtenues par la classification de la déviation standard. Sur le plan visuel, cette classe couvre les zones de plaines et terrasses alluviales de la façade méditerranéenne. L'existence de cette classe est en conformité totale avec les données de terrain, caractérisées par l'absence d'instabilités de versants de cette zone, les facteurs environnementaux n'y le permettent pas.

- La classe à **faible** susceptibilité (indice : 280 – 325) présente 18.36% des surfaces susceptibles et qui se localisent dans les périphéries de la province. Il s'agit essentiellement la partie NW, en concordance avec les données de terrain ; cette partie est occupée par les terrains les plus compétents de la chaîne Rifaine (UG1, UG2, et la UG4), l'effet stabilisant des versants par la forêt au maximum de sa densité, sans oublier les précipitations qui commencent déjà à décroître à partir des sommets de la dorsale calcaire pour arriver à leur minimum sur le flanc méditerranéen du Rif. La faible susceptibilité de la partie ouest et SW du secteur s'explique par les pentes très douces (généralement inférieurs à 7°) défavorables pour la genèse de mouvements de terrain, à l'exception de quelques ravinements intenses (badlands) au niveau des formations marneuses, schisteuses ou argileuses par l'effet des précipitations accrues et le caractère torrentiel (occasionnel) du réseau hydrographique.
- La classe à susceptibilité **moyenne** quant à elle quant à elle (indice : 325 – 361), recouvre 26.11% du secteur d'étude, ce qui est légèrement moins important que dans la reclassification précédente (35.8%). Elle se calque généralement sur les extrémités du couloir de l'accident de Jebha, et sur l'emplacement d'un des principaux fronts de chevauchement délimitant le domaine interne de la chaîne Rifaine. A ce niveau, la densité de la fracturation devient assez importante fait que cette zone soit moyennement susceptible aux instabilités des versant, en couplage avec un comportement sismique superficiel (Foyers à 10 à 20 ou 20 à 30 km de profondeur), et avec des précipitations qui dépassent les 1000 mm en raison de l'augmentation de l'influence climatique Atlantique ...etc,
- La classe de susceptibilité **élevée** (indice : 361 – 398) présente 22.31% de la totalité du secteur. Cette valeur dépasse largement son équivalente obtenue par la déviation standard, où elle atteint à peine les 5%, ce qui est en soi une forte sous-estimation de cette catégorie de la susceptibilité. D'un point de vue purement spatial, la localisation de la susceptibilité très élevée obtenue par la méthode des « discontinuités naturelles » est tout à fait logique, et en total concordance avec les données de la vérité terrain. c'est-à-dire que toutes les conditions environnementales et anthropiques sont réunies et favorables pour que cette zone soit la plus susceptible de la province de Chefchaouen.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
 ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

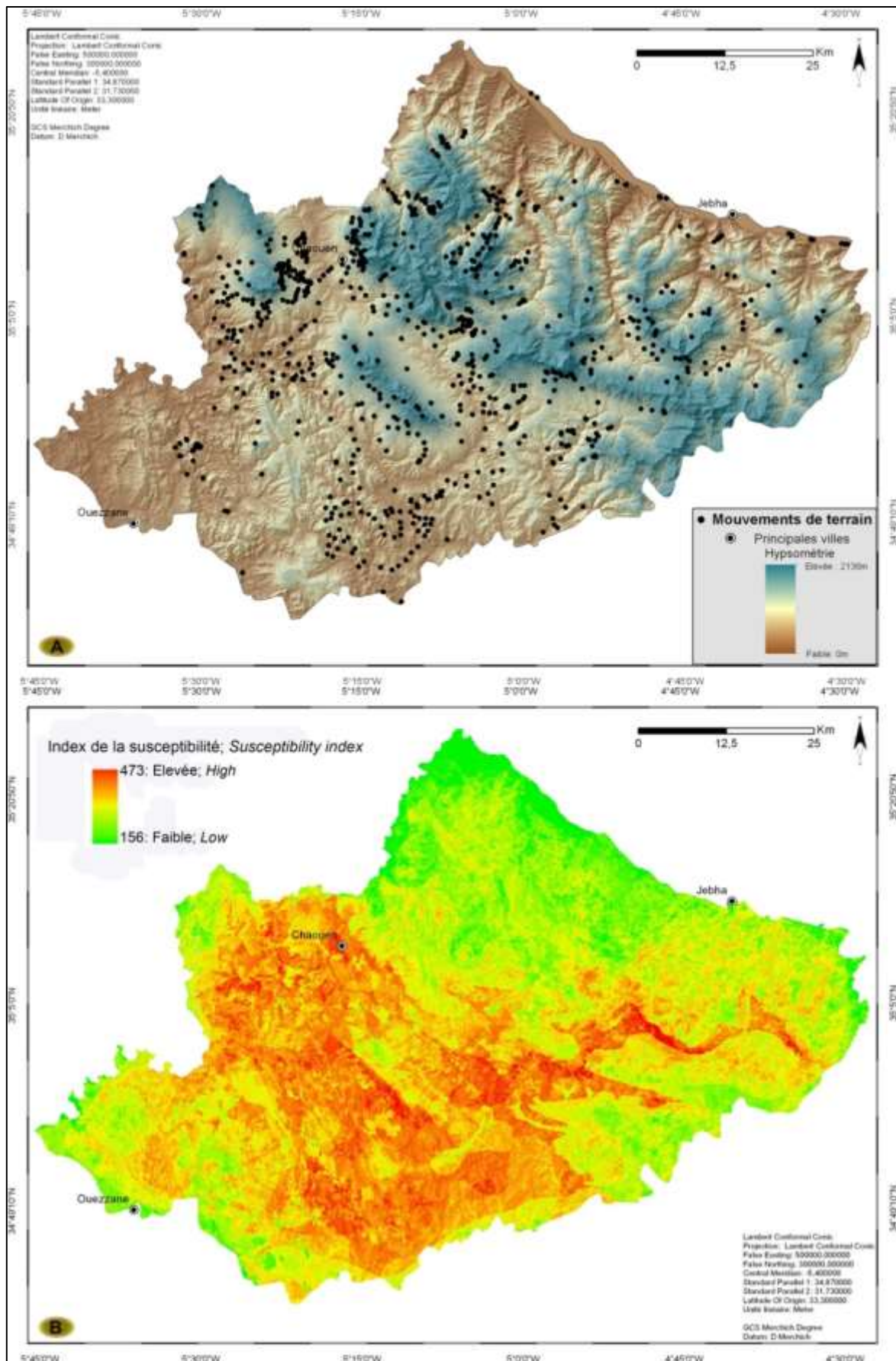


Figure VI-3 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la province de Chefchaouen, obtenue par approche de combinaison de cartes d'index.

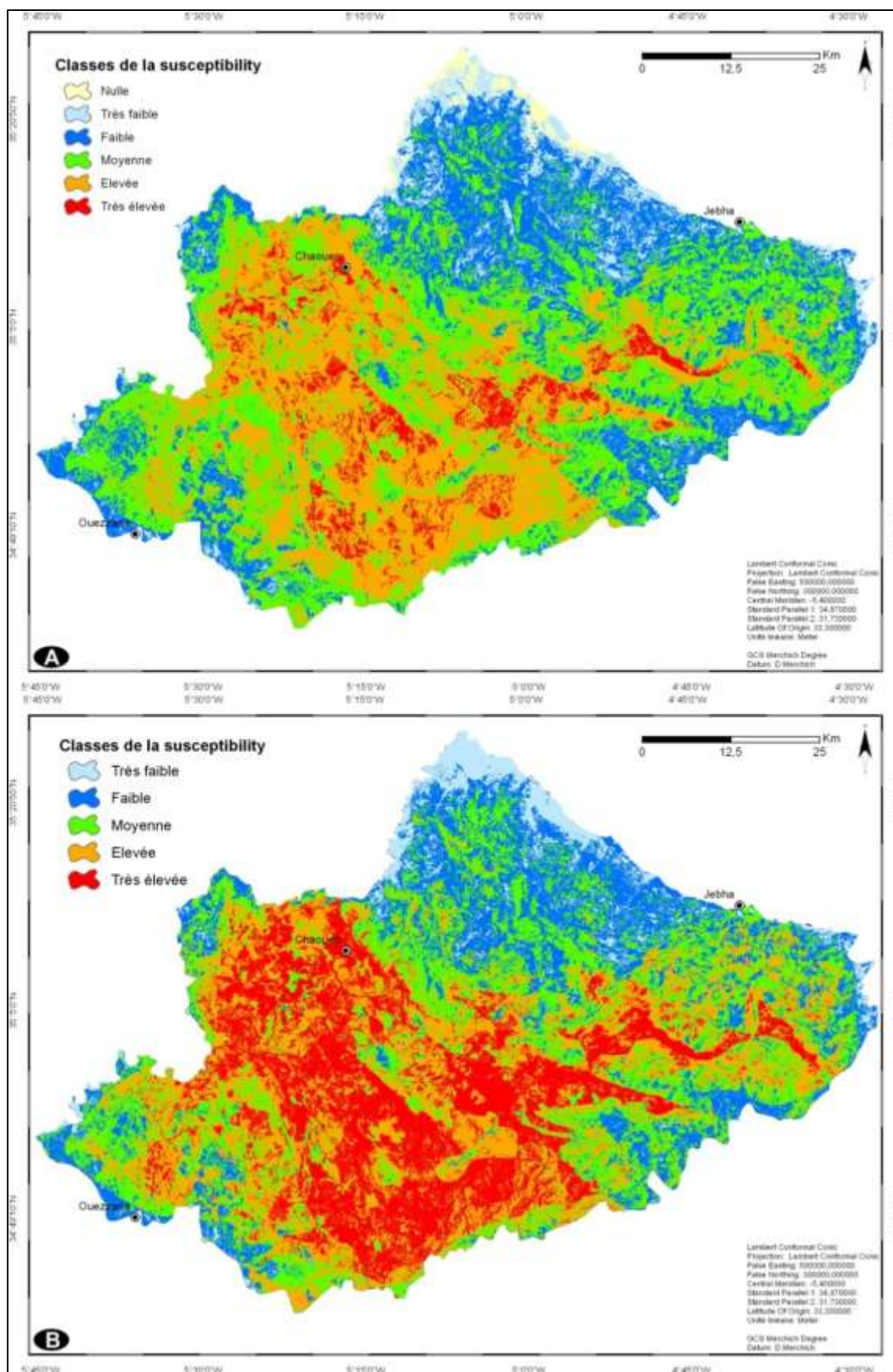


Figure VI-6 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la province de Chefchaouen, par combinaison de cartes d'index, A : Reclassification par la méthode de la déviation standard (Standard deviation) ; B : Reclassification par la méthode des ruptures naturelles (Natural breaks).

La subdivision à susceptibilité **très élevée** (indice : 398 – 473) présente 22.31% de la totalité du secteur. Cette valeur dépasse largement son équivalente obtenue par la déviation standard, où elle atteint à peine les 5% ce qui est en soit une grande sous-estimation de cette catégorie de la susceptibilité. D'un point de vue purement spatial, l'emplacement de susceptibilité très élevée obtenue par la méthode des « *Natural breaks* » est tout à fait logique, et en total concordance avec les données de la vérité terrain. C'est-à-dire que toutes les conditions environnementales et anthropiques sont réunies et favorables pour que cette zone soit la plus susceptible de la province de Chefchaouen. A titre d'exemple, la densité de la fracturation est très forte dans cette partie, les précipitations sont à leur maximum. Mais également, l'occupation des sols est caractérisée par une absence d'une couverture forestière et une dominance des terrains agricoles ainsi que par des terrains nus générateurs d'instabilité. La lithologie est représentée par les terrains les plus tendres et fragiles du secteur (UG5), la sismicité est essentiellement superficielle, un gradient de pente de l'ordre de 20 à 30° caractéristique du déclenchement des mouvements de terrain à l'échelle de la chaîne Rifaine...etc. Par conséquent, la carte de susceptibilité définitive à échelle régionale (Provinciale) obtenue par approche heuristique (combinaison de cartes d'index) pour la province de Chefchaouen, et celle reclassifiée par la méthode des discontinuités naturelles et matérialisant la SMT dans ce secteur par 5 classes distinctes (Figure VI-6B), en débutant par celle très faible, et arrivant à celle très élevée.

2.5. Qualité de la carte de susceptibilité : validation du modèle

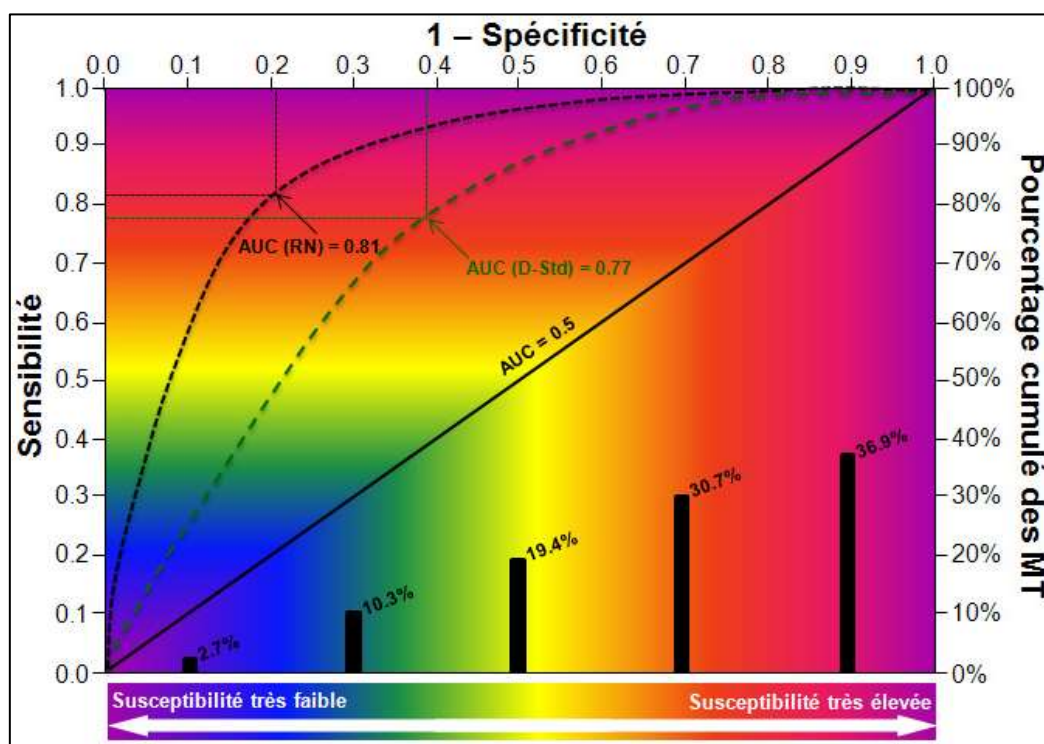


Figure VI-7: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) (ordonnée du gauche et abscisse du haut) par ruptures naturelles (RN, Natural breaks) représentée par la courbe en tirets noirs; par déviation standard (D-Std, Standard deviation) représentée par la courbe en tirets verts. & Pourcentage cumulé des mouvements de terrain (ordonnée du droite) en fonction des classes de susceptibilité obtenues (abscisse du bas).

Pour vérifier la validité de notre carte de susceptibilité, nous avons eu recours à l'utilisation des mouvements de terrain que nous avons précédemment cartographiés à l'échelle de toute la province de Chefchaouen, afin de construire une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Il s'agit d'une représentation graphique définissant la relation existante entre la sensibilité et la spécificité d'un test pour toutes les valeurs seuils possibles (Swets, 1988 ; Chung et Fabbri, 1999). L'ordonnée (sensibilité) présente l'occurrence des MT, et l'abscisse correspond à la quantité (1 - spécificité) qui représente l'index de la susceptibilité obtenu en 100 subdivisions (Figure VI-7). Au fait, l'aire sous la courbe ROC (AUC : *area undercurve*) définit la qualité d'un système prédictif en caractérisant sa capacité à anticiper (prédire) le plus correctement possible la survenance ou non d'un événement précis (en occurrence les MT). Pour un modèle performant, signifie : $0.5 < AUC \leq 1$. $AUC = 1$, étant la courbe ROC du modèle idéal pour une prédiction parfaite, et $AUC = 0.5$ étant la courbe ROC d'un modèle prédictif complètement aléatoire.

Notre carte d'index de la susceptibilité obtenue par combinaison de carte d'index, est reclassifiée par la méthode des discontinuités naturelles semble être un très bon outil de prédiction des MT dans notre secteur. Cela s'explique par la valeur de la sensibilité et celle de 1 - spécificité de l'AUC en question, et qui sont respectivement 0.81 et 0.71. La valeur de AUF pour la carte de susceptibilité par la reclassification avec la déviation standard (sensibilité = 0.77, et 1 - spécificité = 0.61), vient corroborer notre validation de la méthode des discontinuités naturelles effectuée précédemment à la base des données réelles de terrain et nos connaissances de ce dernier. Dans le même sens la validité de notre modèle est attestée par les pourcentages des mouvements de terrain se localisant dans la classe de susceptibilité élevée et celle très élevée, et qui avoisine les 70%. Les 30% restant, se partagent sur les classes de susceptibilité, moyenne, faible, et très faible.

2.6. Discussion et conclusion : zonation de la susceptibilité à échelle régionale

Dans cette partie une carte de susceptibilité aux mouvements de terrain a été produite, par l'utilisation d'une approche heuristique analytique hiérarchisée. Il s'agit de la combinaison de cartes d'index. Pour ce faire, neuf paramètres intervenant dans la genèse des MT, ont été intégrés, après leur hiérarchisation et pondération qui s'est déroulée à deux niveaux pour les différentes classes et puis le paramètre dans sa globalité. Les paramètres sélectionnés sont : la lithologie, les précipitations, et l'occupation des sols ; en leur affectant le poids maximal (9) puisqu'ils sont les plus pondérants dans le conditionnement des instabilités des versants de la région. La facturation vient en deuxième niveau (8), suivie de la sismicité (7), les paramètres géométriques (gradient de pentes, hypsométrie, et exposition des versants) (6), et finalement un réseau hydrographique très peu évolué (3). L'importance de chaque classe, a été définie objectivement (qualitativement) à l'aide des statistiques établies sur les données réelles de la région.

La carte de susceptibilité a été réalisée par sommation linéaire des cartes (paramètres) indexées, et nous avons obtenu des index compris entre 156, le niveau de susceptibilité le plus bas de la province, et 473, celui le plus élevé du secteur. Ensuite, il a été indispensable de traduire les index de susceptibilité en termes de niveaux descriptifs spatialement distincts. Pour ce nous avons testé deux différentes méthodes, la déviation standard et les discontinuités naturelles. C'est cette dernière qui a été retenue, car la plus adaptée après comparaison des histogrammes d'index de susceptibilité des deux méthodes, et aussi par confrontation des résultats avec les données de terrains.

Cette carte comprend cinq classes de susceptibilité, de la très faible à la très élevée. Elle a cependant été utilisée en association avec les mouvements de terrain inventoriés (glissements, écroulements, coulées de débris, et les glissements – sapements) pour la construction d'une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Cette courbe nous a permis par l'AUC (*area under curve*) d'examiner la qualité de notre modèle et sa capacité prédictif à anticiper (prédire) les aires susceptibles ou pas aux instabilités de versants. La valeur de l'AUF de l'ordre de 0.81 pour la sensibilité et 0.71 pour la sensibilité, témoigne de la grande performance de notre modèle.

En dernier lieu mis à part, le grand temps nécessaire pour le traitement des données et leur intégration dans le modèle, la combinaison des cartes d'index et une méthode généralement aisée à mettre en place pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain. Si de nouvelles données (paramètres) sont disponibles, il est facile de les indexer et les intégrer dans le modèle pour raffiner les résultats.

3. Zonation de la susceptibilité à méso-échelle (1/ 50 000) dans un environnement montagneux

3.1. Introduction

Dans cette section, nous procéderons au zonage de la SMT à méso-échelle (1/50 000^{ème}) au niveau de la région de Bab Taza. Le choix de cette échelle d'analyse a été fortement conditionné par les données nécessaires et disponibles pour la cartographie de la SMT. C'est par exemple le cas des cartes topographiques (ING) à partir des quelle une partie de l'information est extraite. L'inventaire des MT pour toute la province de Chefchaouen a permis de déduire, que le secteur de Bab Taza présente une fréquence élevée des phénomènes inventoriés et donc, subit un très grand préjudice. Ce secteur voit co-exister les trois grands types de MT caractéristiques de la chaîne Rifaine. A cela, s'ajoute la grande densité de population, et l'existence de la route nationale N°2 qui permet l'accès vers l'Est du Rif.

L'approche de zonage de la susceptibilité s'articule sur l'utilisation de deux approches probabilistes statistiques. Il s'agit d'une **méthode bayésienne bivariée** connue sous le nom de la **théorie de l'évidence (TDE)**, et, une autre, **multivariée** et connue sous le nom des **régressions logistiques (RL)**. Ces deux approches sont prouvées comme donnant les meilleurs résultats pour l'évaluation de la susceptibilité. Elles ont été appliquées dans différents contextes montagneux (Carrara et al., 2003 ; Agnesi et al., 2003 ; Van Westen et al., 2003 ; Thiery et al., 2004 ; Zahiri et al., 2006 ; Neuhäuser et Terhorst, 2007 ; Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007 ; Poli et Strelacchini, 2007 ; Song et al., 2008 ; Nandi et Shakoor, 2009 ; Regmi et al., 2010 ; Yalcin et al., 2011...etc).

La démarche adoptée est représentée dans la figure VI-8, et peut être résumée en cinq grandes étapes.

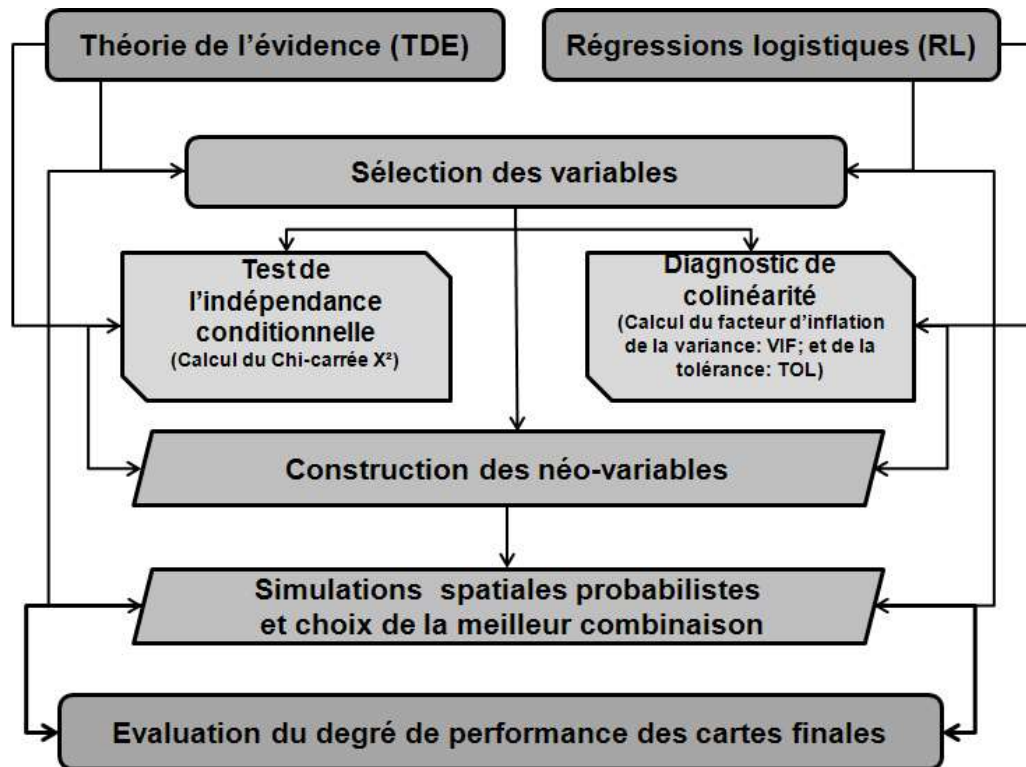


Figure VI-8: Résumé de la démarche de zonage de la susceptibilité à méso-échelle par la TDE et les RL.

- Après avoir rappelé les différents principes des deux méthodes probabilistes choisies, nous allons procéder à la **sélection des différents paramètres** à intégrer pour la modélisation de la susceptibilité MT.
- Cette étape sera suivie par la mise en œuvre **deux différents tests** selon la méthode à utiliser (TDE ou RL). Cette partie de base a pour objectif d'éviter les problèmes de baissement des calculs des probabilités algorithmiques par les deux approches.
- A ce niveau, nous procéderons à la **construction des néo-variables prédictives** pour remédier aux problèmes reconnus dans l'étape précédente.
- Ensuite **plusieurs simulations seront réalisées par les deux approches**. La comparaison des résultats permettra d'en sélectionner les meilleurs. 5° En dernier lieu degré de performance du meilleur résultat obtenu par chacune des deux méthodes sera évalué, afin déduire laquelle des deux est la plus adaptée pour le zonage de la SMT dans un contexte montagneux maghrébin à méso-échelle.

3.2. Secteur d'étude : région de Bab Taza

3.2.1. Cadre géographique

La région très peuplée de Bab Taza et ses alentours, connaissent chaque année une dizaine de MT importants. Elles se traduisent par: 1° des dommages corporels et matériels, pouvant affecter les individus et leurs biens, 2° des retards et des perturbations apportés au trafic dans le cas de coupure des routes (section de la nationale 2), 3° des dégâts causés aux habitations et aux terres agricoles.

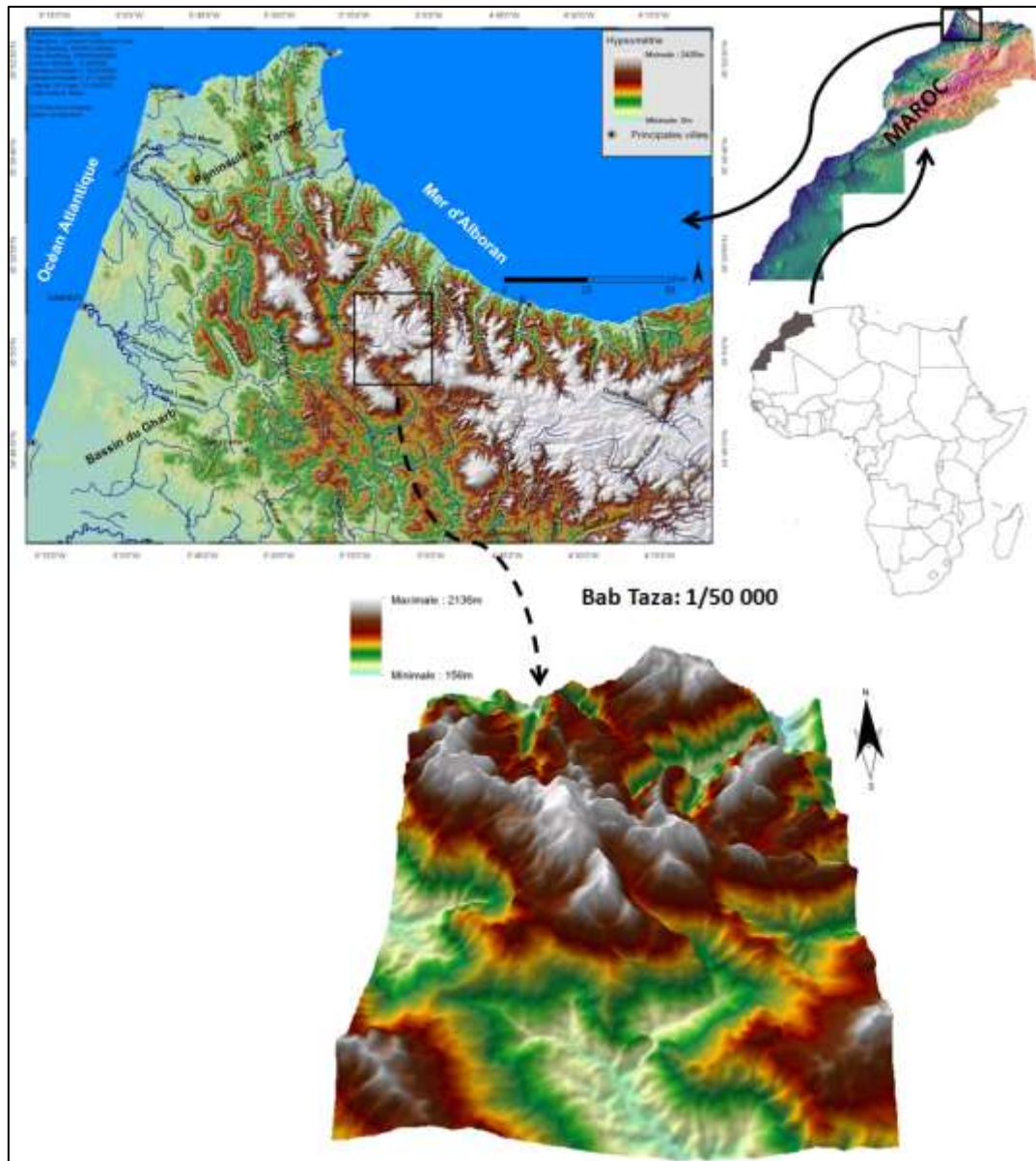


Figure VI-9: Position de la région de Bab Taza dans le rif occidental, et son hypsométrie.

3.2.2. Cadre géologique et géomorphologique

Cette région s'inscrit dans le contexte géologique et géodynamique du Rif occidental, que nous avons précédemment détaillé (Cf. Chapitre 2) et que nous rappelons ici d'une façon très succincte. Dans la région de **Bab Taza**, se rencontrent les trois domaines structuraux du Rif qui caractérisent l'ensemble de la chaîne.

La géomorphologie de la région est très caractéristique de la haute montagne du Rif (Figure VI-9) : zone interne de la chaîne Rifaine) avec des reliefs très importants (2200m). La conjugaison des facteurs essentiellement climatiques (océaniques), lithologiques (roches meubles), et structurales (surrection), permet le développement d'une grande dynamique érosive partout dans le Rif. Cela permet l'expression d'une multitude de formes de reliefs : des crêtes, des versants entaillés dans des alternances marno-calcaires ou grésopélitiques

possédant des profils adoucis (glacis : pente moyenne de 20-25°). Ces derniers sont localement soumis à un ravinement intense responsable d'un paysage de badlands. D'autres reliefs, cette fois très accidentés et des pentes très abruptes se rencontrent au niveau des grands contacts chevauchants entre les nappes de charriage, caractérisées par des vallées fortement encaissées comme dans les terrains de la Dorsale calcaire.

3.3. Rappels et principes des approches sélectionnées pour le zonage de la susceptibilité à méso-échelle

3.3.1. Théorie de l'évidence (TDE) : Approche bivariée

3.3.1.1. Introduction

L'approche bivariée par la Théorie de l'évidence (*Weight of evidence*) est l'approche adoptée pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain à méso-échelle (ou échelle moyenne 1/50 000) dans le secteur de Bab Taza. Elle a été employée pour la première fois en médecine (Spiegelhater et Kill-Jones, 1984), puis en géologie dans le domaine de l'exploration minière (Bonham-Carter et al., 1989, Bonham-Carter, 1994, et Agterberg et al., 1990). C'est est une version log-linéaire du théorème général de Bayes utilisant les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité a priori et de probabilité a posteriori. Elle a été utilisée et testée par plusieurs auteurs (Carrara et al., 2003 ; Agnesi et al., 2003 ; Van Westen et al., 2003 ; Thiery et al., 2004 ; Zahiri et al., 2006 ; Neuhäuser et Terhorst, 2007; Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007 ; Poli et Strelacchini, 2007 ; Song et al., 2008 ; Nandi et Shakoor, 2009 ; Regmi et al., 2010 ; Yalcin et al., 2011...etc) dans le domaine des instabilités des versants, et s'accordent que les résultats obtenus par cette approche sont très prometteurs. Elle peut être la meilleure approche bivariée, à condition que la phase de calage soit bien établie (Thiery, *renseignement oral*). C'est une des principales raisons du choix de la théorie de l'évidence pour son application dans un secteur marocain (environnement montagneux maghrébin ou africain). Une seconde raison pour l'utilisation de TDE, est son adéquation pour l'évaluation de la SMT à méso-échelle. Cette échelle, coïncide avec celles des données de base disponibles pour sa mise en œuvre (1/50 000^{ème}).

3.3.1.2. Principes de la théorie de l'évidence

Comme la plus part des approches de cartographie de la SMT, l'hypothèse fondamentale de la théorie de l'évidence suggère que, le phénomène étudié (MT) se déclencherà selon les mêmes conditions ou paramètres que dans le passé, c'est-à-dire que : les paramètres en question auront un effet similaire ou égal sur les futurs MT (Neuhäuser et Terhorst, 2007 ; Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007). Le dit phénomène représente la **variable à modéliser (VM)**, et les facteurs qui conditionnent sa formation constituent les **variables prédictives (VP)**. La TDE identifie une relation mathématique entre l'occurrence spatiale du phénomène étudié (VM), à travers ses données historiques spatialisées, et les facteurs prédictifs (VP). Une deuxième présomption qui n'est pas de moindre importance dans l'application de la TDE réside dans l'indépendance conditionnelle de l'ensemble des VP. Ce qui s'exprime mathématiquement par l'équation 1, dans le cas de deux variables prédictives VP_1 et VP_2 .

$$\text{Equation.1 : } P \{VP_1 \cap VP_2 / VM\} = P \{VP_1 / VM\} * P \{VP_2 / VM\}$$

Le calcul de la probabilité d'occurrence de la VM, fait appel à la version log-linéaire du théorème général de Bayes et passe par le calcul des notions de probabilité a priori et de probabilité a posteriori. La probabilité a priori, est la probabilité qu'une unité de terrain (une cellule ou un pixel) contienne le phénomène à étudier (VM), sans intégrer les variables prédictives (VP). Cette probabilité P (VM) est estimée en se basant sur la densité de cellules sur la totalité du site d'étude. La probabilité a posteriori, exprime la probabilité d'occurrence d'un événement sous la présence d'une condition ou évidence (VP). Elle est calculée en intégrant la densité des (VM) pour chaque (VP). Ces deux notions (la probabilité a priori et a posteriori) sont reliées par l'équation 2.

$$\text{Equation.2: } P\{VM/VP\} = (P\{VM\} \cdot P\{VP/VM\}) / P\{VP\}$$

La relation mathématique et statistique entre les facteurs de prédisposition et la répartition des mouvements de terrain est identifiée en intégrant et en superposant l'ensemble de données dans un Système d'Information Géographique où nous avons utilisé ArcGis 10. Pour chaque VP, deux poids sont calculés, un positif (W^+) (equation.3) et un autre négatif (W^-) (equation.4) dont les valeurs dépendent de la relation spatiale entre les VP et les VM survenus dans le passé (Bonham-Carter 1990). Ces poids positifs et négatifs sont calculés selon les ratios des logarithmes naturels des côtes (odds), appelé aussi logit (une côte représentant la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène), qui décrit la répartition probable du phénomène. Cette répartition est illustrée dans la figure VI-10.

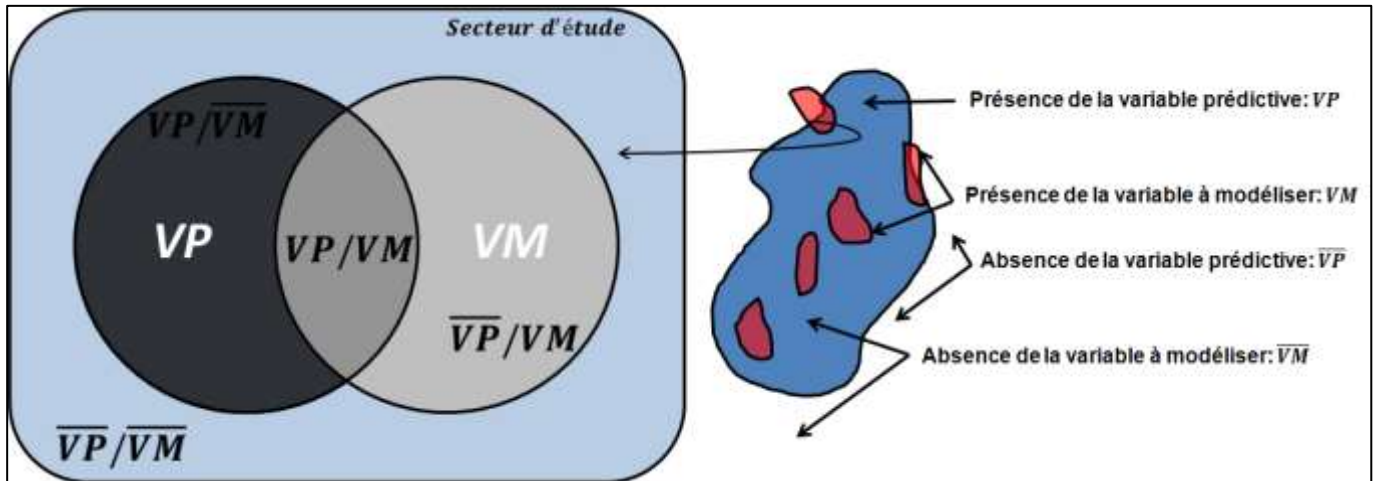


Figure VI-10: Relation entre la variable à modéliser (VM : mouvement de terrain), et la variable prédictive (VP : paramètre causal), illustrant la présence et l'absence du paramètre causal (VP) en relation avec les mouvements de terrain par l'utilisation du diagramme. (Bonham-Carter, 2002 ; Regmi et al., 2010, modifiée).

$$\text{Equation.3: } W^+ = \ln \frac{P\{VP/VM\}}{P\{\overline{VP}/VM\}}$$

$$\text{Equation.4: } W^- = \ln \frac{P\{\overline{VP}/VM\}}{P\{VP/VM\}}$$

Où W^+ est le poids positif, W^- poids négatif, VM ou \overline{VM} présence ou absence de la variable à modéliser. VP ou \overline{VP} présence ou absence de la variable prédictive. Ces poids

renseignent sur la présence d'une corrélation positive ou négative entre chaque VM et VP . Le type de cette corrélation est mesuré par le calcul du contraste 'C' ($C = W^+ - W^-$). Dans le cas d'une corrélation positive, 'C' est positif. Il tend vers 0 quand la distribution est spatialement indépendante. Il est négatif pour des associations négatives. Les pondérations peuvent être ajoutées pour actualiser les probabilités (équations 5 et 6), en considérant que les cartes de variables sont statistiquement indépendantes par rapport à la VM introduite. Dans ce calcul, les probabilités sont exprimées sous forme de côtes 'O' ($O = P / (1 - P)$) (une côte représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence d'un phénomène) :

$$\text{Equation.5: } \ln O\{VM/VP_1 \cap VP_2 \cap VP_3 \cap VP_4 \cap \dots VP_n\} = \ln O\{VM\} + \sum_{i=1}^n W^+$$

$$\text{Equation.6: } \ln O\{VM/\overline{VP}_1 \cap \overline{VP}_2 \cap \overline{VP}_3 \cap \overline{VP}_4 \cap \dots \overline{VP}_n\} = \ln O\{VM\} + \sum_{i=1}^n W^-$$

3.3.2. Les régressions logistiques (RL) : Approche multivariée

3.3.2.1. Principes des régressions logistiques

Les régressions logistiques présentent une des approches statistiques les plus utilisées pour l'évaluation de la susceptibilité aux MT (Carrara et al., 1991; Atkinson et Massari, 1998 ; Chung et Fabbri, 1999 ; Lee et Min, 2001; Dai et Lee, 2002, 2003; Ohlmacher et Davis, 2003; Thiery et al., 2005 ; Can et al., 2005; Ayalew and Yamagishi, 2005; Chang et al., 2007 ; Greco et al., 2007, Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007 ; Dong et al., 2010...etc). Il s'agit d'une méthode multivariée correspondant à un modèle non-linéaire, et permettant de calculer la probabilité d'occurrence spatiale d'un mouvement de terrain en fonction de différents paramètres de prédisposition. Cela, en se basant sur une fonction de répartition sigmoïdale. Les variables prédictives peuvent y être intégrées aussi bien sous une forme numérique que catégorielle. Par contre la variable à modéliser devrait être obligatoirement sous forme catégorielle, c'est-à-dire, traduite en terme de présence ou absence (0 ou 1) du phénomène dans le pixel. Cette méthode est largement décrite dans la littérature, notamment par Hosmer et Lemeshow, 2000 ; et Kleinbaum et Klein, 2002. Dans la présente étude, les régressions logistiques sont utilisées pour décrire et prédire l'influence plusieurs paramètres de prédisposition sur l'absence ou la présence de MT. Cette analyse nous permettra de modéliser la probabilité pour qu'un événement (MT) survienne pour différentes valeurs d'un ensemble de variables descriptives quantitatives et/ou qualitatives (gradient de pente, fracturation, lithologie...etc). Comparées à la théorie de l'évidence, les régressions logistiques semble être plus souples à mettre en œuvre puisqu'elles ne nécessitent pas d'analyse d'indépendance conditionnelle (Agterberg et al., 1989), ce qui peut réduire considérablement le temps d'analyse en amont. Les probabilités et les différents coefficients sont calculés à l'aide d'un modèle de logits s'exprimant en équation linéaire :

$$\text{Equation.1 : } \textit{logit} (y) = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots e$$

Avec:

-y: la variable dépendante (ou à modéliser),

- x_1, x_2, x_3 : sont les variable prédictives,
- b_1, b_2, b_3 : sont les coefficients obtenus par régression et mesurant la contribution de chaque facteur de prédisposition,
- a : une constante,
- e : erreur.

Le logit de 'y' est le logarithme naturel des odds

$$\text{Equation.2 : } \textit{logit} (y) = \left[\ln\left(\frac{p}{1-p}\right) \right]$$

Quand 'p' présente la probabilité d'occurrence du 'y', et que 'p (1-p)' présente les odds ; pour convertir les logit(y) en terme de probabilité l'équation 2 s'écrit sous forme de l'équation 3.

$$\text{Equation.3 : } p = \frac{\exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)}{1 + \exp(a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots)}$$

3.4. Sélection des variables

3.4.1. Variable à modéliser : mouvements de terrain

Pour la TDE et les RL, tout comme pour les autres approches spatiales, les MT du secteur d'analyse correspondent à la **variable à modéliser**. Ces derniers ont été inventoriés et cartographiés antérieurement (Cf. Chapitre 4) pour toute la province de Chefchaouen, à l'aide des données satellitaires THR associées aux observations de terrain.

Pour leur classification, il faut rappeler que nous avons distingué deux grandes catégories à savoir :

- des MT qualifiés de **naturels** et contiennent les glissements (y compris glissement – sapement), les coulées de débris, et les écroulements ;
- des MT qualifiés **d'induits** incluant les badlands, les sapements de berge et ceux de routes.

Seuls les phénomènes de la première catégorie ont été intégrés dans notre analyse de la susceptibilité par la théorie de l'évidence, et est caractérisé comme variable à modéliser.

3.4.2. Variables prédictives : paramètres de prédisposition

Les variables prédictives utilisées dans cette étude sont au nombre de neuf, et comportent : **i.** la lithologie (en termes de caractéristiques géotechniques et géomorphologiques), **ii.** La fracturation (densité des failles), **iii.** L'occupation des sols (Figure VI-11), **iv.** Les précipitations, **v.** Le réseau hydrographique (densité), **vi.** La sismicité (isoprofondeurs) (Figure VI-12), **vii.** Le gradient de pentes, **viii.** L'hypsométrie, et **viii.** L'exposition des versants (Figure VI-13). Ensuite, pour explorer la relation entre les différentes VP nous avons réalisé deux types de tests. Il s'agit du test chi-carrée pour la théorie de l'évidence (TDE), et du test de colinéarité pour les régressions logistiques (RL).

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

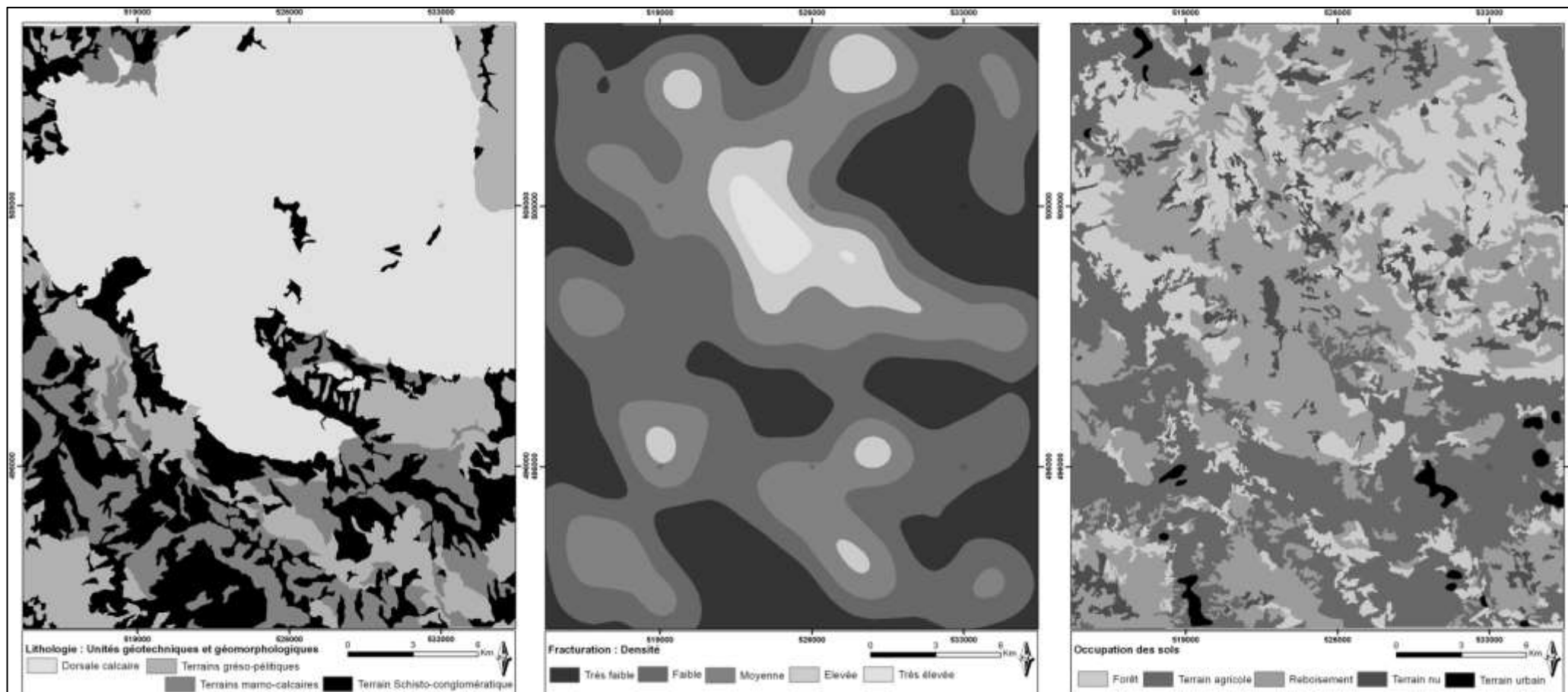


Figure VI-11 : Variables prédictives de gauche à droite, la lithologie, la fracturation, et l'occupation des sols.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

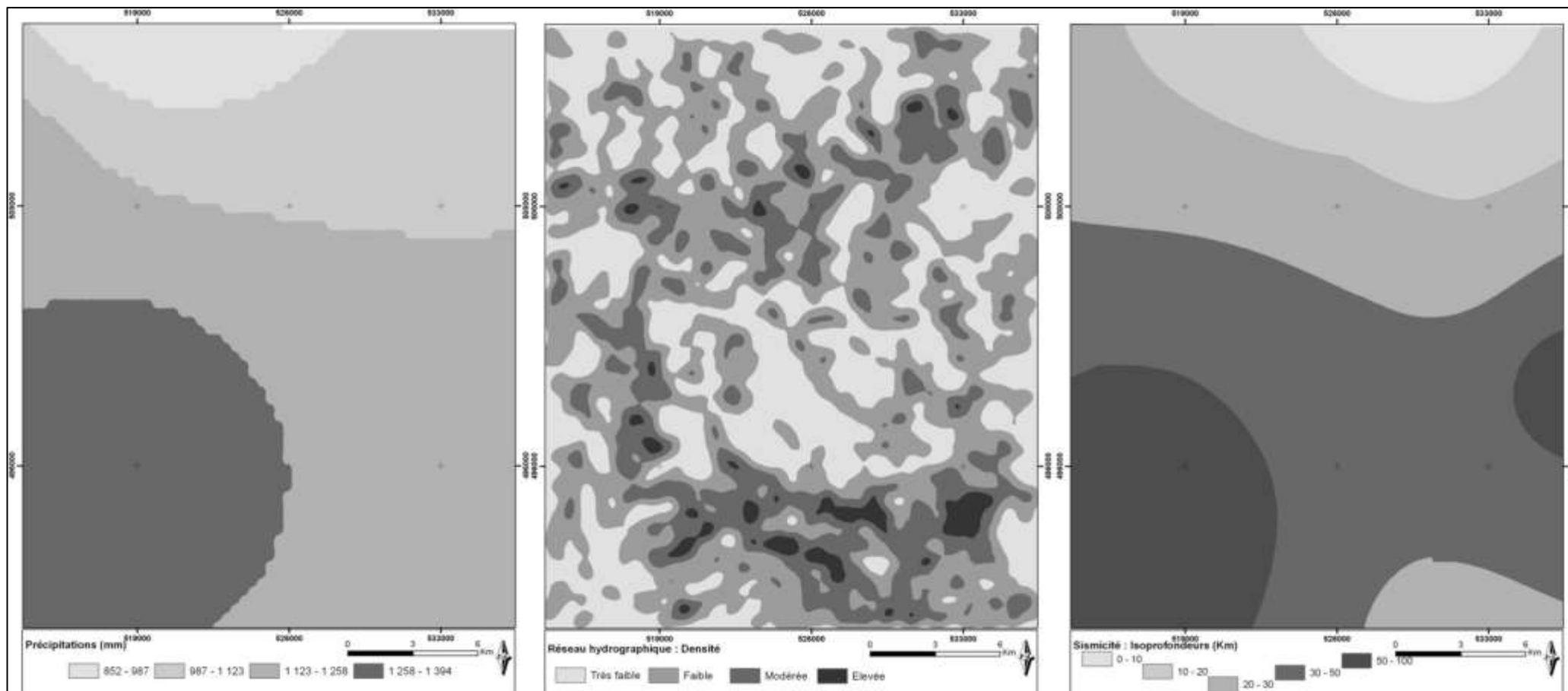


Figure VI-12 : Variables prédictives de gauche à droite : les précipitations, le réseau hydrographique, et la sismicité.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
 ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

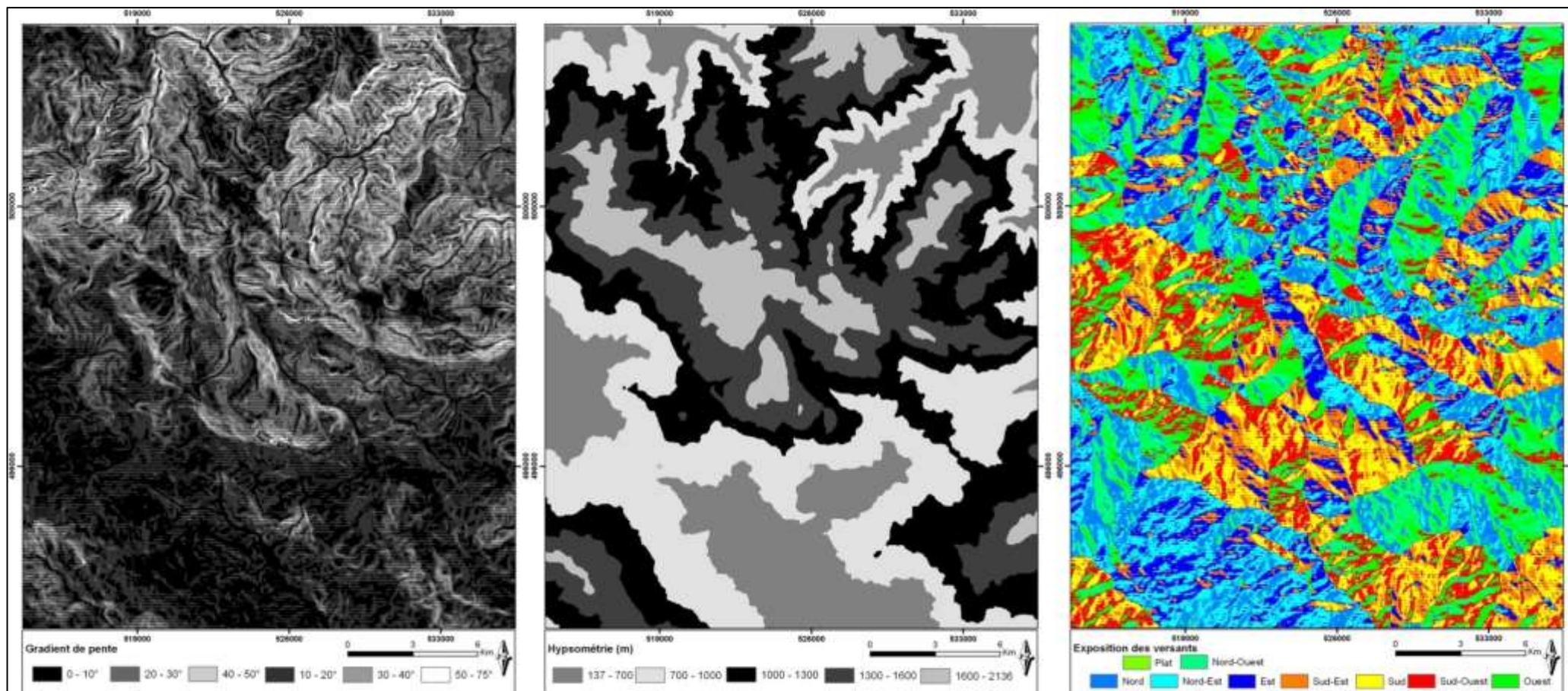


Figure VI-13 : Variables prédictives de gauche à droite : le gradient de pente, l'hypsométrie, et l'exposition des versants.

3.4.2.1. Théorie de l'évidence : test de l'indépendance conditionnelle

La modélisation de la susceptibilité aux MT par TDE passe par l'évaluation de l'indépendance conditionnelle des variables prédictives sélectionnées. Il s'agit d'une présomption fondamentale de cette approche (Bonham-Carter et al 1989), et sa violation peut engendrer une surestimation ou une sous-estimation de la probabilité. Parmi les approches préconisées pour évaluer l'indépendance conditionnelle, le test statistique chi-carré χ^2 est largement utilisé dans ce genre d'études (Van Westen et al., 2003 ; Agnesi et al., 2003 ; Thiery et al., 2004 ; Poli et Sterlacchini, 2007 ; Neuhäuser et Terhorst, 2007 ; Thiery 2007, et Thiery et al 2007...etc).

A									
Variable	Pente	Sismicité	Précipitations	R. Hydrographique	O. des Sols	Lithologie	Fracturation	Hypsométrie	
Expositions	40	32	24	24	32	24	32	32	
Pente		20	15	15	20	15	20	20	
Sismicité			12	12	16	12	16	16	
Précipitations				9	12	9	12	12	
R. Hydrographique					12	9	12	12	
O. des Sols						12	16	16	
Lithologie							12	12	
Fracturation								16	

B									
Variable	Pente	Sismicité	Précipitations	R. Hydrographique	O. des Sols	Lithologie	Fracturation	Hypsométrie	
Expositions	13	18	17	5	11	8	3	5	
Pente		14	18	4	16	17	5	6	
Sismicité			75	4	11	18	8	5	
Précipitations				2	11	17	11	1	
R. Hydrographique					4	3	3	6	
O. des Sols						19	2	3	
Lithologie							7	11	
Fracturation								5	

C									
Variable	Pente	Sismicité	Précipitations	R. Hydrographique	O. des Sols	Lithologie	Fracturation	Hypsométrie	
Expositions	1.00	0.97	0.81	1.00	0.99	0.99	1.00	1.00	
Pente		0.82	0.00	0.99	0.67	0.00	0.99	0.99	
Sismicité			0.00	0.97	0.75	0.00	0.94	0.99	
Précipitations				0.97	0.51	0.00	0.52	0.99	
R. Hydrographique					0.97	0.91	0.98	0.90	
O. des Sols						0.00	0.99	0.99	
Lithologie							0.82	0.50	
Fracturation								0.99	

D									
Variable	Pente	Sismicité	Précipitations	R. Hydrographique	O. des Sols	Lithologie	Fracturation	Hypsométrie	
Expositions	0.547	0.578	0.634	0.570	0.609	0.578	0.580	0.574	
Pente		0.591	0.692	0.545	0.627	0.622	0.548	0.591	
Sismicité			0.863	0.546	0.604	0.633	0.573	0.561	
Précipitations				0.531	0.587	0.613	0.580	0.522	
R. Hydrographique					0.544	0.542	0.537	0.553	
O. des Sols						0.610	0.527	0.540	
Lithologie							0.563	0.576	
Fracturation								0.554	

Figure VI-14: A : Tableau des valeurs des contingences du test chi-carré χ^2 théoriques ; B : Valeurs des contingences du test chi-carré χ^2 observées ; C : Valeurs du degré de liberté (α) qui ne doit pas valoir 0,05 et moins pour rejeter toutes hypothèse de dépendance conditionnelle entre chaque paire de variables prédictives ; D : Valeurs du coefficient V de Cramer. Les champs grisés correspondent ou couplets de variables où l'hypothèse (H_0) de l'indépendance conditionnelle est violée ou rejetée.

Ce test, présenté dans un tableau de contingence, porte sur la comparaison de l'écart de χ^2 réel à un χ^2 théorique pour chaque couple de facteurs, et pour l'ensemble des variables à modéliser, selon un degré de liberté et un seuil de signification ($\alpha = 0.05$)

(Bonham-Carter 1994). Lorsque l'écart entre χ^2 réel et théorique est grand pour un couple de facteurs, cela signifie qu'il y a une dépendance conditionnelle. Dans ce cas, les deux paramètres ne peuvent pas être intégrés dans le processus de modélisation. Toutefois, il est conseillé de les combiner pour créer une néo-variable (Van Westen, 1993, Bonham-Carter 1994, Van Westen et al 2003, Thiery, 2007).

Ainsi, les tableaux A, B, C, et D de la figure VI-14 montrent respectivement les résultats de contingences de probabilité théorique, la probabilité réelle (observées), les résultats du calcul du degré de liberté entre chaque paire de variables possible, et les valeurs du V de Cramer pour les glissements de terrain de la région.

La comparaison du χ^2 théorique et χ^2 observé montre que 6 paires de variables sur 36 présentent une dépendance conditionnelle. Ces paires sont : Lithologie – Pente ; Lithologie – Sismicité ; Lithologie – Précipitation ; Lithologie – Occupation des sols ; Précipitations – Sismicité ; et Précipitation – Pentes. Pour comprendre l'origine de cette dépendance, nous avons réalisé plusieurs tests du χ^2 en introduisant et en éliminant les différentes variables itérativement. On en déduit que la dépendance conditionnelle est liée au fait, qu'un nombre assez important de glissements (VM) se trouvent localisés dans des aires communes entre deux VP, produisant une grande redondance statistique. Cette constatation est vraie pour le couplet Lithologie – Occupation des sols où la plus part des phénomènes se localise sur les aires communes des formations gréso-pélitiques et les terrains agricoles.

3.4.2.2. Les régressions logistiques : diagnostic de colinéarité

Pour la sélection des VP par les RL, il n'est pas obligatoire de passer par le test d'indépendance conditionnelle (Süzen, 2002 ; Süzen et Doyuran, 2004). Par contre, les modèles par RL sont sensibles aux problèmes de colinéarité entre les VP (Hosmer et Lemeshow, 1989), car si elle est avérée elle influencera l'estimation des coefficients de régressions de notre modèle prédictif par sur ou sous-estimation. Pour diagnostiquer la colinéarité de nos variables et éviter de biaiser les résultats de prédiction nous avons réalisé deux tests, qui sont les plus utilisés dans ce genre de démarche. Il s'agit du facteur d'inflation de la variance connu par l'abréviation VIF (*Variance inflation factor*) et la tolérance (TOL). D'une façon résumée, une valeur de TOL < 0.2 et VIF < 0.4 indique la présence d'un problème de colinéarité (Menrad, 1995 ; Van Den Eeckhaut et al., 2006 ; Bai et al., 2010). Les caractéristiques statistiques sommaires ainsi que les résultats du test de TOL et VIF sont présentés respectivement dans le Tableau VI-2 bis et 3. *Ils montrent qu'aucun de nos paramètres ne présente de problème de colinéarité que ce soit pour la VIF largement supérieure à 0.4 ou pour la TOL.*

Ensuite, à l'aide du programme SPSS, nous avons calculé les coefficients algorithmiques pour les RL. Ces coefficients permettent de décrire la relation entre les MT et les différentes VP. Ainsi, les coefficients de régression standardisés ou valeurs-T sont résumés dans le tableau VI-2 bis. Ils expriment la contribution relative de chaque facteur de prédisposition dans le processus de probabilité d'apparition d'un mouvement de terrain. *D'après les résultats des valeurs-T, seuls les facteurs lithologie (unités géotechniques et géomorphologiques), précipitations, hypsométrie, occupation des sols, fracturation (densité), et réseau hydrographique (densité), semblent avoir le plus grand impact sur la genèse des mouvements de terrain.*

Variables indépendantes ou prédictives	Coefficients non standardisés		Coefficients standardisés	Valeur-T	Signification	Corrélations			Tests de colinéarité	
	B	Erreur standard	Bêta			Zero-order	Partial	Part	TOL	VIF
(Constant)	181,951	44,481		4,091	0,0002					
E	-1,497	2,577	-0,058	-0,581	0,5646	-0,410	-0,089	-0,043	0,784	1,276
H	15,809	6,766	0,196	1,337	0,0243	0,247	0,339	0,172	0,771	1,298
F	3,505	3,175	0,122	1,174	0,2759	0,273	0,168	0,081	0,778	1,286
L	5,194	5,157	0,801	2,007	0,3195	0,261	0,154	0,074	0,827	1,209
O.sols	-2,293	4,119	0,178	1,557	0,5806	-0,401	-0,086	-0,041	0,741	1,350
RH	-10,258	6,038	0,134	1,699	0,0967	-0,231	-0,254	-0,125	0,849	1,178
Pr	-18,397	8,653	0,237	2,126	0,0394	-0,703	-0,312	-0,156	0,435	2,299
S	-22,409	5,135	-0,469	-4,364	0,0001	-0,783	-0,559	-0,321	0,468	2,138
Gp	6,506	5,144	-0,121	-1,265	0,2129	0,605	0,192	0,093	0,589	1,699

Tableau VI-2 bis : Caractéristiques statistiques des huit paramètres indépendants (prédictifs) à intégrer dans l'analyse de la susceptibilité. La valeur **Bêta** exprime le coefficient par régressions logistiques de chaque paramètre indépendant selon son importance dans la genèse des mouvements de terrain dans le secteur. L'index du diagnostic de la multicollinéarité est exprimé par les deux colonnes : **TOL** et **VIF**.

E : expositions des versants ; H : hypsométrie ; F : fracturation ; L : lithologie ; O.sols : occupation des sols ; RH : réseau hydrographique ; Pr : précipitations ; S : sismicité ; Gp : gradient de pentes.

R	R ²	R ² ajusté	Erreur standard d'estimation	Statistiques de variation			
				R ² variation	Degré de liberté variation	Degré de liberté 1	Degré de liberté 2
0,879	0,773	0,724	34,631	0,773	15,872	9	42

Tableau VI-3 : Statistiques sommaires du modèle avec les huit paramètres. Le R, R², et le R² ajusté indique le degré de justesse du modèle.

Le reste des paramètres, à savoir, la sismicité (isoprofondeurs), le gradient de pentes, et l'exposition des versants, viennent en seconde place et semblent avoir moins d'impact sur le processus d'instabilité des versants.

Le reste des statistiques sommaires effectuées (Tableau VI-3), montrent qu'une combinaison avec les neuf variables prédictives expliquerait avec une assez bonne qualité la variabilité de la susceptibilité aux mouvements de terrain, notamment en regardant la valeur du $R^2 = 0.773$. Cette valeur signifie que 77.3% de la variance des mouvements de terrain sera expliquée. *Toutefois, pour pouvoir comparer les résultats finaux des deux approches, il faudra utiliser les mêmes variables et/ou néo-variables prédictives.*

3.4.2.3. Construction des néo-variables prédictives (NVP)

La dépendance avérée doit être éliminée avant d'introduire les paramètres dans notre analyse. Pour ce faire, les VP dépendantes peuvent être combinées dans une nouvelle variable prédictive (**néo-variable**) et puis introduite dans l'analyse spatiale comme étant une simple variable (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Van Westen et al., 2003). Il est possible aussi d'agréger des classes d'une même variable, ou contrairement augmenter leur nombre...etc. Cela montre qu'il est tout à fait possible d'introduire notre opinion en se basant sur nos connaissances des différents paramètres sélectionnés (VP) et leurs interactions mutuelles.

Dans notre cas, et pour remédier au problème de l'indépendance conditionnelle (IC), nous proposons une stratégie basée sur la mise en place de trois néo-variables prédictives (NVP) issues des variables responsables de la violation de l'IC, comme prouvé par les tests répétitifs de chi-carrée. Cette méthode a été déjà réalisée et éprouvée à plusieurs échelles et sur différents sites par plusieurs auteurs (Van Westen, 1993 ; Bonham-Carter, 1994 ; Van Westen et al., 2003 ; Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007). La construction de ces NVP a été fortement conditionnée par la connaissance approfondie de la relation entre chaque variable prédictive cartographiée et les mouvements de terrain de notre secteur (Cf. Chapitre 5), ainsi que l'interaction entre les différentes variables prédictives. Les variables à combiner ont été cependant choisies tout en respectant la logique (sens) géomorphologique de leur association, où un test du V de Cramera été réalisé pour explorer le niveau d'association entre chaque couplet de paramètres dans notre secteur, comme le préconise (Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007). Il s'agit de la néo-variable prédictive :

- i. **Réseaux hydrographique + Fracturation (NVP RHF)** : qui est fortement contrôlé puisque le réseau hydrographique (RH) du secteur est contraint par l'évolution tectonique récente à actuelle de la chaîne Rifaine (système en surrection, Cf. Chap. 2, et Chap. 3). Il exploite la fracturation active (contrôle sismique). Ainsi le regroupement de classes des deux variables initiales s'est fait comme suit :

- **Classe 1** : densité très faible de fracturation + densité très faible du RH;
- **Classe 2** : densité faible de fracturation + densité faible du RH ;
- **Classe 3** : densité moyenne de fracturation + densité faible du RH ;
- **Classe 4** : densité élevée de fracturation + densité moyenne du RH ;
- **Classe 5** : densité très élevée de fracturation + densité élevée du RH.

ii. **Lithologie + Pente (NVP LP)** : peuvent être facilement regroupés d'un point de vue géomorphologique. Etant donné que le découpage lithologique effectué obéit à la fois aux caractéristiques géotechniques et aux complexes géomorphologiques dans le sens de [Van Westen, 1993](#). Ainsi, le regroupement lithologie – gradient de pente (classes CP) comporte les classes suivantes :

- **Classe 1** : CP 0 – 10° + formations schisto-conglomératiques ;
- **Classe 2** : CP 10 – 20° + formations marno-calcaires ;
- **Classe 3** : CP 20 – 30° + formations grésopélitiques ;
- **Classe 4** : CP 30 – 40° + formations grésopélitiques ;
- **Classe 5** : CP 40 – 50° + formations de la Dorsale calcaires ;
- **Classe 6** : CP 50 – 75° + formations de la Dorsale calcaires ;

iii. **Précipitation + Hypsométrie (NPH)** : les précipitations dans le secteur d'étude s'accroissent avec l'altitude (hypsométrie H). Cette corrélation a été largement détaillée dans le chapitre 5 (section 5), où nous avons prouvé que les précipitations régionales (P) augmentent généralement d'environ 120mm tous les 200m.

- **Classe 1** : classe H 137 – 700m + classe P 852 – 987mm ;
- **Classe 2** : classe H 700 – 1000m + classe P 852 – 987mm ;
- **Classe 3** : classe H 1000 – 1300m + classe P 987 – 1123mm ;
- **Classe 4** : classe H 1300 – 1600m + classe P 1258 – 1394mm ;
- **Classe 5** : classe H 1600 – 2136m + classe H 1223 – 1258mm.

3.5. Zonage de la susceptibilité

Avec la construction des trois nouvelles variables ou néo-variables prédictives, le nombre de paramètres de base sélectionnés pour mener l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Bab Taza passe de 9 à 6, et il s'agit de :

- i. La variable réseau hydrographique – fracturation (néo-variable) : **NVP RHF**
- ii. La variable lithologie – pente (néo-variable): **NVP LP**
- iii. La variable précipitations – hypsométrie : **NVP PH**
- iv. La variable sismicité : **VP S**
- v. La variable occupation des sols : **VP OS**
- vi. La variable exposition des versants : **VP EV**

Dans la région de **Bab Taza** trois familles de mouvements de versants ont été rencontrées. Ce sont par ordre d'importance les écroulements (65.4%), suivis par les glissements (24.64%), et finalement les coulées de débris (< 10%). De ce fait, la susceptibilité aux mouvements de terrain de ce secteur sera caractérisée en deux étapes. Nous allons tout d'abord, établir une carte de susceptibilité caractéristique des glissements et une autre pour les écroulements et les coulées de débris. Ensuite, les deux cartes en seront rassemblées en une seule carte synthétique, définissant la SMT dans le secteur de Bab Taza à méso-échelle.

Les écroulements et les coulées de débris ne seront pas abordés séparément, pour deux principales raisons. La première est que le nombre des coulées de débris est très réduit et ne dépasse pas la vingtaine pour un secteur de 630Km², et qu'elles sont ciblées et concentrées

spatialement dans un même endroit, qui correspond à la partie externe de la Dorsale calcaire, emplacement exclusive pour leur déclenchement (Cf. Chap. 4, section 1 et 3). **La deuxième, à l'exception de la coulée de débris dans son stade mature d'Amtrass dont l'analyse a été effectuée en détail (Cf. Chap. 4 section 3), les autres phénomènes de coulées de débris ont un aspect rudimentaire qui peut être assimilé au comportement des écroulements, surtout que les écroulement peuvent correspondre à un des stades de vie d'une coulée de débris qui débutent par la préparation du stock du matériel rocheux (y compris la fraction fine).** Ce stock, provient essentiellement d'un processus de désagrégation mécanique qui donne généralement lieu à des écroulements, mais qui se passe en parallèle à la production d'un matériel fin qui conditionnera la mise en mouvement d'une coulée de débris en présence d'autres paramètres.

3.6. Susceptibilité aux glissements de terrain

3.6.1. Application de la théorie de l'évidence

Avant de procéder aux différentes simulations, l'ensemble des variables et néo-variables prédictives ont été intégrées dans notre modèle. A l'issue de cette étape, les poids positifs (W^+) et négatifs (W^-), ainsi que leurs contrastes ($C = W^+ - W^-$) ont été calculés pour chaque classe de variables (y compris les néo-variables) pour les glissements de terrain de la région de Bab Taza (Tableau VI-4). Ce calcul ne prend seulement en compte que la zone centrale de chaque mouvement (centroïde : centre de chaque mouvement) ; il nous a permis d'identifier les variables ou les classes de variables qui sont positivement corrélées ($W^+ > 0$ et $W^- < 0$) ou négativement corrélées ($W^+ < 0$ et $W^- > 0$) et les variables non corrélées ($W^+ = W^- = 0$) aux glissements de terrain. Cette étape a été réalisée de la même manière pour les deux autres types de mouvements de terrain rencontrés dans le secteur d'étude, à savoir les écroulements et les coulées de débris (sections qui suivent). Les classes de variables qui présentent une corrélation positive avec les glissements sont présentées dans le tableau en gris. **Il est intéressant de noter que seule, la classe « terrains agricoles » de la variable occupation des sols présente une corrélation spatiale positive sur la mise en place des glissements de terrain.** Un deuxième exemple, est celui de la néo-variable hypsométrie – précipitation, où on remarque que **seules les deux classes les plus élevées de cette néovvariable** (1300 - 1600m avec P1258 - 1394mm ; et 1600 - 2136m avec P1223 - 1258mm) **ont une corrélation spatiale positive avec les glissements de terrain du secteur.**

Tableau VI-4 : Corrélation spatiale entre les variables prédictives et les valeurs de pondération calculées par la théorie de l'évidence. W^+ : Poids positif ou probabilité a priori ; W^- : Poids négatif ou probabilité à posteriori ; C : Contraste qui est la différence entre le poids positif et celui négatif. TF : Très faible ; F : Faible ; M : Moyenne ; E : Elevée ; TE : Très élevée, et RH : Réseau hydrographique.

Variable ou néo-variable prédictive	Superficie (Km ²)	W+	W-	C
Fracturation - Réseau hydrographique				
Fracturation F et RH TF	206,9625	-0,2697	0,1089	-0,3787
Fracturation F et RH F	222,1706	-0,0134	0,0072	-0,0206
Fracturation M et RH F	128,4638	0,3557	-0,1145	0,4702
Fracturation E et RH M	56,8306	-0,4446	0,0349	-0,4795
Fracturation TE et RH E	18,9244	0,6657	-0,0293	0,6950
Lithologie - Gradient de pente				
Schisto-conglomératiques et pente 0 - 10°	102,7031	0,0625	-0,0126	0,0751
Marno-calcaires et pente 10 - 20°	77,6697	0,5480	-0,1072	0,6552
Gréso-pélitiques et pente 20 - 30°	58,4704	0,5130	-0,0704	0,5834

Grésopélitiques et pente 30 - 40°	63,2457	0,4334	-0,0620	0,4954
Dorsale calcaires et pente 40 - 50°	240,9377	-0,9135	0,3167	-1,2302
Dorsale calcaires et pente 50 - 75°	88,2778	0,0963	-0,0166	0,1129
Hypsométrie - Précipitation				
137 - 700m, 852 - 987mm	58,9855	-0,4785	0,0383	-0,5168
700 - 1000m, 852 - 987mm	124,2735	-0,2415	0,0509	-0,2924
1000 - 1300m, 987 - 1123mm	216,3878	-0,2364	0,1034	-0,3399
1300 - 1600m, 1258 - 1394mm	101,1641	0,2872	-0,0648	0,3520
1600 - 2136m, 1223 - 1258mm	134,7777	0,3760	-0,1304	0,5064
Exposition des versants				
Plat	0,0750	-	-	-
Nord	80,5677	-0,2761	0,0344	-0,3106
Nord-Est	83,8775	0,0222	-0,0034	0,0256
Est	81,2875	-0,1015	0,0140	-0,1156
Sud-Est	63,7919	0,7570	-0,1332	0,8901
Sud	84,7165	-0,1431	0,0203	-0,1634
Sud-Ouest	83,6078	0,0255	-0,0039	0,0294
Ouest	80,9434	-0,2808	0,0351	-0,3159
Nord-Ouest	78,1126	-0,2450	0,0300	-0,2750
Occupation des sols				
Forêt	154,7637	-0,0354	0,0111	-0,0465
Reboisement	235,3313	-0,3766	0,1702	-0,5468
Terrain Agricole	199,0263	0,4106	-0,2619	0,6725
Terrain Nu	38,8488	-0,4475	0,0233	-0,4708
Terrain Urbain	7,1075	-	-	-
Sismicité				
0 - 10m	27,0700	1,0125	-0,0798	1,0923
10 - 20m	87,7087	-0,5864	0,0688	-0,6552
20 - 30m	161,8050	-0,5053	0,1273	-0,6326
30 - 50m	245,2506	0,0945	-0,0640	0,1585
50 - 100m	114,7875	0,2491	-0,0640	0,3131

3.6.1.1. Réalisation des simulations

Les poids relatifs de chaque facteur ont été combinés ensemble et la probabilité a posteriori a été calculée pour les glissements de terrain. Cette implémentation a été menée en effectuant plusieurs simulations avec plusieurs combinaisons de paramètres (variables prédictives) pour pouvoir examiner l'influence de chaque variable sur le pouvoir prédictif de notre carte de susceptibilité, en établissant la courbe de probabilité pour chaque combinaison (Figure VI-15 et 16).

La première des simulations a consisté en la combinaison des 3 néo-variables formées (Figure VI-15A) suivie d'une autre simulation (Figure VI-15B) où les néo-variables ont été toutes éliminées et seules les variables sismicité, expositions des versants et occupation des sols ont été introduites. Les deux simulations permettent de constater une grande différence dans les résultats. Pour la première simulation (Figure VI-15A) les seuils de susceptibilité sont facilement repérables sur la courbe de prédictibilité ce qui montre que *les trois néo-variables prédictives constituent les plus importants paramètres dans la définition des classes de la susceptibilité, ce qui veut dire qu'elles le sont aussi pour le conditionnement des glissements de terrain voire tous les autres type de mouvements du secteur*. Le contraire est vrai pour la simulation avec la deuxième combinaison de variables prédictives

(Figure VI-15B). Dans le même sens, la différence entre les deux simulations est aussi apparente sur les deux cartes de susceptibilité correspondant aux deux combinaisons. La distribution spatiale des classes de la susceptibilité varie d'un extrait (Figure VI-16A) à l'autre (Figure VI-16B) et vient corroborer les résultats des courbes de probabilité où on voit des limites bien définies des classes de susceptibilité sur l'extrait A par rapport au B, même avec des valeurs de probabilité plus petites que sur le B.

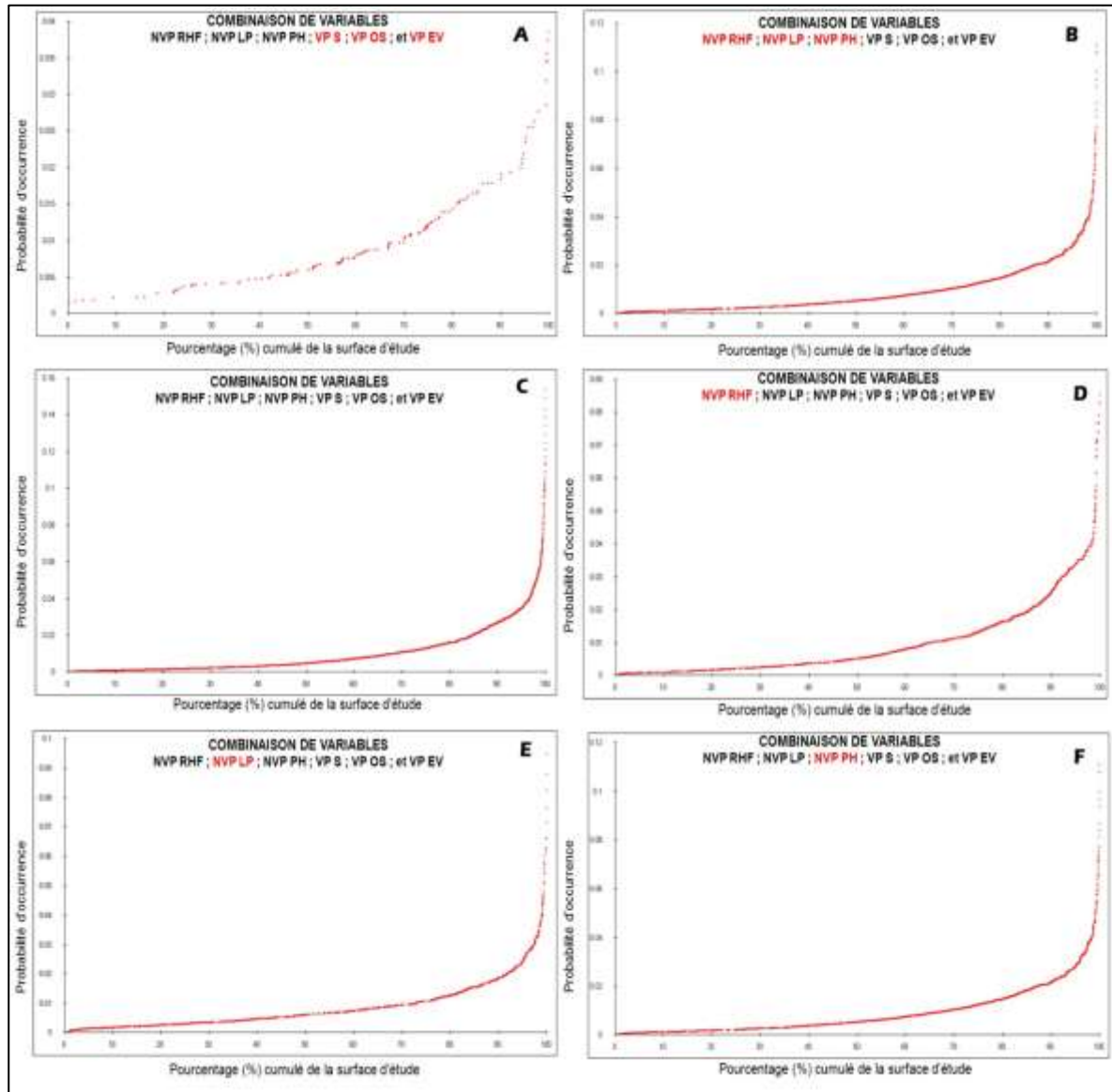


Figure VI-15: Courbes de probabilité de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Bab Taza par plusieurs simulations avec différentes combinaisons de variable prédictives. Les abréviations en rouge correspondent aux variables non intégrées dans la simulation.

Nous remarquons aussi, que pour les simulations intégrant les trois néo-variables, les seuils de susceptibilité sont mieux perçus sur les courbes de probabilité que pour les autres combinaisons. Pour choisir le meilleur résultat et la meilleure combinaison de variables pour le zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain dans notre secteur, les valeurs de l'AUC précédemment défini (Section 2.5 de ce même chapitre) ont été calculées pour chaque test effectué. Notre but est d'examiner la sensibilité et la spécificité d'un modèle prédictif, et d'exprimer ces deux variables par une seule valeur pour apprécier la qualité

d'un modèle donné. Les résultats pour les différentes combinaisons sont rassemblés dans le tableau VI-5.

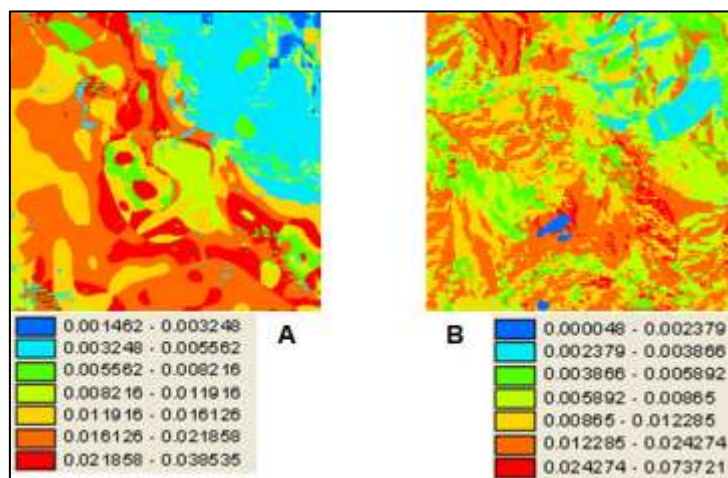


Figure VI-16 : Extrait de deux cartes de prédictibilité de la susceptibilité obtenues par deux différentes combinaisons de variables. A: NVP RHF + NVP LP + NVP PH ; B : VP S + VP OS + VP EV.

COBINAISONS DE VARIABLES	AUC
A = NVP RHF + NVP LP + NVP PH	0,87
B = VP S + VP OS + VP EV	0,70
C = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,93
D = NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,88
E = NVP RHF + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,83
F = NVP RHF + NVP LP + VP S + VP OS + VP EV	0,86
G = NVP RHF + VP S + VP OS + VP EV	0,88
H = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS	0,79
I = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP EV	0,74
J = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP OS + VP EV	0,91
K = NVP RHF + NVP LP + VP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,84
L = NVP RHF + NVP LP + VP P + VP S + VP OS + VP EV	0,87

Tableau VI-5 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables.

D'une première analyse des résultats de l'AUC, il ressort que la totalité des simulations fournissent généralement de bons résultats, puisque le rapport Sensibilité/1-Spécificité est généralement proche de 1, sauf pour la simulation 'B' qui a la valeur la plus petite (0.70). Cela peut être dû au nombre réduit des variables prises en compte dans cette simulation. Une seconde valeur, apparemment sous-estimée est celle de la combinaison 'I' où le facteur occupation des sols n'a pas été introduit ; ceci atteste de la grande importance de ce paramètre dans l'étude de la susceptibilité des glissements de terrain. Nous avons vu plus haut que seule la classe des terrains agricoles montre une corrélation spatiale positive avec les glissements, comme en témoignent les valeurs des contrastes pondéraux obtenues (Tableau VI-4). En comparant la même simulation (I) avec celle qui suit (J), l'intégration de la variable occupation des sols permet d'augmenter le pouvoir prédictif de notre modèle à 0.91.

Les valeurs AUC des simulations 'A', AUC = 0.87 et 'B', AUC = 0.70 permettent de déduire que les néo-variables formées contribuent clairement à l'amélioration du pouvoir

prédictif du modèle, d'autant plus qu'elles sont issues de la combinaison des paramètres majeurs d'un point de vue de l'analyste, pour le conditionnement des glissements et des autres mouvements des versants du secteur. Cependant, l'association des variables prédictives individuelles (VP S, VP OS, et VP EV) avec les néo-variables donne des résultats très nettement améliorés par rapport aux autres combinaisons, ce qui montre que le pouvoir prédictif du modèle est de plus en plus important avec l'intégration d'un jeu suffisant de paramètres.

3.6.1.2. Carte de susceptibilité aux glissements de terrain

L'analyse minutieuse des résultats des AUC des différentes combinaisons a permis de dégager les deux meilleures simulations obtenues, et il s'agit de la combinaison 'C' avec AUC = 0.93 où toutes les variables et néo-variables ont été introduites, et de la combinaison 'J' avec un rapport de 0.91 où toutes les variables ont été intégrés à l'exception du paramètre sismicité. Ensuite, en comparant les deux cartes correspondantes (Figure VI-17A & B), il s'avère que la distribution spatiale des classes de la susceptibilité (sous forme toujours de probabilité) est presque la même partout dans le secteur, notamment dans la moitié sud de celui-ci.

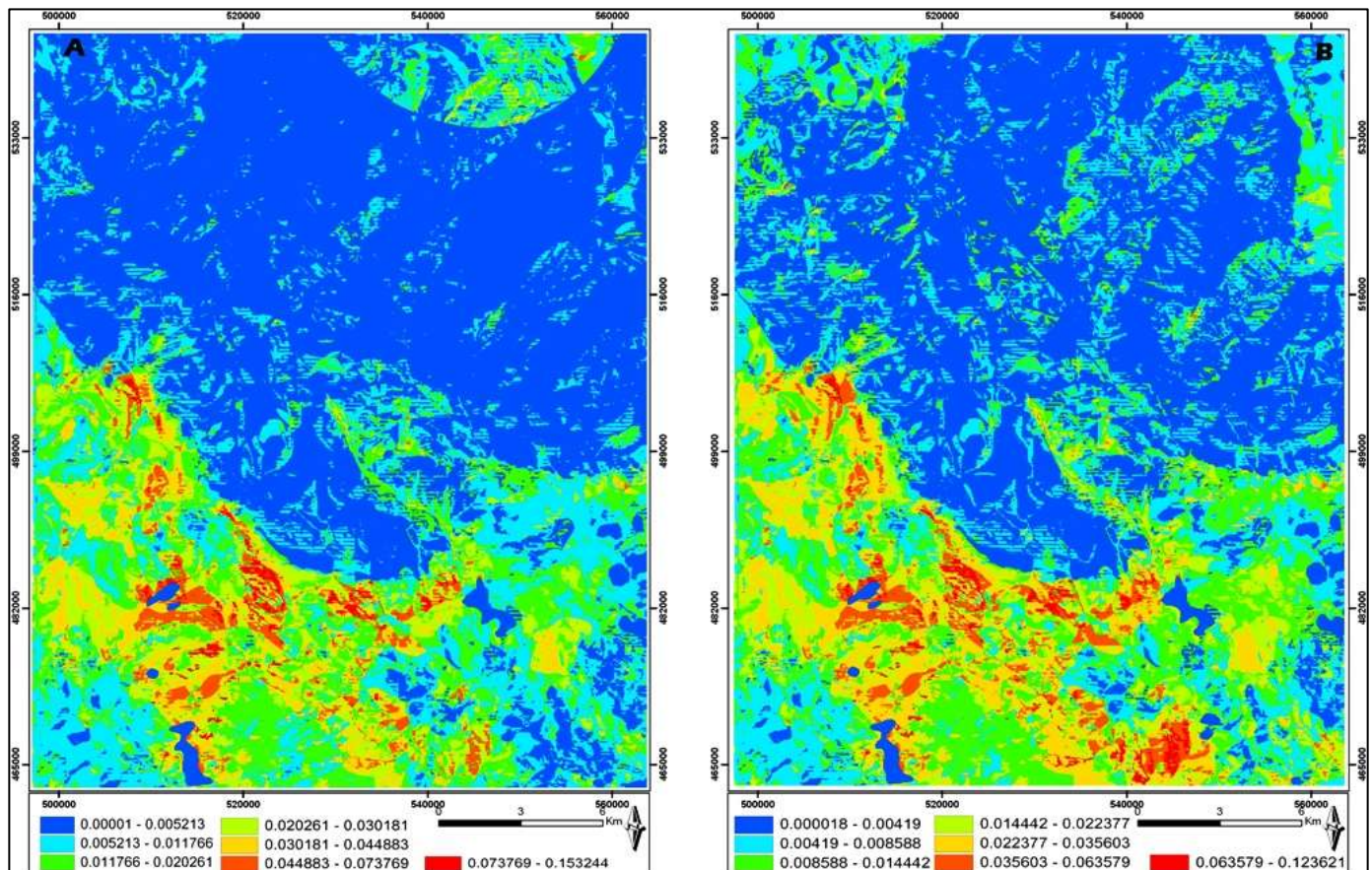


Figure VI-17 : Les deux cartes probabilité d'occurrence des glissements de terrain issues des deux meilleures simulations. A : Carte de la simulation 'C' = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV ; B : Carte de la simulation 'J' = NVP RH + NVP LP + NVP PH + VP OS + VP EV.

Toutefois, on s'aperçoit que la distribution des classes de probabilité dans la moitié nord présente de grandes divergences, notamment une perturbation de la distribution spatiale des trois premières classes de probabilité. Cette perturbation se manifeste

d'avantage dans le résultat de la combinaison 'C' (demi-cercle apparent dans la partie NNE du secteur) en non-conformité avec nos observations de terrain. Cela est certainement lié à l'expression du paramètre sismicité. Ceci est surtout sensible pour la zone couverte par la classe la plus superficielle des séismes du secteur, où les limites de ce demi-cercle coïncident exactement avec cette classe régionale. Cette même classe montre une corrélation positive avec les glissements (Table VI-4). A l'issue de cette comparaison, la combinaison 'C' (Figure VI-17A) a été écartée au profit des résultats obtenu par la simulation 'J' pour matérialiser la susceptibilité aux glissements de terrain pour le secteur de Bab Taza. Ensuite, il a été nécessaire d'identifier les seuils des différentes classes de susceptibilité en se basant sur l'analyse à posteriori de la courbe cumulative de probabilité, et représentant le pourcentage de surface en fonction du niveau de susceptibilité (probabilité a posteriori). Cette analyse a permis de reconnaître quatre classes de susceptibilité (Figure VI-18A et B).

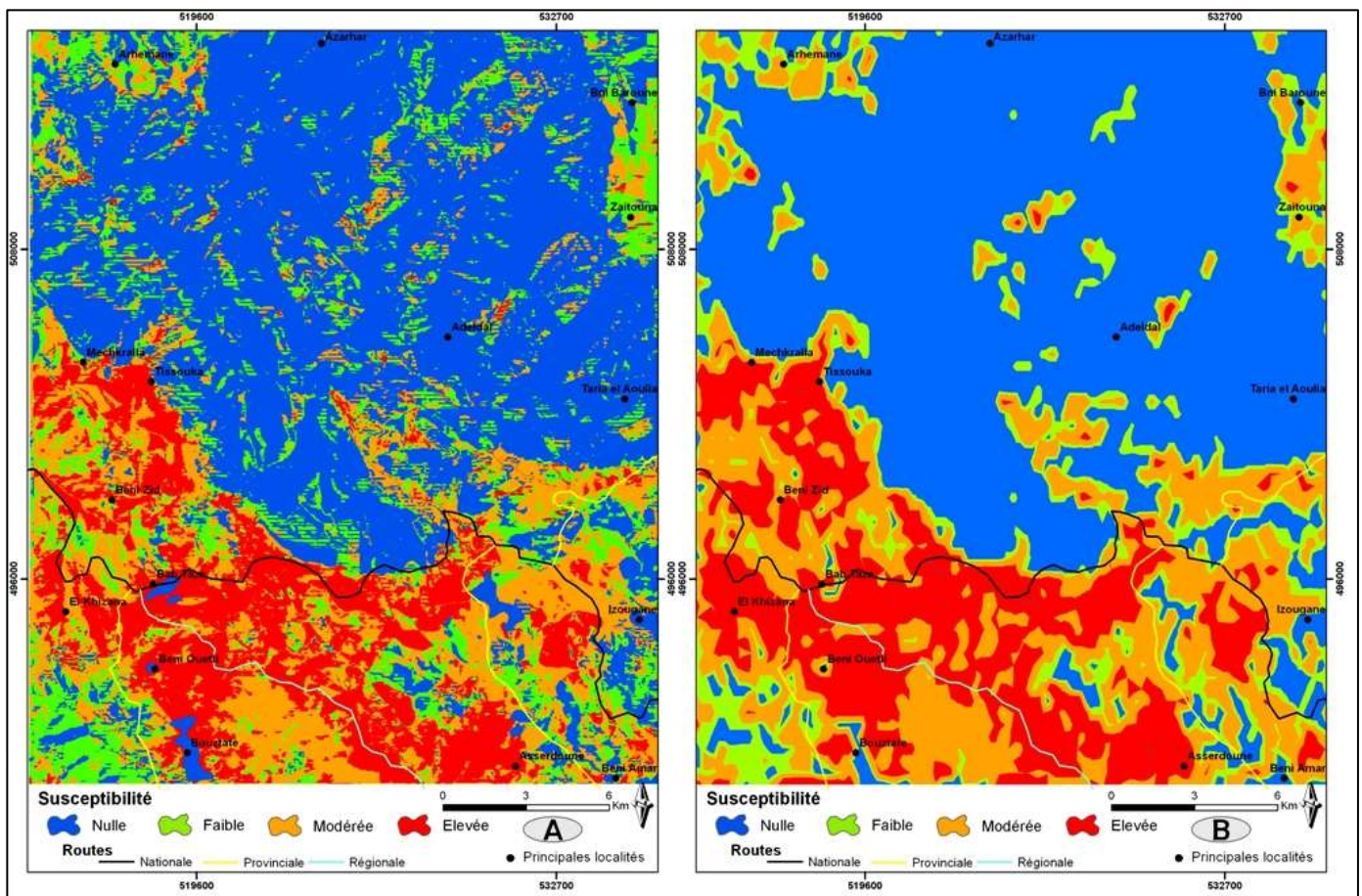


Figure VI-18 : A : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local ».

Classe de susceptibilité	Superficie occupée	Intervalle de probabilité
Nulle	50.54%	0.000018 - 0.00419
Faible	14.24%	0.00419 - 0.008588
Moyenne	20.61%	0.008588 - 0.014442
Elevée	14.59%	0.014442 - 0.123621

Tableau VI-6 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain

La superficie occupée par chaque classe de susceptibilité (en %) ainsi que l'intervalle des probabilités ont été résumés dans le tableau VI-6. On remarque que la classe de susceptibilité nulle occupe la moitié du secteur d'étude toute en ayant un intervalle de probabilité très réduit par rapport aux autres classes. La distribution spatiale de cette catégorie de susceptibilité, est décalquable en premier ordre sur l'unité géotechnique et géomorphologique représentée par la dorsale calcaire. Ici, seuls des écroulements et des coulées de débris ont été observés. La deuxième partie de cette même classe correspond majoritairement aux petits replats du secteur et qui sont déjà occupés par des habitations. La carte de susceptibilité obtenue a été lissée pour simplifier sa lecture et son utilisation par tout utilisateur (même les non spécialistes).

3.6.2. Application des régressions logistiques

3.6.2.1. Carte de susceptibilité aux glissements de terrain

Tout comme pour la TDE, plusieurs simulations ont été réalisées, et ce en intégrant les mêmes variables et néo-variables prédictives. Ensuite, les valeurs de l'AUC ont été calculées pour les différentes combinaisons (Tableau VI-7). Cela a permis de constater que les meilleurs résultats correspondent aux combinaisons qui ne contiennent pas la variable sismicité (Isoprofondeurs). Cette dernière a été toujours la source d'une surestimation des classes à moyenne et forte susceptibilité dans la partie NNE du secteur d'étude.

COBINAISONS DE VARIABLES	AUC
A = NVP RHF + NVP LP + NVP PH	0,82
B = VP S + VP OS + VP EV	0,67
C = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,85
D = NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,88
E = NVP RHF + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,72
F = NVP RHF + NVP LP + VP S + VP OS + VP EV	0,70
G = NVP RHF + VP S + VP OS + VP EV	0,63
H = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS	0,75
I = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP EV	0,64
J = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP OS + VP EV	0,89
K = NVP RHF + NVP LP + VP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,81
L = NVP RHF + NVP LP + VP P + VP S + VP OS + VP EV	0,77

Tableau VI-7 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables.

Les valeurs des AUC permettent de déduire qu'une combinaison des trois néo-variables prédictives est suffisante pour obtenir une logique et satisfaisante distribution de la susceptibilité aux glissements avec AUC = 0.82. Ce dernier grimpe à 0.87 avec l'intégration de la variable expositions des versants, et puis 0.89 avec l'intégration de la variable occupation des sols.

Si l'on tente de hiérarchiser les différentes variables selon leur importance dans le conditionnement des glissements de terrain dans le secteur, ainsi que sur l'augmentation du pouvoir prédictif du modèle (chaque simulation), on aurait le classement suivant : d'abord les néo-variables avec NVP LP, NVP PH, et NVP RHF ; ensuite les variables prédictives individuelles avec, VP OS, VP EV, et VP S.

En plus des valeurs de l'AUC, et après la comparaison visuelle des cartes issues des différentes simulations, nous avons conclu que le meilleur résultat correspond à la combinaison des trois néo-variables associées aux variables occupation des sols en plus de l'exposition des versants. Cependant, et par analogie aux cartes obtenues par l'approche bivariable de la théorie de l'évidence, la carte finale par approche multivariée des régressions logistiques de la susceptibilité aux glissements de terrain (Figure VI-19) a été reclassifiée à l'aide des seuils de probabilités.

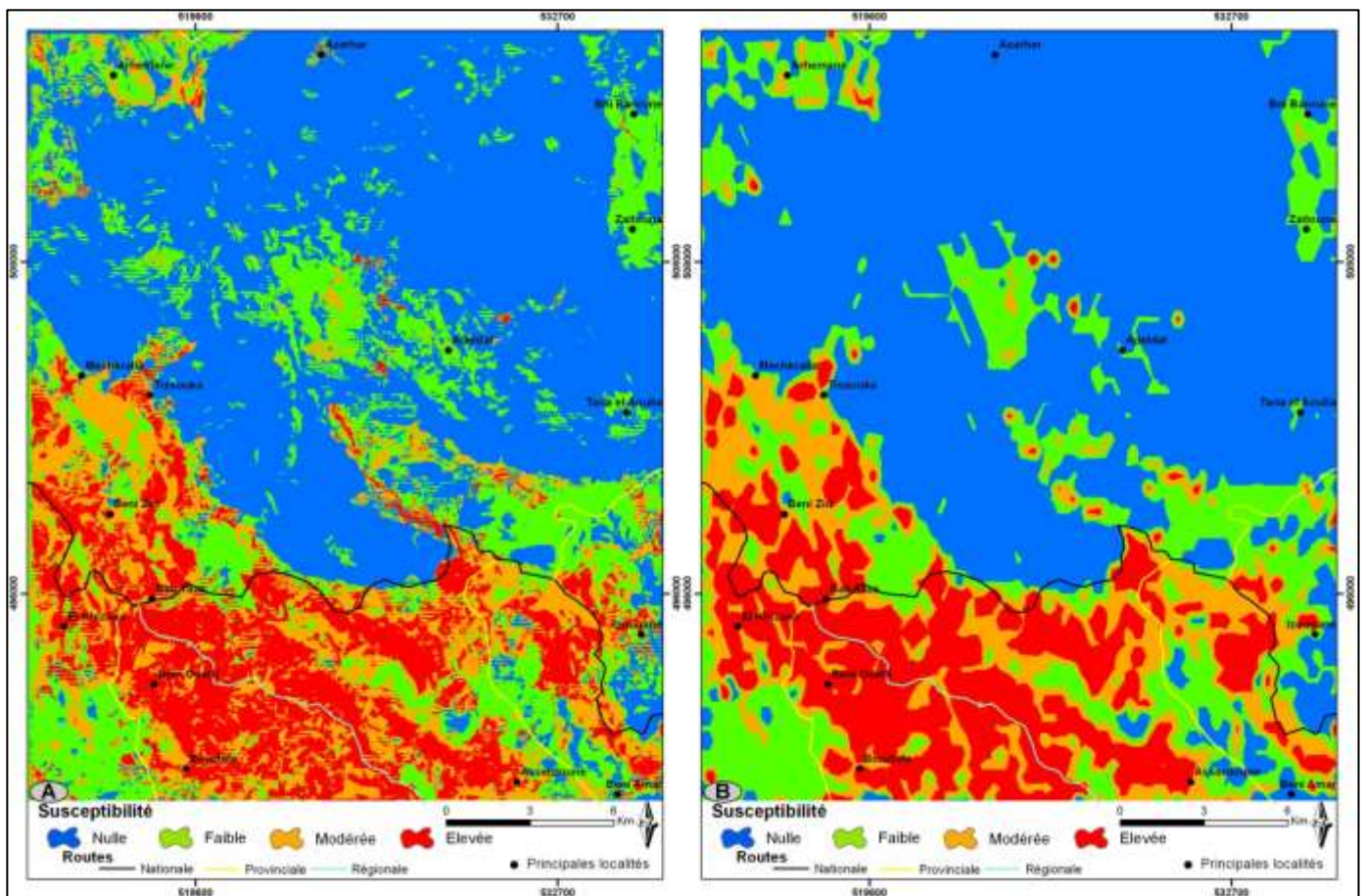


Figure VI-19 : A : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local ».

Suivant la même démarche établie pour le TDE, la carte de susceptibilité obtenue ici a été lissée afin de simplifier son utilisation et interprétation. La comparaison des superficies des différentes classes de susceptibilité aux glissements obtenues par les deux approches (TDE et RL) (Figure VI-20), montre que le pourcentage reste presque inchangé pour la superficie couverte par la susceptibilité nulle. Par contre, un accroissement se marque pour les aires couvertes pour les classes de susceptibilité nulle et celle faible, qui passent respectivement de 50.54% à 59.39% et de 14.24% par la TDE à 20.84% par les RL. Cette augmentation s'est faite au détriment de l'aire couverte par la susceptibilité moyenne qui est passée de 20.61% à 15.17%.

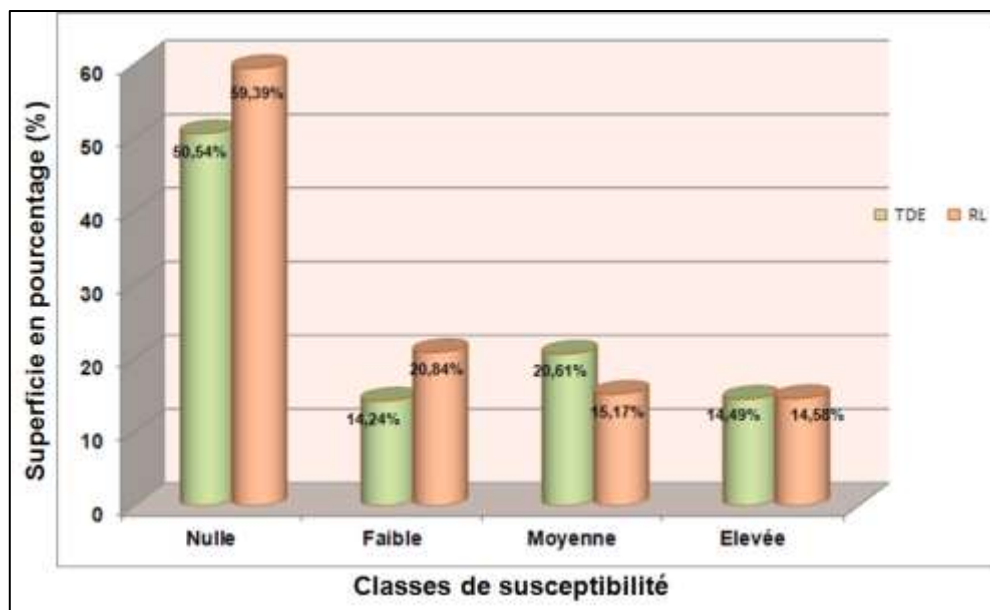


Figure VI-20 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).

En fin, et pour comparer d'avantage la qualité des deux cartes de susceptibilité obtenues par la TDE et les RL, nous avons procédé au calcul de l'erreur relative pour la classe de susceptibilité élevée (E) (Thiery, 2007 ; Thiery et al., 2007). Elle consiste à calculer le ration du nombre de cellules représentant la variable à modéliser (glissements) (O_v équation 1), moins le nombre de cellules représentant la classe de susceptibilité élevée (P_v équation 1), sur le nombre de cellules représentant la variable à modéliser, ce qui traduit par la formule ci-dessous :

$$\text{Equation.1: } \mathcal{E} = \frac{O_v - P_v}{O_v}$$

L'erreur relative calculée est de l'ordre de 0.20 pour la carte obtenue par la TDE, alors qu'elle de l'ordre de 0.17 pour les RL. Cela montre que les glissements de terrain inventoriés et introduit dans l'analyse sont mieux reconnu dans le modèle multivarié (RL) que dans le modèle bivariée (TDE).

3.7. Susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris

3.7.1. Application de la théorie de l'évidence

La deuxième partie de l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de versants par approche bivariée (théorie de l'évidence) dans le secteur de Bab Taza a consisté en l'établissement de la carte de susceptibilité des versants, à la fois aux écroulements et aux coulées de débris. Ces deux types de mouvements ont été intégrés ici en une seule fois, comme nous l'avons précisé au début de cette section (4).

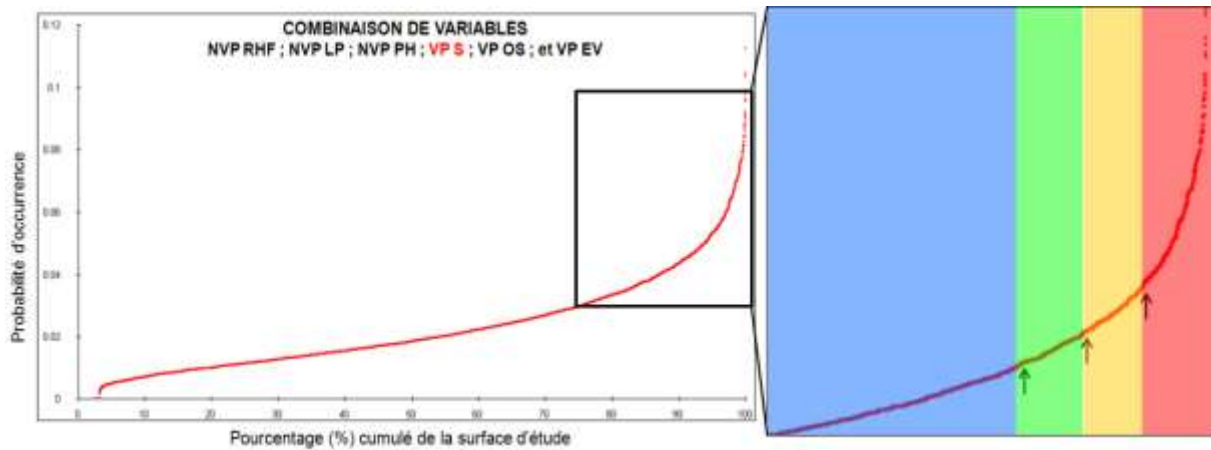


Figure VI-21 : Courbe de probabilité de la susceptibilité aux écoulements et aux coulées de débris.

Cependant, les mêmes étapes d'analyse adoptées précédemment pour le zonage de la susceptibilité aux glissements ont été suivies ici. Nous avons donc effectué plusieurs simulations et calculé leurs valeurs AUC (Sensibilité/1 – Spécificité) respectives. Cela, nous a permis de sélectionner la simulation (combinaison de VP) la plus cohérente pour exprimer la susceptibilité aux écoulements et aux coulées de débris dans la région de Bab Taza. Il s'agit de la combinaison qui rassemble les variables : NVP RHF ; NVP PL ; NVP PH ; VP OS ; et VP EV dont la courbe de prédictibilité est représentée dans la figure VI-21. L'AUC correspondant est de l'ordre de 0.81.

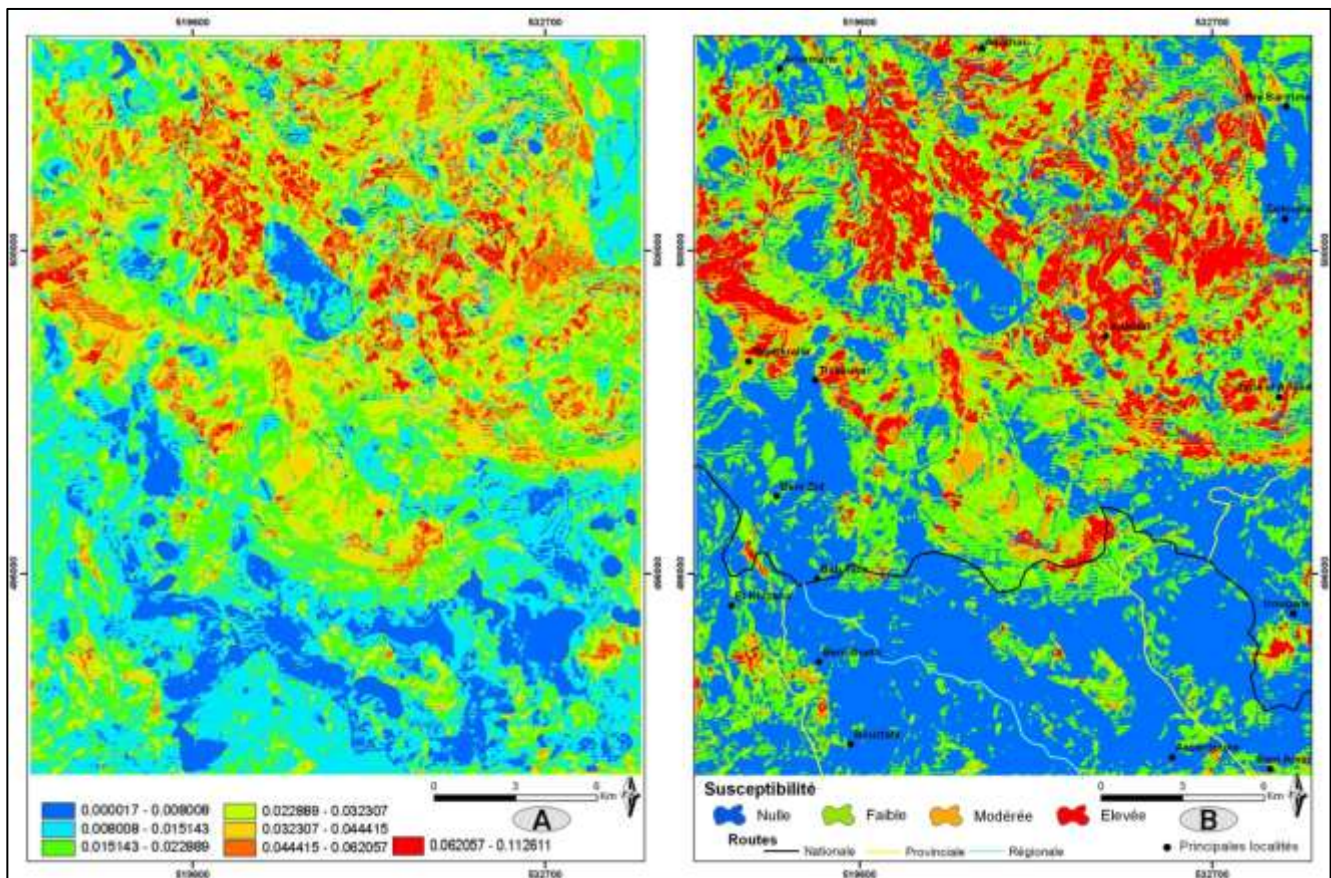


Figure VI-22 : A : Carte de probabilité d'occurrence des écoulements et des coulées de débris dans la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité des versants de la région de Bab Taza aux écoulements et aux coulées de débris.

La qualité de la carte obtenue était vérifiée en deuxième lieu de façon visuelle, où nous l'avons confronté avec les données réelles de terrain. Les résultats de cette comparaison sont très bons, puisque les classes de probabilités les plus importantes se localisent sur les terrains de la Dorsale calcaire (Figure VI-22), réunissant les conditions *sine qua non* pour l'existence des écroulements et des coulées de débris. Il s'agit de la nature des terrains, la grande densité de fracturation, la circulation des eaux de surface et surtout la circulation karstique, les précipitations (pluvieuses et neigeuses), l'occupation des sols caractérisée par des terrains nus, sans oublier les fortes pentes...etc. La classe de forte occurrence des écroulements et des coulées de débris se rencontrent même en dehors du périmètre de la Dorsale calcaire. Cela, est tout à fait logique, puisque cette forte susceptibilité se localise sur de grandes barres gréseuses et quartzitiques du secteur. A ce niveau, les mêmes conditions que sur la Dorsale calcaire.

Cependant, nous avons reclassifié la carte initiale pour traduire les probabilités d'occurrence des écroulements et des coulées en termes de niveaux de susceptibilité. La méthode la plus simple était d'identifier les seuils des différentes classes sur la courbe cumulative de probabilité à postériori (Figure VI-21). Ainsi, quatre classes de susceptibilité ont été définies et ont permis d'obtenir la carte de la figure VI-22B. Les caractéristiques des différentes classes de susceptibilité sont résumées dans le Tableau ci-dessous (Tableau VI-8).

Classe de susceptibilité	Superficie occupée	Intervalle de probabilité
Nulle	41.31%	0.000017 - 0.001514
Faible	36.79%	0.001514 - 0.032307
Moyenne	9.07%	0.032307 - 0.044415
Elevée	12.81%	0.044415 - 0.112611

Tableau VI-8 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain

La comparaison de ces pourcentages des classes obtenues avec ceux obtenus pour les glissements de terrain montre que la taille de la classe de susceptibilité nulle et celle élevée, reste très comparable, et ce malgré un nombre des glissements environ trois fois plus petit que celui des écroulements et des coulées de débris. Cela montre que les glissements sont les plus susceptibles à se produire partout dans le secteur, contrairement aux écroulements et coulées de débris limités géographiquement au périmètre de l'unité de la Dorsale Calcaire.

3.7.2. Application des régressions logistiques

Plusieurs simulations ont été réalisées pour évaluer la susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris par les RL. La comparaison des valeurs de l'AUC (Sensibilité/1 – Spécificité) correspondantes (Tableau VI-9), a permis de constater la combinaison 'J' des variables : NVP RHF ; NVP PL ; NVP PH ; VP OS ; et VP EV était à l'origine de la meilleur simulation. La carte de susceptibilité qui en résulte (Figure VI-23) présente de grandes disparités dans la distribution des classes de susceptibilité, avec son équivalente obtenue par la théorie de l'évidence. Les pourcentages de toutes les classes obtenues par les deux approches sont généralement comparables (Figure VI-24), à l'exception de la classe à moyenne susceptibilité qui passe de 9% par la TDE à 17% par le RL.

COBINAISONS DE VARIABLES	AUC
A = NVP RHF + NVP LP + NVP PH	0,80
B = VP S + VP OS + VP EV	0,67
C = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,75
D = NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,68
E = NVP RHF + NVP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,82
F = NVP RHF + NVP LP + VP S + VP OS + VP EV	0,72
G = NVP RHF + VP S + VP OS + VP EV	0,65
H = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP OS	0,77
I = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP S + VP EV	0,66
J = NVP RHF + NVP LP + NVP PH + VP OS + VP EV	0,86
K = NVP RHF + NVP LP + VP PH + VP S + VP OS + VP EV	0,82
L = NVP RHF + NVP LP + VP P + VP S + VP OS + VP EV	0,71

Tableau VI-9 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables

En dernier lieu, l'erreur relative calculée est de l'ordre de 0.23 pour la carte obtenue par la TDE, alors qu'elle est de l'ordre de 0.14 pour les RL. Cela montre que les écroulements et les coulées de débris sont mieux reconnus par l'approche multivariée des RL que par l'approche bivariée de la TDE.

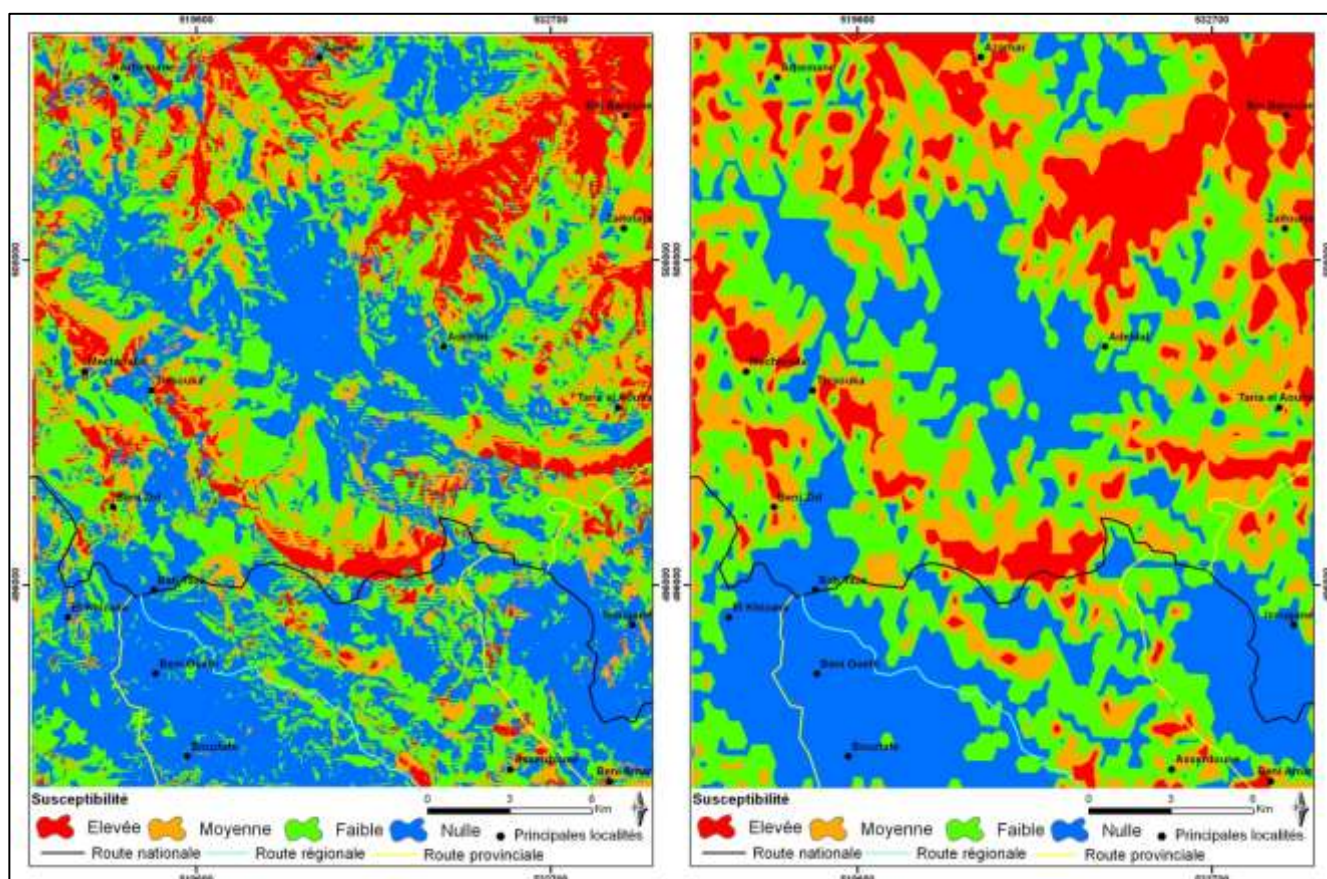


Figure VI-23 : A : Carte de susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local ».

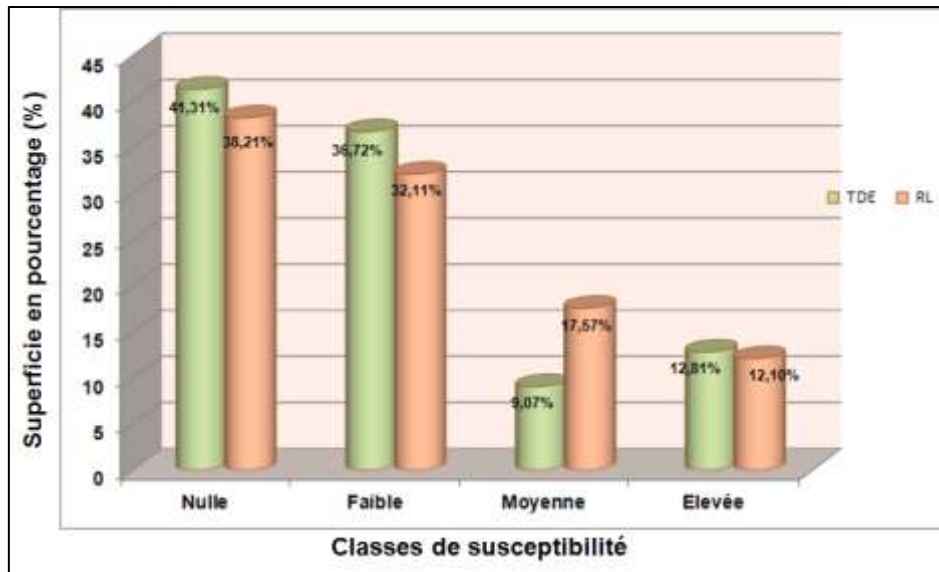


Figure VI-24 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les écroulements et les coulées de débris par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).

3.8. Cartes synthétiques

3.8.1. Théorie de l'évidence

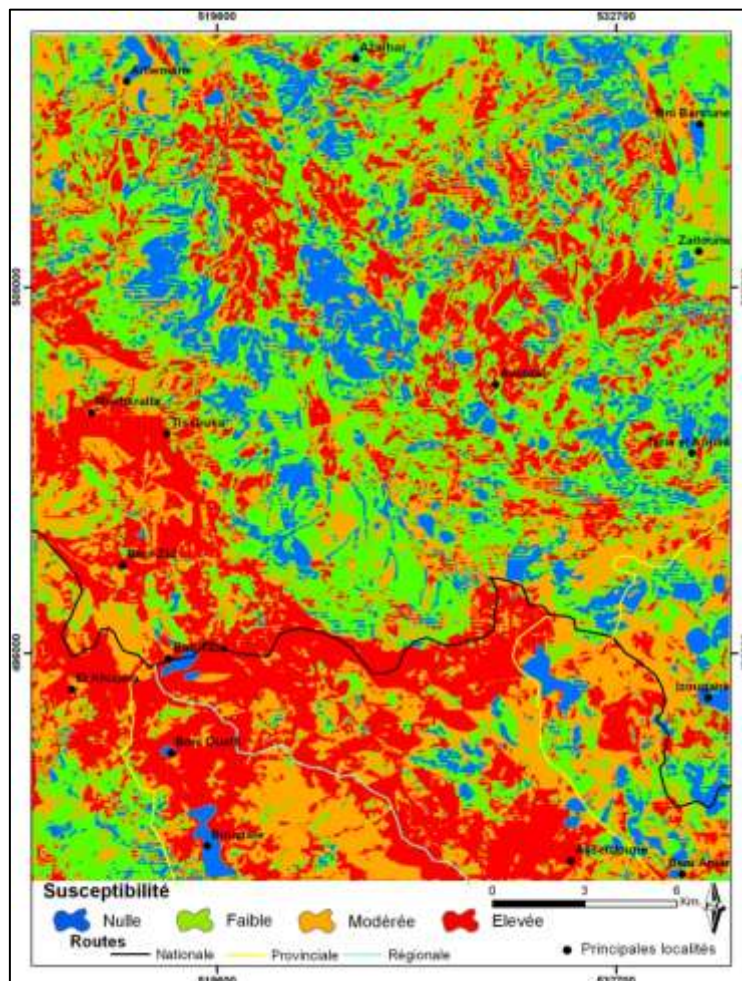


Figure VI-25 : Carte synthétique de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région de Bab Taza.

Afin de simplifier pour l'utilisateur l'exploitation des résultats obtenus, la carte de susceptibilité aux glissements et, celle aux écroulements et aux coulées de débris, ont été fusionnées en une seule carte synthétique définissant les niveaux de susceptibilité aux mouvements de terrain de la région de Bab Taza (Figure 25). Les classes de susceptibilité nulle, faible, moyenne et élevée couvrent respectivement, 10% ; 28% ; 26% ; et 36% de la superficie totale de notre secteur. Ensuite, pour examiner le degré d'ajustements des différentes classes de susceptibilité définies, à la distribution spatiale des mouvements de terrain déjà inventoriés et dont une partie n'a pas été intégrée dans l'analyse, nous avons eu recours au calcul de l'indice d'ajustement de chaque classe. Ce test précédemment utilisé par Baeza, 1994 ; Irigaray, 1995 ; et El Kharim, 2002 se présente mathématiquement par la formule suivante :

$$DA = \frac{\frac{m_i}{t_i}}{\sum \frac{m_i}{t_i}}$$

Avec ; m_i : Surface instable classée dans le degré i susceptibilité ;
 t_i : Surface totale du degré i susceptibilité.

Il s'agit d'un test qui permet de calculer le pourcentage des mouvements de terrain rencontrés dans chaque classe de susceptibilité définie. Logiquement, les pourcentages des MT calculés pour les classes de susceptibilité moyenne et forte devraient être significatifs pour pouvoir tester l'efficacité de la carte à quantifier correctement la probabilité des versants de donner lieu à des instabilités, en cohérence avec les données de terrain. Ainsi, 46.93% des mouvements sont classés correctement dans la classe à susceptibilité élevée, 29.52 des phénomènes sont classés dans la classe de susceptibilité modérée, 17.32% dans la classe faible, et finalement les 6.23% résiduels sont classés dans la zone à susceptibilité nulle. Ce résultat reste très satisfaisant, malgré les 6.23% incorrectement classés.

3.8.2. Les régressions logistiques

Par analogie au paragraphe précédent, les deux cartes de susceptibilité produites pour les glissements de terrain, et, pour les écroulements et les coulées de débris ont été fusionnées en une seule et unique carte (Figure VI-26). Les quatre classes de susceptibilité nulle, faible, moyenne et élevée couvrent respectivement, 9% ; 25.08% ; 28.78% ; et 37.15% de la superficie totale de notre secteur. Ces valeurs sont très proches de leurs équivalentes l'approche bivariée de la TDE (Figure VI-27). Malgré que ces valeurs globales soient comparables, l'observation des cartes de résultats indiquent que la prédiction des localisations spatiales par les deux modèles est différente. Le calcul du degré d'ajustement des différentes classes de susceptibilité obtenues par approches multivariée des RL montre que, 52.13% des mouvements de terrain sont correctement classés dans la classe à susceptibilité élevée, 37.51% des phénomènes inventoriés sont classés dans la classe à susceptibilité moyenne, 8.53% dans la classe à faible susceptibilité, alors que seulement 1.83% des instabilités de versants cartographiées persistent en tant qu'anomalie dans la classe à susceptibilité nulle. Ce dernier résultat témoigne d'un degré d'ajustement plus cohérent que celui obtenu par approche bivariée de la TDE où encore 6.23% des mouvements subsistaient dans la classe à susceptibilité nulle.

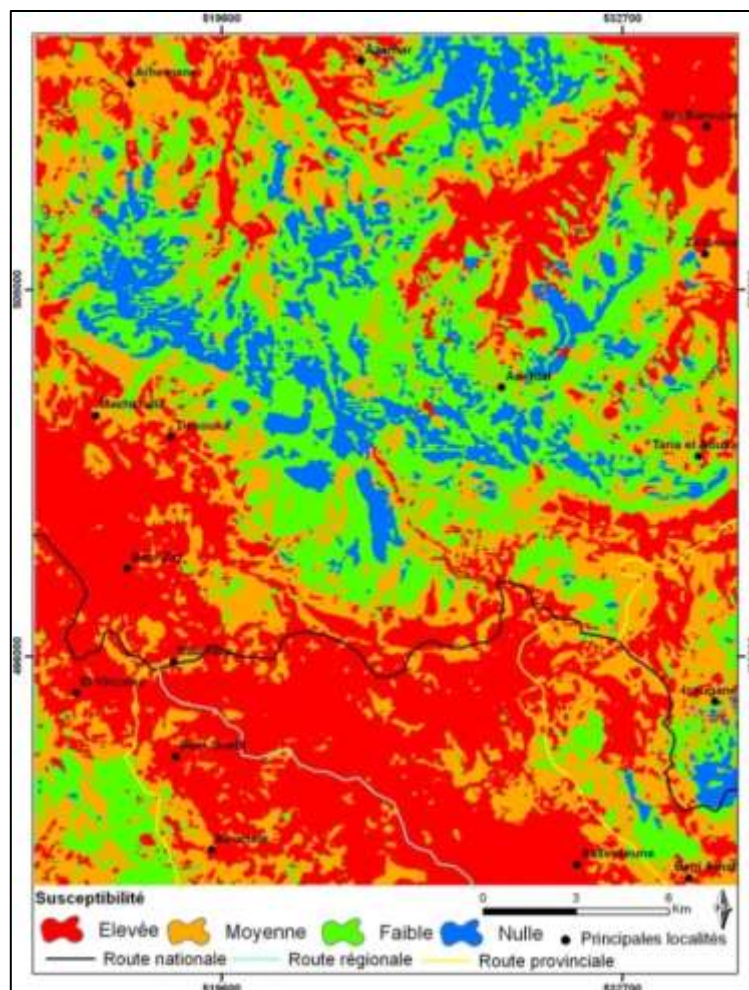


Figure VI-26 : Carte synthétique de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région de Bab Taza.

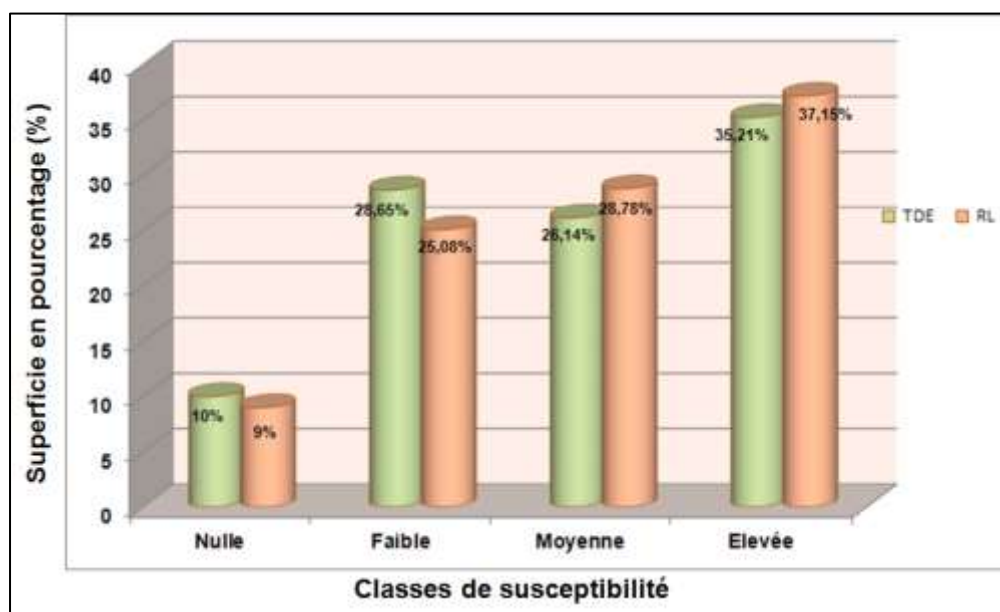


Figure VI-27 : Comparaison des superficies des classes de susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région de Bab Taza obtenues par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).

3.9. Discussion et conclusion

Cette étude constitue la première tentative, mettant en œuvre deux approches probabilistes bivariée et multivariée à méso-échelle, pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans un secteur montagneux maghrébin (Maroc nord – occidental). Cette échelle coïncide avec les limites des cartes IGN à l'échelle de 1/50 000^{ème}. Il s'agit d'une approche exploratoire basée sur l'utilisation de la théorie de l'évidence (TDE), et les régressions logistiques, qui sont des méthodes statistiques indirectes. **L'analyse a été menée à une taille de cellule (grid cell) ou de pixel de 25x25m, qui correspond à la résolution spatiale des données ASTER GDEM utilisées.** Les deux paramètres de base pour conduire une telle procédure sont les mouvements de terrain du secteur d'étude (variable à modéliser), et les facteurs de prédisposition (variables prédictive) intervenant dans le conditionnement de ses phénomènes. Ces derniers ont été cartographiés et intégrés au départ sous forme de variables individuelles, et il s'agissait, des **unités géotechniques et géomorphologique, la densité de la fracturation, la densité du réseau hydrographique, les précipitations, les isoprofondeurs des séismes, l'occupation des sols, le gradient de pente, l'hypsométrie ou l'élévation, et finalement l'exposition des versants.** Telles qu'elles sont, et pour la TDE ces variables ne pouvaient pas être intégrées dans notre analyse, puisqu'elles posaient des **problèmes de dépendance conditionnelle**. Cette dernière constitue la clé de base et une présomption de la théorie de l'évidence. Sa violation aurait donné des **résultats biaisés et/ou erronés**, et c'est pour cette raison que nous sommes basés sur une **stratégie par création de néo-variables prédictives** pour remédier aux problèmes de la dépendance conditionnelle. Les trois néo-variables prédictives formées ont été issues des couples de paramètres suivant, lithologie – pente ; précipitation – hypsométrie, et fracturation – réseau hydrographique. Ces trois néo-variables en plus des autres ont permis d'effectuer plusieurs simulations, pour connaître la meilleure combinaison de variables par la TDE et les RL. Les différentes simulations, ont permis aussi de connaître l'influence de chaque paramètre sur le pouvoir prédictif des simulations.

Comparée à la TDE, l'approche multivariée par RL a été plus souple à mettre en œuvre, puisqu'il n'était pas nécessaire de passer par un test de la dépendance conditionnelle. Dans le même sens, il n'était pas nécessaire, de mettre en forme les données d'entrée car il est possible de travailler aussi bien avec des données quantitatives qu'avec des données catégorielles. Toutefois, il a été indispensable d'effectuer un **diagnostic de colinéarité** entre les paramètres prédictifs, pour éviter toutes possibilités de biaisement dans l'estimation des coefficients définissant la contribution de chaque variable prédictive (dépendante ou de prédisposition) dans la genèse des MT. Ce diagnostic a consisté en le calcul de deux facteurs, la tolérance (TOL) et le facteur d'inflation de la variance (VIF) qui ont confirmé l'absence de toute colinéarité. Les coefficients calculés par régression ont permis de classer les différents paramètres selon leur importance dans la présence/absence des MT dans la région de Bab Taza. Il s'agit de l'ordre suivant, la lithologie (unités géotechniques et géomorphologiques), les précipitations, l'hypsométrie, l'occupation des sols, la fracturation (densité), et le réseau hydrographique (densité), suivis par le gradient de pentes, l'exposition des versants et la sismicité (isoprofondeurs).

Ensuite, les meilleures simulations obtenues ont été validées en deux phases. **Primo, objectivement, en examinant – Par le calcul de l'AUC qui représente la qualité du modèle par le rapport : Sensibilité/1 – Spécificité. Secundo, d'une façon visuelle par la confrontation de la carte sélectionnée avec les données réelle de terrain.** *In fine*, c'est la combinaison formée par les trois variables néoformées en plus de l'occupation des sols et

l'exposition des versants, qui a permis d'obtenir la **meilleure simulation avec des résultats concordants avec les observations du terrain, et ce pour les deux approches utilisées**. Ainsi, nous avons obtenu une carte définissant quatre catégories ou niveaux de susceptibilité aux glissements de terrain à méso-échelle pour le secteur de Bab Taza. Les classes de susceptibilité nulle, faible, moyenne et élevée, ont été définies par la reclassification des probabilités a posteriori d'occurrence des glissements, **en déterminant les seuils de classes sur la courbe cumulative des probabilités**. Ensuite, les mêmes étapes ont été reconduites pour réaliser les cartes de susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris, où il s'est avéré que meilleure simulation a été obtenue avec la même combinaison de variables que les glissements. Les deux cartes de susceptibilité ont été regroupées en une seule **carte synthétique de la susceptibilité aux mouvements de terrain**, pour faciliter son utilisation et offrir une exploitation rapide.

Il faut également signaler que la susceptibilité élevée caractérise les secteurs avec de gradient de pentes très importants, où on assiste beaucoup plus aux phénomènes d'écroulements et de coulées de débris caractéristiques du domaine de la haute montagne (Dorsale calcaire), mais aussi ceux avec des gradients de pentes faibles à moyens où on rencontre d'avantage les glissements. Cela nous a fait penser au rôle des formations superficielles meubles et héritées, qui constituent une des couches d'information les plus importantes et nécessaires pour une bonne évaluation de la susceptibilité des versants aux glissements (Maquaire et Malet, 2006 ; Thiery, 2007). Cette variable étant peu disponible dans notre cas, aurait sans doute permis d'améliorer la qualité du modèle prédictif de la susceptibilité aux mouvements dans le secteur.

L'erreur relative, le degré d'ajustement des classes de susceptibilité, et les courbes ROC (Figure VI-28) démontrent que l'approche multivariée (RL) présente de grandes performances que l'approche bivariée de la TDE, **pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans notre contexte montagneux et à l'échelle du travail considérée (1/50 000ème)**.

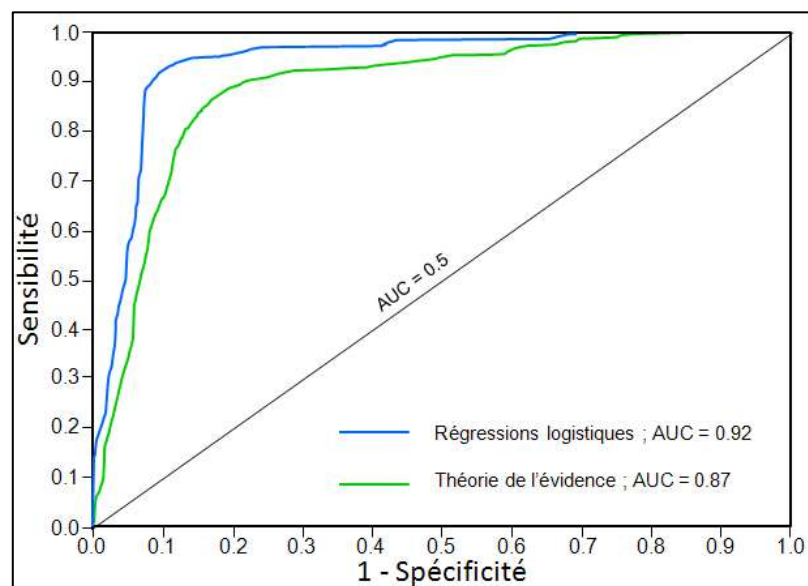


Figure VI-28: Comparaison des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) obtenues par les deux approches utilisées. Courbe verte pour l'approche bivariée (théorie de l'évidence), et courbe bleue pour l'approche multivariée (régressions logistiques).

D'un point de vue distribution spatiale de la susceptibilité, les deux modèles spatiaux employés présentent des résultats assez proches, notamment pour la moitié sud du secteur. Cela est confirmé par les tailles comparables des différentes classes de susceptibilité issues des deux modèles, mais aussi par la surface commune aux deux modèles spatiaux couverte par la susceptibilité élevée (Figure VI-29). Les deux modèles semblent être performants pour prédire la classe de susceptibilité élevée, avec une aire commune aux deux modèles de 118Km². Pour les classes de susceptibilité moyenne, faible et nulle, des convergences entre les deux modèles sont observées, malgré une superficie moins importante que pour la classe de susceptibilité élevée. Ces convergences peuvent résulter du découpage des classes à l'aide de la courbe cumulative.

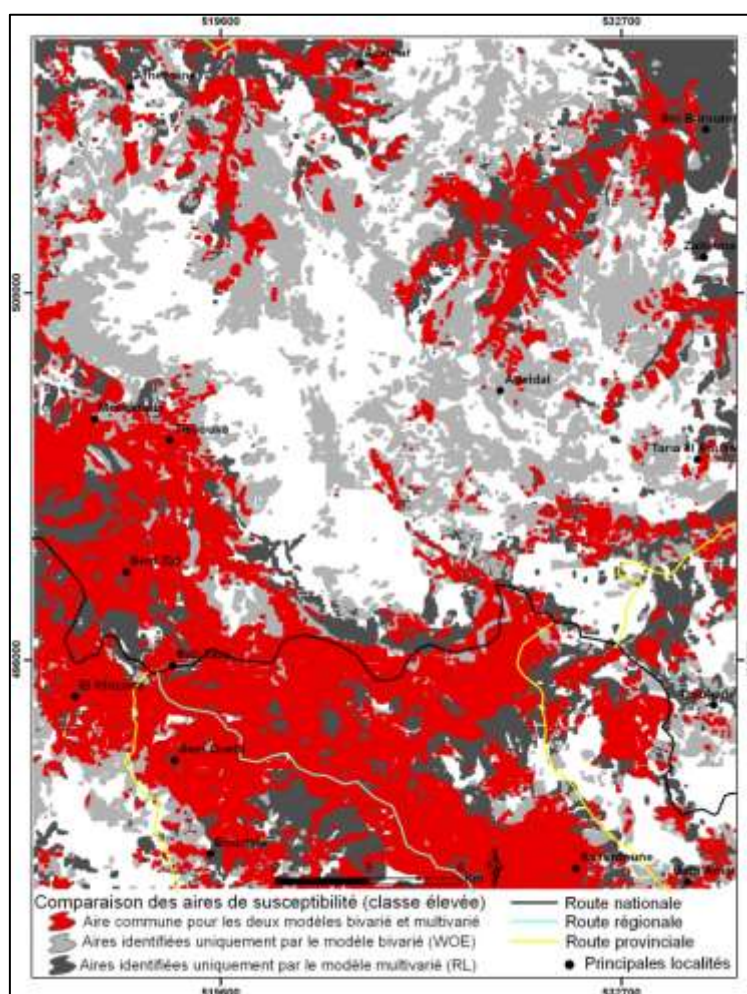


Figure VI-29 : Comparaison des aires de susceptibilité élevée obtenues par les deux modèles.

A première vue, la comparaison de la distribution spatiale des aires de susceptibilité élevée des deux modèles spatiaux (Figure VI-29) laisse penser que cette classe est surestimée surtout dans la partie Sud du secteur, or que c'est tout à fait logique si l'on confronte ce résultat aux données réelles de terrain. Il s'agit des aires où nous avons des pentes qui varient de 10 à 20° et de 20 à 30° définies comme étant très favorables pour le déclenchement des glissements dans cette région (et tout le Rif). Aussi, et d'un point de vu mécanique les versants de cette partie étant formés essentiellement par des terrains schisto-conglomératiques et des alternances marno-calcaires à dominance marneuse dont les caractéristiques géotechniques sont très médiocres. Cela rend cette zone très favorable aux instabilités de type

glissements. A cela s'ajoute-le type d'occupation des sols caractérisés par la présence de terrains agricoles, des précipitations importantes, ainsi qu'une fracturation très dense dominée par les fronts de chevauchement majeurs permettant une importante infiltration et circulation des eaux. Enfin, l'activité sismique intervient malgré un caractère même modéré.

Pour finir, les résultats obtenus dans ce travail, confirment ceux obtenus par Van Den Eeckhaut et al., 2010 ; Bai et al., 2010 ; Schicker, 2010 ; Nandi et Shakoor, 2009....Notre travail démontre que l'analyse spatiale multivariée par les régressions logistiques, fondées sur le couplage entre l'expérience du géologue de terrain (choix des paramètres) et l'objectivité de la méthode de calcul, s'avère être une des méthodes les plus performantes pour évaluer la susceptibilité des versants.

4. Zonation de la susceptibilité à grande échelle (1/ 5 000, village de Chefchaouen) par approche géomorphologique

4.1. Cadre géographique

La zone géographique concernée par cette analyse correspond à la commune urbaine de Chefchaouen. Elle est située au nord – ouest de la province et s'étend sur une superficie qui ne dépasse les 10Km². Elle présente la municipalité la plus peuplée de la province de Chefchaouen avec une population de l'ordre de 50 000 habitants avec une densité d'environ de 5000 habitants par Km² (Figure V-51).

4.2. Cadre géologique et géomorphologique

Les trois quarts des terrains de la municipalité urbaine de Chefchaouen sont formés par la Dorsale calcaire externe, le reste du secteur étant installé sur les terrains de l'unité de Tanger externe essentiellement constituée d'argiles et de marnes schisteuses, ou de flyschs schisto-gréseux. D'un point de vue géomorphologique et comme son nom tiré de l'amazigh Rifain l'explique Chefchaouen veut dire cornes. Ce en raison de sommets montagneux qui dominant et entourent la région qui est bâtie à une altitude d'environ 700m. Ce caractère montagneux intensément fracturé conjugué à d'importantes précipitations (pluvieuses et neigeuses) expose cette zone aux phénomènes d'éboulements.

4.3. Evaluation de la susceptibilité à grande échelle par zonage géomorphologique

Le zonage géomorphologique a été adopté, pour évaluer la susceptibilité de la municipalité de Chefchaouen aux éboulements naissant des reliefs entourant cette région du côté Nord et Nord – Est. Il s'agit d'une approche **directe** et **qualitative** qui a été choisie pour deux importantes raisons. La première est qu'elle est une des méthodes les plus appropriées (Figure I-6) pour l'évaluation de la susceptibilité à grande échelle (échelle large 1/5000^{ème}). La seconde c'est qu'elle est rapide et simple à mettre en œuvre, ce qui répond aux exigences en temps et moyens engagés pour le présent travail. Le zonage géomorphologique de la susceptibilité s'est déroulé en deux épisodes. D'abord sur le terrain où les zones de susceptibilité ont été directement délimitées sur le plan urbain du village de Chefchaouen. Les travaux de terrain ont permis de relever les principales caractéristiques du secteur d'étude, ainsi que les informations nécessaires pour le zonage de la susceptibilité aux éboulements.

LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME

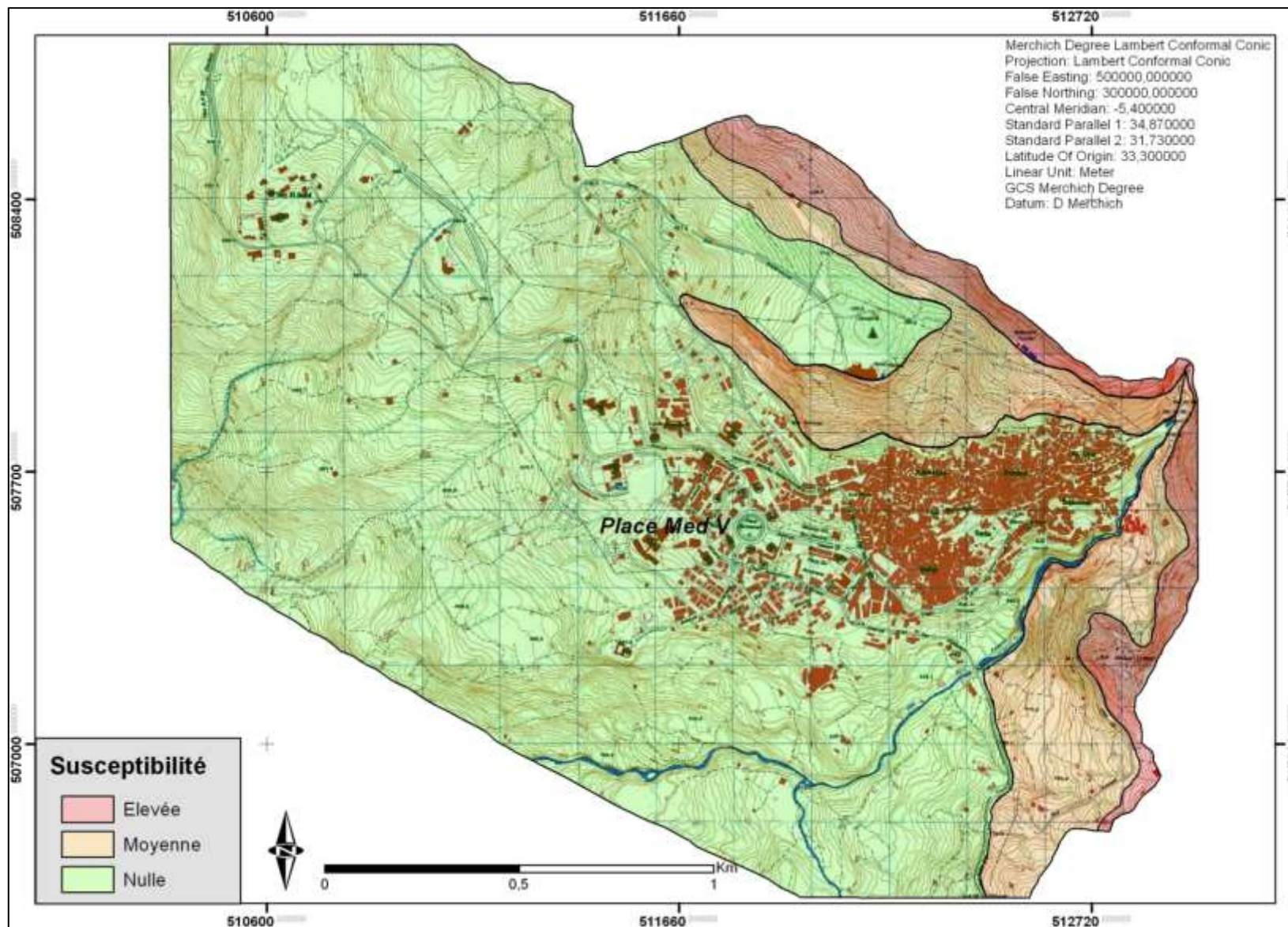


Figure VI-30 : Carte de susceptibilité aux écroulements de la commune urbaine de Chefchaouen.

Il a été remarqué que le volume des blocs éboulés varie de quelques centaines à quelques centaines de milliers de m³, d'où on parle des phénomènes d'éboulements moyens ou mineurs (Copons et Vilaplana, 2008).

Au niveau du secteur, la fracturation est moins dense que dans le reste de la Dorsale. Les discontinuités semblent y être superficielles, ce qui explique la petite taille des blocs en comparaison avec les autres parties de la Dorsale. Cela laisse favoriser l'hypothèse qu'une très lente désagrégation mécanique en relation avec les intempéries (changement de température, précipitations, cycles du gel/dégel) serait en grande partie responsable de la mise en place des éboulements de la région. Nous avons cependant constaté que le départ des éboulements est tributaire de deux parties des versants. Une première caractérisée par des gradients de pentes compris entre 65° à 80°, donnent naissance à une grande densité d'éboulements. Une deuxième caractérisée par des gradients de pentes compris entre 50° à 65° où la fréquence des éboulements est moins importante comparée à la première zone. Les deux zones définissent deux classes distinctes de susceptibilité aux éboulements. La première étant la classe à susceptibilité élevée, et la deuxième étant la classe de susceptibilité moyenne (Figure VI-31). La dernière zone, à susceptibilité nulle matérialisée par la couleur verte sur la figure VI-31, correspond à un secteur où la possibilité de déclenchement d'un éboulement est totalement nulle puisque les terrains y sont presque plans.

La finalisation du zonage de la susceptibilité des versants aux phénomènes d'éboulement a été menée à l'aide de la vision synoptique que confère l'imagerie satellitaire THR. Les différentes classes de susceptibilité élevée, moyenne et nulle occupent respectivement 5.07%, 12.81% et 82.12%.

4.4. Discussion et conclusion

La grande mobilité des éboulements (en fonction de la taille, la pente...etc) implique une grande difficulté pour l'évaluation de leur susceptibilité. Pour évaluer la susceptibilité aux éboulements (écroulements, détachements de blocs, ou autre), deux éléments cruciaux sont à identifier en priorité. Il s'agit du point de départ et celui d'arrivée (d'arrêt) du bloc éboulé. Par ailleurs, le point d'arrêt (arrivée) peut changer d'une façon très significative en fonction de plusieurs paramètres. A titre d'exemple, on cite la pente, la taille du bloc, la trajectoire...etc. pour tenir compte de tels paramètres, l'utilisation des méthodes déterministes à base physiques, des approches probabilistes statistiques ou géotechniques (Pierson et al., 1990, Cancelli et Crosta, 1993) est inévitable, sans oublier qu'il est tout à fait obligatoire de disposer des données historiques (archives ou catalogues) sur les éboulements passés, ce qui permet d'avoir une idée sur la fréquence de déclenchement des éboulement et par la même occasion une quantification de la récurrence des phénomène (Hung et al. 1999 ; Dussauge et al, 2002). Ce type de données étant inexistant dans notre cas, ne permettant l'utilisation d'une des méthodes précitées. Au manque de données s'ajoutent les contraintes en moyens et en temps.

La susceptibilité aux phénomènes d'éboulements dans la commune urbaine de Chefchaouen a été donc évalué en suivant une approche géomorphologique simpliste qui a été favorisée par l'étendue limitée (~7Km²) du secteur d'étude. Elle a été basée sur une analyse géomorphologique effectuée sur le terrain complétée à l'aide de la vision synoptique de l'imagerie satellitaire THR. Etant donné l'échelle du travail, la plus part des facteurs de prédisposition restent presque inchangés sur l'ensemble des 7Km² du secteur d'étude, à l'exception du gradient de pente qui était le critère de base pour la définition des différentes classes de susceptibilité, notamment la classe de susceptibilité et celle moyenne. Ces deux

classes proviennent respectivement de deux gammes de gradients de pentes et une fréquence spatiale des éboulements. La première classe (susceptibilité élevée) est définie par la classe de gradient de pente compris entre 65° à 80° , et est caractérisée une grande densité des éboulements. La seconde (susceptibilité moyenne) deuxième caractérisée est définie par des gradients de pentes compris entre 50° à 65° où la fréquence des éboulements est moins importante que pour la classe précédente.

5. Conclusion du chapitre 6

Ce chapitre avait pour objectif d'évaluer la susceptibilité des terrains de la province de Chefchaouen aux 'mouvements de versant' en mettant en œuvre une approche multi-échelle (petite, moyenne et grande) par l'utilisation des méthodes adaptées.

Nous avons débuté par la cartographie de la susceptibilité à **échelle régionale 1/100 000ème** (ou provinciale) pour l'ensemble de la province de Chefchaouen, par approche heuristique basée sur la combinaison de cartes d'index. Pour ce faire, neuf paramètres ont été intégrés. Leur hiérarchisation a été effectuée en corrélation avec la distribution spatiale des mouvements de terrain du secteur. Quant à leur pondération, elle s'est déroulée à deux niveaux, pour les différentes classes et puis pour le paramètre dans sa globalité. L'indexation de chaque classe, a été définie objectivement (qualitativement) à l'aide des statistiques établies sur les données réelles de la région. Il en résulte l'obtention de la carte de susceptibilité, par sommation linéaire des cartes (paramètres) indexées, où nous avons obtenu des index compris entre **156** définissant le niveau de susceptibilité le plus bas, et **473** caractérisant le niveau de susceptibilité le plus élevé du secteur. Il a été indispensable de traduire les index de susceptibilité en termes de niveaux descriptifs spatialement distincts, par reclassification. La carte obtenue comprend cinq classes de susceptibilité, de la très faible à la très élevée. Elle a cependant été utilisée en association avec les mouvements de terrain inventoriés (glissements, écroulements, coulées de débris, et les glissements – sapements) pour la construction d'une courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Cette courbe nous a permis par l'AUC (*area under the curve*) de retenir que le modèle utilisé a un bon pouvoir prédictif à anticiper (prédire) les aires susceptibles ou pas aux instabilités de versants.

La deuxième étape d'évaluation de la susceptibilité s'est déroulée à **méso-échelle** ou à **échelle moyenne (1/50 000ème)**. Elle avait comme cadre géographique la région de Bab Taza qui se situe dans la partie Nord – Ouest de la province de Chefchaouen et s'étend sur une superficie totale d'environ 630 Km². Cette étape **constituait la première tentative pour prédire la susceptibilité aux mouvements de terrain dans un secteur montagneux maghrébin (Maroc nord – occidental) par l'utilisation de deux approches probabilistes (une bivariée et l'autre multivariée) à méso-échelle**. Il s'agit de la théorie de l'évidence et des régressions logistiques. Les deux approches ont été utilisées d'une façon exploratoire basée sur l'utilisation des calculs algorithmiques. Pour l'application de la théorie de l'évidence, trois néo-variables prédictives ont été réalisées pour éliminer les problèmes de dépendance conditionnelle rencontrés. **Le même paramétrage utilisé par la théorie de l'évidence a été reproduit par les régressions logistiques afin de pouvoir comparer les résultats obtenus par les deux approches**. Cette comparaison a prouvé que **l'approche multivariée par régressions logistiques a été plus performante** pour la prédiction de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région de Bab Taza, comme cela été confirmé par la comparaison des courbes ROC des cartes obtenues par les deux approches. Dans le même sens, l'approche **multivariée par régressions logistiques a été plus souple à mettre en œuvre**, puisqu'il n'était pas nécessaire de passer par un test de la dépendance

conditionnelle, ou de mettre en forme les données d'entrée car il est possible de travailler aussi bien avec des données quantitatives qu'avec des données catégorielles. En revanche, il a été indispensable d'effectuer un **diagnostic de multicollinéarité** entre les paramètres prédictifs, pour éviter toutes possibilités de biaisement dans l'estimation des coefficients définissant la contribution de chaque variable prédictive (dépendante ou de prédisposition) dans la genèse des mouvements de terrain.

Pour obtenir le meilleur résultat par les deux approches utilisées, et pour connaître l'influence de chaque paramètre sur notre modèle prédictif pour les deux approches, plusieurs simulations avec différentes combinaisons de variables ont été réalisées. Il s'est avéré que la meilleure d'entre elles est formée par la même combinaison pour les deux approches. Il s'agit de la combinaison des trois néo-variables réseau hydrographique – fracturation, lithologie – gradient de pente, et précipitations – hypsométrie ; en plus des paramètres expositions des versants et occupation des sols.

La dernière partie de modélisation de la susceptibilité s'est déroulée à **grande échelle (1/5000^{ème})**, au niveau de la commune urbaine de Chefchaouen. L'approche utilisée est très simpliste et est basée un zonage géomorphologique effectué directement sur le terrain et puis finalisé grâce à la vision synoptique que confère l'imagerie satellitaire THR. La carte obtenue définit trois niveaux de susceptibilité, élevée, moyenne, et nulle.

Conclusion générale

La province de Chefchaouen est caractérisée par une forte densité de mouvements de versants. De ce fait, et dans le cadre du développement des provinces du Nord du Maroc, l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrain constitue une étape nécessaire pour l'aide à la prise de décision, et aussi pour le bien-être des habitants de la province. Ainsi, le présent travail s'organise en 6 chapitres :

- ✓ **Le premier** a été consacré dans sa première moitié à la présentation du sujet de cette thèse, son champ disciplinaire, les travaux antérieurs, la problématique et les objectifs fixés. Il a été également consacré à la terminologie à utiliser pour éviter des ambiguïtés de langage très souvent observées. A la suite de cette mise au point, ont été évoqués - un état d'art très synthétique sur les différentes méthodes de zonage de la susceptibilité aux mouvements de terrain, et, - les différentes étapes à suivre pour une modélisation de la susceptibilité sous SIG, ainsi que les méthodes à utiliser en fonction de l'échelle d'analyse et les données disponibles
- ✓ **Le deuxième chapitre**, porte sur le cadre géographique, géomorphologique, et géologique détaillé du secteur d'étude dans le cadre de l'évolution de la chaîne Rifaine.
 - Il en ressort que l'état de structuration de la chaîne met en contact des formations géologiques variées avec de fréquentes alternances de matériaux de comportements mécaniques contrastés (calcaires, dolomies, grès, marnes, argiles...). Quant à la morphologie, elle est caractérisée par des reliefs très accidentés et de fortes dénivellations.
 - Cette situation est essentiellement la conséquence de l'activité tectonique de la chaîne Rifaine qui résulte de l'effet conjugué, de la convergence Afrique-Europe, et des phénomènes de réajustement isostatique qui ont accentué du Pliocène à l'Holocène des mouvements verticaux différentiels, essentiellement le long des principaux accidents à activité récente N – S, N040 – 070 et N090 – 120.
 - Ce système compressif (surrection) résulte en grande partie de la position du secteur d'étude (et tout le Maroc) en zone de collision, là où les deux plaques continentales Afrique-Europe se rapprochent l'une de l'autre. Cette position particulière se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète la poursuite de la convergence entre ces deux plaques lithosphériques, et dont les contraintes sont principalement absorbées par la chaîne atlasique et le Rif. De ce fait, les différentes unités géologiques se trouvent fragilisées par la réactivation et l'intensification de la fracturation et deviennent très susceptibles aux mouvements de terrain.
- ✓ **Le troisième chapitre** se focalise sur l'étude néotectonique du secteur d'étude, en se basant sur l'analyse morphostructurale du MNT et l'analyse du réseau hydrographique en termes d'anomalies et de perturbations de drainage. Cela, a permis de mettre en évidence des discontinuités d'origines lithologiques, structurales et même anthropiques (routes, pistes, limites de forêts ou de surfaces cultivées, lignes de

transport d'énergie, etc.). Le résultat a été confronté avec les cartes géologiques, les photos-aériennes, les cartes topographiques, et la couverture satellitaire THR disponible, pour ne retenir sur la carte synthétique que les discontinuités significatives de fracturation. Le résultat de cette analyse néotectonique a été inclus dans la carte de fracturation globale de la province de Chefchaouen, fracturation qui constitue un d'important facteur de prédisposition aux mouvements de terrains. Il a également été constaté que l'activité des rivières et oueds de la région, en s'enfonçant suite à la surrection régionale, incise d'avantage les pieds des versants et favorise la déstabilisation de ces derniers.

- ✓ Le **quatrième chapitre** correspond à une grande partie du travail réalisé, matérialisé par l'inventaire, la cartographie, la classification, et la caractérisation des mouvements de terrain, correspondant à un des éléments cruciaux pour mener à bien notre recherche. Cette étape a permis de :
 - Reconnaître cinq grandes familles de mouvements de versant, qui résultent aussi bien de la combinaison de facteurs naturels qu'anthropiques. Il s'agit, des glissements, des écroulements, des coulées boueuses, des sapements de berges et de routes, et des badlands.
 - Cartographier 1187 mouvements de terrain, qui couvrent une superficie de 135Km², soit 2.7% de la superficie globale de la province de Chefchaouen (5068Km²).
 - Juger de la bonne qualité de l'inventaire effectué, en comparaison avec les inventaires antérieurs pour la région de Bab Taza. Cependant, l'échelle d'analyse, la qualité et la résolution des données de bases, le temps de réalisation et la qualité de l'outillage mis à disposition, sans oublier le degré d'expérience de la personne menant l'étude, ont été évoqués comme étant les facteurs les plus importants, pouvant influencer la qualité de tout inventaire à mener.
 - Constater que la taille maximum des mouvements enregistrés est de 147 000 m² pour un minimum de 400 m² et une moyenne de 100 000 m². Les mouvements de terrain de petites tailles (< à 100 000 m²) sont au nombre de 912 soit 76.83% de la totalité des mouvements, et couvrent une superficie de 59.3Km² soit 43.92% de la totalité des mouvements de terrain. Ceux de taille moyenne comprise entre 100 000 et 300 000 m² comptent 216 mouvements correspondant à 18.19% du nombre total, et une superficie de 31.51 Km² correspondant à 23.39% de la totalité du secteur. Quant à ceux de grande taille, ils ne dépassent les 59 pour une superficie de 44.09 Km², c'est-à-dire 4.9% et 32.65% respectivement pour le nombre total des phénomènes et la superficie globale de la province de Chefchaouen.
 - Démontrer statistiquement que le changement de la taille des mouvements se fait d'une façon progressive, ce qui justifie que dans une même région, 1° il est possible de rencontrer tous types et toutes tailles de mouvements de terrain, et 2° qu'il n'existe pas une distribution géographique préférentielle des phénomènes en fonction de leur taille (superficie).

- ✓ Le **cinquième chapitre**, illustre le travail réalisé pour l'acquisition, la description, la hiérarchisation, la mise en forme et l'analyse des facteurs de prédisposition disponibles pour notre secteur d'étude, toute en examinant dans le détail via une étude statistique leur relation avec les mouvements de terrains inventoriés. Ainsi plusieurs conclusions ont pu être tirées.
 - La lithologie, cartographiée en termes d'affinités géotechniques et géomorphologiques (UG), a été la première variable prédictive à cartographier. Les fréquences générales des différentes unités, montrent que l'UG5 (terrains à dominance marneuse) contrôle de manière dominante la distribution des phénomènes (à elle seule : 37% des MT). Dans le détail, c'est-à-dire pour chaque type de mouvements séparément, la validité de cette observation est confirmée pour les glissements, les sapements et les badlands respectivement. Quant aux coulées de débris et les écroulements, leur distribution s'avère être intimement liée à l'UG4 (terrains en relief et à dominance calcaire, quartzitique ou gréseuse).
 - La fracturation a été intégrée en prenant en compte sa densité. Sa relation avec les phénomènes inventoriés quel que soit leur type, montre que ces derniers deviennent de plus en plus abondants avec l'augmentation de la densité de la fracturation. En regardant l'abondance de chaque type de mouvements pris isolément, nous avons remarqué que les badlands et les sapements se comportent indépendamment de la fracturation, sans écarter la possibilité que ses derniers s'intensifient en sa présence. En revanche, l'abondance du reste des phénomènes gravitaires semble être tributaire du degré de la fracturation, notamment les coulées de débris qui évoluent très sensiblement par rapport à ce paramètre-clé.
 - Le facteur sismicité, intégré en tenant compte des isoprotecteurs de séismes a constitué la troisième variable prédictive. Les fréquences de tous les mouvements varient sensiblement avec la profondeur des séismes : leur fréquence est inversement proportionnelle à la profondeur. Seuls les écroulements font exception : l'occurrence des écroulements est intensifiée avec les séismes les plus profonds, généralement très puissants et avec des amplitudes significatives.
 - Le gradient de pente : les différents types de mouvements se rencontrent sur toutes les pentes, mais avec de grandes fréquences au niveau des deux classes de 10 – 20° et 20 – 30° avec plus de 70% de la totalité des phénomènes inventoriés. Les écroulements sont tributaires de l'existence des massifs rocheux, et de pentes fortes (plus de 50°), largement supérieures à la pente d'équilibre (30°).
 - L'hypsométrie : les MT deviennent de plus en plus abondants avec l'altitude. En essayant de faire un focus sur l'évolution de chaque type de mouvements, on note que les glissements, les sapements et les badlands se développent plutôt à basse altitude alors que les coulées de débris et les écroulements affectent les domaines d'altitude relativement élevée, puisque les deux familles de mouvements sont essentiellement conditionnées par la présence des massifs rocheux (Dorsale calcaire, et les barres quartzitiques et gréseuses).

- L'exposition des versants: ce sont les versants orientés Nord, Sud – Ouest, et Ouest qui abritent les plus grandes fréquences des mouvements de terrain avec une moyenne de 15%. Ces versants sont, en fait, les plus humides (précipitations) et les moins ensoleillés. Quant aux fréquences les moins importantes, elles se rencontrent sur les versants orientés Sud – Est, Est et Nord – Est, avec une moyenne voisine de 10%.
 - La variable réseau hydrographique a été incorporé en se basant sur sa densité. Les fréquences les plus importantes des mouvements se situent essentiellement au niveau des classes de densité faible à moyenne. En effet, les cours d'eau sont le plus souvent intermittents, la classe à forte densité recouvre à peine 10% de la totalité de la zone d'étude, les secteurs à très forte densité étant pratiquement inexistant. Le réseau hydrographique de la région contrôle beaucoup plus l'occurrence des mouvements de terrain via les processus d'infiltration et de circulation souterraine (UG4), ainsi que par sapement lors des périodes notablement pluvieuses (UG5).
 - Les précipitations ont été cartographiées par interpolation, à l'aide des moyennes annuelles calculées sur les derniers 70 ans. Il en ressort que l'abondance des mouvements est proportionnelle aux hauteurs de précipitations et que ces dernières se trouvent contrôlées par les variations de la NAO. Une telle dualité justifie l'activité récurrente des mouvements de grande ampleur du secteur. Il s'agit des versants d'Amtrass, Chrafate, et celui de Bou Halla dont les principaux épisodes de réactivation se calquent sur les périodes NAO négatives.
 - L'occupation des sols pour laquelle les densités les plus importantes se hiérarchisent prioritairement en trois classes. Par ordre d'importance, elles recouvrent 1° les terres agricoles avec 45%, 2° les zones forestières denses qui subissent un défrichement accru (1/4 de la superficie !) et 3° les zones de matorrals (maquis). Les glissements, les sapements et les badlands ont une abondance maximale au niveau des terrains agricoles. Quant aux coulées de débris et les écroulements, ils se développent plutôt dans les classes des matorrals et des forêts denses où les principaux massifs rocheux (calcaires, grès, et quartzites) se rencontrent.
- ✓ **Le sixième et dernier chapitre**, est l'étude de la susceptibilité aux MT dans notre secteur d'étude, menée selon trois échelles différentes (petite : 1/100 000, moyenne : 1/50 000, et grande 1/5000) grâce à l'utilisation de méthodes adaptées.
- Nous avons débuté par la cartographie de la susceptibilité à échelle régionale 1/ 100 000ème (ou provinciale) pour l'ensemble de la province de Chefchaouen, par combinaison de cartes d'index (CCI).
 - Comme toutes les démarches heuristiques, l'approche par CCI est basée sur l'avis du cartographe qui mène l'analyse, ce qui relève d'une grande subjectivité dans l'attribution des poids des différents paramètres. Pour réduire cette subjectivité et s'affranchir de l'opinion du cartographe qui affecte largement les résultats finaux, les poids et les pondérations attribués aux différents facteurs de notre étude sont issus des corrélations statistiques entre

ces derniers et la distribution spatiale des MT. Cela reflète la relation réelle et fonctionnelle entre les variables prédictives et la variable à modéliser. Il a été constaté que les paramètres lithologie, précipitations, occupation des sols, viennent en premier lieu dans le conditionnement des MT de ce secteur. En deuxième lieu, nous avons la fracturation, suivie par la sismicité et puis les trois variables géométriques (gradient de pente, hypsométrie, et exposition des versants). Le réseau hydrographique, très peu évolué, interagit à bas niveau.

- La carte d'index (156 – 473) de susceptibilité a été obtenue par sommation linéaire des neufs paramètres hiérarchisés et pondérés. Cette carte reclassifiée par la méthode des discontinuités naturelles, matérialise cinq niveaux de susceptibilité (très faible à très élevée). La valeur de 0.81 obtenue pour l'AUC (Area Under the Curve) par la construction d'une courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), témoigne de la bonne qualité, et la capacité prédictif de notre à anticiper les aires susceptibles ou non aux instabilités de versants.
- En dernier lieu mis à part le temps nécessaire très long pour le traitement des données et leur intégration dans le modèle, la démarche adoptée pour l'évaluation de la SMT à échelle régionale s'est avérée aisée à mettre en œuvre. Les neufs paramètres intégrés ont été suffisant pour la production d'une carte de susceptibilité exploitable, toutefois il est souhaitable d'intégrer d'autres facteurs dès qu'ils sont disponibles afin de raffiner les résultats.
- La deuxième étape d'évaluation de la susceptibilité s'est déroulée à méso-échelle ou à échelle moyenne (1/50 000ème). Cette étape constituait la première tentative pour prédire la SMT par l'utilisation de deux approches probabilistes la théorie de l'évidence (TDE) et des régressions logistiques(RL).
 - Pour la TDE trois néo-variables prédictives ont été réalisées pour éliminer les problèmes de dépendance conditionnelle rencontrés, alors que des tests de multicolinéarité ont été effectués pour les RL pour éviter la possibilité du baisement dans le calcul des coefficients par RL.
 - Pour obtenir le meilleur résultat via les deux approches, et afin de connaître l'influence de chaque paramètre sur le modèle prédictif, nous avons réalisé plusieurs simulations avec différentes combinaisons de variables. Il s'est avéré que la meilleure d'entre elles est formée par la même combinaison pour les deux approches : il s'agit de la combinaison des trois néo-variables « réseau hydrographique – fracturation », « lithologie – gradient de pente », et « précipitations – hypsométrie » en plus des paramètres « expositions des versants et occupation des sols ».
 - La comparaison des deux approches (courbes ROC et vérité terrain) a prouvé que la méthode multivariée est plus performante pour la prédiction de la SMT dans la région de Bab Taza.
- La dernière partie de modélisation de la susceptibilité s'est déroulée à grande échelle (1/5000 ème), par zonage géomorphologique effectué directement sur le terrain et puis finalisé grâce à la vision synoptique que confère l'imagerie satellitaire THR. La carte obtenue définie trois niveaux de susceptibilité, élevée, moyenne, et nulle.

Utilité de nos resultats

Impact sur l'aménagement et l'urbanisme

La carte d'inventaire des MT, la carte de densité des MT, et les différentes cartes de susceptibilité réalisées dans le cadre de ce mémoire constituent un bon moyen de communication (sensibilisation du public) sur les zones susceptibles de mouvements ou « **sensibles** ». Elle constitue un puissant outil d'aide à la décision pour présenter, comparer et discuter des scénarios d'aménagement du territoire, d'aménagement urbains et de projets de constructions d'ouvrages et les nouveaux tracés de routes et autoroutes. Une telle démarche permettra d'atténuer les impacts socio-économiques habituellement constatés, lors de déclenchement des MT dans des zones habitées ou au niveau des routes.

Toutefois, une totale prise en compte des phénomènes de MT dans les processus d'aménagement et d'urbanisme, nécessiterait la caractérisation des zones à risque en tenant compte des enjeux et de la vulnérabilité. Le minimum de données requises pour aborder cette étape étant non-disponible lors de cette thèse, il nous a dissuadés pour l'instant de la réaliser une tentative de ce genre, notamment à grande échelle.

Impact sur la foresterie et l'érosion

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 le Rif. Ces opérations de reboisement n'ont pas seulement pour finalité, l'obtention de bois exploitable comme seul objectif, mais aussi la régénération de grandes aires de forêts qui ont été défrichées, la stabilisation des versants et la limitation de l'érosion. Le reboisement se fait en général avec le pin d'Alep, le chêne liège et l'eucalyptus, en raison de leur croissance assez rapide, en plus de leur importante capacité d'évaporation, d'assèchement et de fixation des sols instables par les racines. Dans ce sens, l'exemple d'une partie de la région de Zoumi a été reboisée par une oliveraie (en plus du figuier, chêne vert et l'eucalyptus) en banquettes a donné des résultats satisfaisants sur la stabilité des sols et des terres notamment contre les phénomènes du ravinement intense (Badlands). Notre démarche permet d'améliorer la gestion des reboisements.

Recommandations et perspectives

A l'instar des différentes méthodes et approches existantes pour la cartographie de la SMT, ce travail constitue une modeste contribution et une base de travail, imparfaite, certes, pour la compréhension de la relation entre les mouvements gravitaires et les différents facteurs environnementaux cartographiques disponibles dans le Nord – Ouest du Maroc. Elle constitue une initiative exploratoire pour l'analyse spatiale de la SMT par une approche probabiliste multi-échelles dans un environnement d'accès difficile comme le milieu montagneux maghrébin. Cette recherche, par son approche originale basée (i) sur la réduction de l'aspect subjectif dans la cartographie de la susceptibilité à petite échelle (1/100 000ème) par combinaison de cartes d'index, en introduisant des poids et des pondérations basés sur des calculs réels (ii) sur une stratégie de création de néo-variables prédictives pour l'élimination de la dépendance conditionnelle, mais aussi pour l'augmentation du pouvoir prédictif des différentes simulations. Le fusionnement des paramètres doit avoir une signification géologique ou géomorphologique effective (exemple : précipitation – hypsométrie, ou réseau

hydrographique – fracturation). Le calage et la validation des cartes par confrontation aux données réelles de terrain servent de base de données afin que le géologue garde la maîtrise du processus de cartographie. Toutefois, ces résultats sont exploratoires et nécessitent des vérifications et améliorations. Pour ce, quelques recommandations sont nécessaires :

- Procéder à la cartographie précise des MT et leurs facteurs de prédisposition sur le reste du territoire Marocain ou maghrébin, puisque c'est l'étape de base à mener avant tout projet de modélisation de la susceptibilité,
- **Effectuer des enquêtes élargies de longues durées** pour contraindre les corrélations observées entre le déclenchement des MT, les pics des précipitations et les événements sismiques. Il s'agit d'une information cruciale pour valider des modèles à base physique pour le zonage de la susceptibilité,
- Procéder régulièrement à **la réévaluation de la susceptibilité** dans notre secteur par l'utilisation de méthodes nouvelles, actuellement en gestation, ce qui est tout à fait envisageable au vu la base géologique et phénoménologique numérique créée dans le cadre de ce travail. Cela réduira considérablement le temps d'analyse, et permettra de sélectionner les meilleures méthodes et les résultats les plus proches de la réalité terrain.

Malgré les nombreux résultats acquis durant cette thèse de doctorat, plusieurs aspects, méthodologiques ou de modélisation sont à développer. Ils constituent des perspectives de recherches à engager dans un future proche. Cela concerne en particulier :

- La **vérification** de la reproductibilité de la démarche proposée sur des sites à caractéristiques environnementales comparables par la transposition des meilleures simulations obtenues dans le cadre de ce travail (itération modélisation-retour terrain). A ce moment, il serait bénéfique de créer un programme avec une interface simple qui permettra la zonation automatique de la susceptibilité sur des sites ayant plus ou moins les mêmes caractéristiques.
- La réalisation d'une sectorisation à d'autres échelles (1/ 25 000ème, 1/ 10 000ème, et 1/ 4000ème),
- Quantification des MT de grande ampleur (modélisation), évaluer les enjeux et la vulnérabilité, évaluer et pondérer les conséquences socio-économique, afin de cartographier le risque MT et pouvoir le gérer.
- Analyser la combinaison de la variable « formations superficielles et gradient de pentes », ceci afin de comparer les résultats obtenus pour les milieux montagneux maghrébins et alpins, notamment ceux obtenus par Thiery, 2007 ; et Thiery et al, 2007. Cela permettrait d'envisager d'obtenir des courbes de probabilités types pour certains milieux. Dans ce cas et pour la suite de notre travail, nous envisageons de multiplier les sites d'études et voir si dans tel ou tel milieu il y a possibilité d'obtenir les mêmes courbes pour des secteurs comparables de par leur superficies, leurs variables de contrôle et de types de MT.

Enfin, pour une bonne prévention du phénomène des MT au Maroc, il est nécessaire, voire impératif 1° de **coordonner d'abord des actions transversales entre les différents**

départements et organismes concernés (Ministères de l'Équipement, de l'Agriculture, de l'Énergie et des Mines, de l'Intérieur, des Transports ...etc). Ensuite, 2° pour valoriser ce travail, il semble important de conjuguer tous les efforts en vue de minimiser les retombées négatives de ces phénomènes de MT par le développement de **l'éducation préventive**. Il est aussi important de le prendre en considération pour réaliser une **planification adaptée de l'aménagement, une définition des règles d'urbanisme et de constructions**, et aussi, pour **l'élaboration de plans de secours**.

Références bibliographiques

A

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.

Agnesi, V., Conoscenti, C., Di Maggio, C., Iudicello, C., et Rotigliano, E. (2003) Landslide hazard analysis in the Giardo River Basin (Middle-Western Sicily). Proceedings of the Workshop on Geomorphological sensitivity and system response. Università di Camerino - Università di Modena, Camerino, Italy, pp. 3–11.

Agnesi, V., Di Maggio, C., Fiorito, S., Rotigliano, E. (2002) Analytical approach for landslide hazard assessment in El Salvador (C.A). Proceedings of the Symposium on Geomorphology: from expert opinion to modelling. CERG Editions, Strasbourg, France.

Agterberg, F-P, Bonham-Carter, G-F., 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, 19p.

Agterberg, F-P., Bonham-Carter, G-F., Wright, D-F. (1989) Weights of Evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F. (Eds.), Statistical Applications in the Earth Sciences. Geological Survey of Canada, Paper 89-9, 171–183p.

Ait 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 (Northern Morocco). Pure appl. Geophys. 161 (2004) 1081-1091, 0033-4553/04/061081-11, DOI 10.1007/s00024-003-2487-9.

Ait Brahim, L., 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. Télédétection, canada, Volume 3, n° 1, p. 33-47.

Ait Brahim, L., Chotin, P., Hinaj, S., Abdelouafi, A., El Adraoui, A., 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.

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

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

Alaoui Lamrani, A., Cheddad, D., El Haouli, M., Klikime, K. (2000) Monographie de la région de Tanger – Tétouan. Rapport de la Direction de l'Aménagement du Territoire, MATEUH. Editions, OKAD Rabat, Maroc. 58p

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

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

Andrieux, L. (1971) La structure du Rif central Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissements dans un tronçon de la chaîne alpine. *Notes & Mémoires, Science de la Géologie, Maroc*, n° 235, 155 p.

Andrieux, J., Fontboté, J.M., Mattauer, M. (1971) Sur un modèle explicatif de l'arc de Gibraltar, *Earth Planet. Sci. Lett.* 12, 191–198.

Andrieux, J., Frizon de Lamotte, D., Braud, J., A. (1989) Structural scheme for the Western Mediterranean area in Jurassic and Early Cretaceous times, *Geodinamica Acta* 3, 5–15.

Anbalagan, R. (1992) Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology* 32, 269–277p.

Ardizzone, F., Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., et Reichenbach, P. (2002) Uncertainty and errors in landslide mapping and landslide hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2:1-2 3-14p.

Asebriy L., De Luca P., Bourgois J., Chotin P. (1987) Resédimentations d'âge Senonien dans le Rif central (Maroc) : conséquences sur les divisions paléogéographiques et structurales de la chaîne. *Journ. of African Earth Sci.* , 6, 9-18p.

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

Atkinson, P.M., et Massari, R. (1998) Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. *Computers & Geosciences*, 24:4 373-385.

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

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

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

Azzouz, O., El Fellah, B., et 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, p 33-40.

Avenard, J.M. (1965) L'érosion actuelle dans le bassin de Sebou. INRA, Rabat, 114p.

B

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

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

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.

Benabid, A. (1994) Connaissance sur la végétation du Maroc: Phytogéographie, phytosociologie et séries de végétation. Lazaroa 14, 21-97.

Benabid, A. (2000) Flore et écosystèmes du Maroc: Evaluation et préservation de la biodiversité. Ibis press. Paris.

Berger, A-L., Guiot, J., Mathieu, L., et Munaut, A-V. (1979) Tree rings and climate in Morocco. Tree-Ring Bulletin, 39, 61-75p.

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

Bonham-Carter, G-F. (1994) Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon Press, Ottawa, 398 p.

Bonham-Carter, G-F., Agterberg, F-P., et Wright, D.F. (1989) Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P. and Bonham-Carter, G.F. (eds.) Statistical applications in the Earth Science, Geological Survey of Canada Paper 89-9, Ottawa, Canada, 171-183p.

Bouillin, J.P. (1986) Le "bassin maghrébin": une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes, Bull. Soc. Géol. Fr. (8) 2, 547–558.

Bourgeois, J. (1978) La transversale de Ronda, Cordillère Bétique, Espagne. Données géologiques pour un modèle d'évolution de l'Arc de Gibraltar ; Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, 30, 445p.

Bourgeois, J., Mauffret, A., Ammar, A., Demnati, N.A. (1992) Multichannel seismic data imaging of inversion tectonics of the Alboran Ridge (western Mediterranean Sea). Geo-Marine Letters 12, 117–122.

Bonnard, Ch., Coraglia B., Durville J.L. and Forlati, F. (2004) Suggestions, guidelines and perspectives of development. In: Bonnard et al. (eds.) Identification and mitigation of large landslide risks in Europe. A.A. Balkema Publishers, 289-306p.

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

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

Buaciiidse, G., et Kiknadze, Z. (1988) Hydrogeology of Mountain Karst. Proceedings of the 21st Congress of the International Association of Hydrogeologists, China, 10-15 October 1988, Publication No. 176.

Bull, W-B., et Brandon, M-T (1998) Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand, Geol. Soc. Am. Bull., 110, 60-84.

Bulut, F., Boynukalin, S., Tarhan, S. and Ataoglu, E. (2000) Reliability of landslide isopleth maps. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 58:2 95-98p.

C

Campbell, R-H. (1973) Isopleth map of landslide deposits, Point Dume Quadrangle, Los Angeles County, California; an experiment in generalizing and quantifying areal distribution of landslides. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-535, scale 1:24 000.

Can, T., Nefeslioglu, H-A., Gokceoglu, C., Sonmez, H., Duman, T-Y. (2005) Susceptibility assessments of shallow earthflows triggered by heavy rainfall at three catchments by logistic regression analyses. *Geomorphology* 72, 250–271p.

Cardinali, M., Carrara, A., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (2002) Landslide hazard map for the Upper Tiber River basin. CNR GNDCI Publication number 2116, map at 1: 100,000 scale.

Cardinali M, Reichenbach P, Guzzetti F, Ardizzone F, Antonini G, Galli M, Cacciano M, Castellani M, Salvati P. (2002) A geomorphological approach to estimate landslide hazard and risk in urban and rural areas in Umbria, central Italy. *Natural Hazards and Earth System Science* 2 (1–2), 57–72p.

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

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

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

Carrara, A. (1988) Drainage and divide networks derived from high–fidelity digital terrain models. In: Chung, C.-J. F., et al. (eds.) *Quantitative analysis of mineral and energy resources*. NATO–ASI Series, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 581–597p.

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.

Castellanos Abella, E-A., et Van Westen, C-J. (2008) Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis : a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. In: *Geomorphology : an international journal of pure and applied geomorphology*, 94 (2008)3-4 . 453–466p.

Castellanos Abella, E-A.(2008) Multi - scale landslide risk assessment in Cuba. Enschede, Utrecht, ITC, University of Utrecht, 2008. ITC Dissertation 154, ISBN: 978-90-6164-268-8.

Catenacci, V. (1992) Il dissesto geologico e geoambientale in Italia dal dopoguerra al 1990. *Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia*, Servizio Geologico Nazionale, 47: 301 p. (in Italian).

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

Chalouan, A. (1986) Les nappes ghomarides (Rif septentrional, Maroc). Un témoin varisque dans la chaîne alpine. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Strasbourg, France, 317 p.

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

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.

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.

Chau, K-T., Wong, R-H-C., Liu, J., et Lee, C-F. (2003) Rockfall Hazard Analysis for Hong

Kong Based on Rockfall Inventory. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36:5 383-408p.

Cherkaoui, T-E. (1991) Contribution à l'étude de l'aléa sismique au Maroc. Thèse de l'Université Joseph Fourier; Grenoble; 246p.

Cherkaoui, T-E. (1988) Fichier des séismes du Maroc et des régions limitrophes: 1901-1984. *Trav. Inst. Scien.; Série géol. géogr. phys.; n°17*; Rabat; 158p. plus carte h-t.

Cherkaoui, T-E. (en préparation) Fichier des séismes du Maroc et des régions limitrophes: 1985-2010, Vol. II. *Trav. Inst. Scien.; Série géol. géogr. phys.; n°XX*; Rabat.

Chung, C-J-F, et Fabbri, A-G (1999) Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65:12 1389-1399p.

Coe, J-A., Godt, J-W., et Tachker, P. (2004) Map showing recent (1997-98 El Nino) and historical landslides, Crow Creek and vicinity, Alameda and Contra Costa Counties, California. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Map, SIM-2859, 16 p., scale 1:18,000.

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, Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report, 00-303.

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

Corominas, J., et Garcia Yagüe, A. (1997) Terminología de los movimientos de ladera, IV Simposio nacional sobre taludes y laderas inestables, vol. IV, 1051-1072, Granada.

Copons, R., et Vilaplana, J-M (2008) Rockfall susceptibility zoning at a large scale: From geomorphological inventory to preliminary land use planning. *Engineering Geology* 102 (2008) 142–151p.

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

Costain, J.K., Bollinger, G.A., Speer, J.A. (1987) Hydroseismicity: a hypothesis for the role of water in the generation of intraplate seismicity. *Res. Lett.* 58-3., 41–64p.

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

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

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

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

D

Dai, F-C., et Lee, C-F. (2003) A spatiotemporal probabilistic modelling of storm-induced shallow landsliding using aerial photographs and logistic regression. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28:5 527-545p.

Dai, F-C., et Lee, C-F. (2002) Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42: 213-228p.

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 Westen, 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.

Decaulne, A. (2002) Coulées de débris et risques naturels en Islande du Nord-Ouest, *Géomorphologie*, 2, 151-164p.

Deffontaines B., Ait Brahem L., Chotin P., et Rosanov., M. (1992) Investigation of active faults in Morocco using morphometric methods and drainage pattern analysis. *Geologische Rundschau*, Vol. 1,n°81, 199-210p.

Deffontaines, B., et Chorowicz, J. (1988) Principe d'analyse des réseaux hydrographiques à partir de données multisources. Applications aux structures de bassins : Zaïre-Fossé Rhéan. Proc. Coll. Int. Néotectonique, B.R.G.M, 3-5 Oct. 1988, Orléans, 15p.

Deffontaines, B. (1990) Développement d'une méthodologie morphonéotectonique 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.

DeGraff, J-V. (1985) Using isopleth maps of landslides deposits as a tool in timber sale planning. *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 22: 445-453p.

DeGraff, J-V, et Canuti, P. (1988) Using isopleth mapping to evaluate landslide activity in relation to agricultural practices. *International Association Engineering Geology Bulletin*, 36: 61-71p.

Didon, J., Durand-Delga, M., Kornprobst, J. (1973) Homologies géologiques entre les deux rives du détroit de Gibraltar (Cordillères bétiques occidentales, Espagne). *Bull. Soc.Géol.Fr.*, (7) XV, 2, p.77-105.

Dickson, R., Lazier, J., Meincke, J., Rhines, P., Swift, J. (1996) Long-term coordinated changes in the convective activity of the North Atlantic. *Prog Oceanogr* 38:241–295.

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

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

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

Driouech, F., Déqué, M., et Sánchez-Gómez E. (2010) Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Glob Planet Change*. DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.03.004.

Driouech, F., Déqué, M., et Mokssit, A. (2009) Numerical simulation of the probability distribution function of precipitation over Morocco, *Clim. Dyn.*, 32, 1055-1063. DOI 10.1007/s00382-008-04310-6.

Droque, C., Razack, M., Daoxin, Y. (1988) Structure of karstic reservoirs according microtectonic and fissural analysis. Area of the experimental site of Yaji, Guilin, China. IAH 21st Congress, Karst hydrology and Karst environment protection, 10-15 octobre-Guilin-China, 735-740.

Dupont, S., Deinargne, L-R., Durand, Pli. (1995) Production de MNT à partir de données SAR RADARSAT. Rapport Final. Programme AvalSAR. CNES. Toulouse.

Durand-Delga, M., et Mattauer, G. (1960) Sur l'origine ultra-rifaine de certaines nappes du Rif septentrional. *Comptes Rendus de la Société Géologique Française*, n° 2, p. 22-23.

Durand-Delga, M. (1963) Essai sur la structure des domaines émergés autour de la Méditerranée occidentale. *Geol. Rundsch.*, Stuttgart, n° 53, p. 534-535.

Durand-Delga, M. (1972) La courbure de Gibraltar; extrémité occidentale des chaînes alpines, unit l'Europe et l'Afrique. *Eclogae Geol. Helv.*, n° 2, Vol. 65, p. 267-278.

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

Durand-Delga, M. et Olivier, P. (1988) Evolution of the Alboran block margin from early mesozoic to early miocène time. In: "Lecture Notes in Earth Sciences", n° 15: the Atlas System of Morocco. Volker H. Jacobshagen (éd.), Springer verlag, p. 465-480.

Durville, J-L., Seve, G. (1996) Stabilité des pentes : Glissements en terrain meubles. Techniques de l'ingénieur, 54p.

E

El Adraoui, A. (2007) Apport de l'image optique à l'analyse de déformation de la dorsale calcaire s.l. du Trias à l'Actuel (Rif Septentrional, Maroc). Modélisation 3D et évolution géodynamique dans le cadre de la Méditerranée occidentale. Thèse de doctorat d'état, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. 157p.

El Gharbaoui, A. (1981) 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 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 Kharim, Y. (2002) Etude des mouvements de versants dans ta région de Tétouan (Rif occidental) : Inventaire, analyse et cartographie. Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan. Maroc, 250 p.

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 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 Mrabet, A-T. (1991) Histoire sismologique du Maroc. Thèse 3ème cycle, Faculté des Lettres, Université Mohammed V, Rabat, 375p. (en arabe).

Evans, S-G. (1997) Fatal landslides and landslide risk in Canada. In: Cruden, D.M. and Fell, R.(eds.) *Landslide risk assessment*, A.A. Balkema Publisher, Rotterdam, 185-196p.

F

Fadil, A., Vernant, P., McClusky, S., Reilinger, R., Gomez, F., Ben Sari, D., Mourabit, T., Feigl, K., Barazangi, M. (2006) Active tectonics of the western Mediterranean : Geodetic evidence for roll back of a delaminated subcontinental lithospheric slab beneath the Rif mountains (Morocco). *Geology* 34 (7), 529–532.

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.

Fell, R. (1994) Landslide risk assessment and acceptable risk. *Canadian Geotechnical Journal*, 31:2 261-272p.

Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S. et Leroi, E. (2005) A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R. and Eberhardt, E. (eds.) *Landslide Risk Management*. A.A. Balkema Publishers, 3-25.

Fernandez-Ibanez F., Soto J.I., Zoback M.D., Morales, J.(2007) Present-day stress field in the Gibraltar Arc (western Mediterranean), *J. Geophys. Res.* 112 (2007) B08404, doi:10.1029/2006JB004683.

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

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

Flageollet, J-C., Maquaire, O., Martin, B., et Weber, D. (1999) Landslides and climatic conditions in the barcelonnette and vars basins (southern French alps, France). *Geomorphology*, elsevier, n°30, 65-78p.

Freytet P. (1988) Quelques réflexions à propos du relief limousin, *Norois*, 35, 201-221.

Freytet P., Morel J.-L. (1987), Réhabilitation de la morphométrie en tant que méthode d'étude des surfaces d'aplanissement, *Revue de géomorphologie dynamique*, 31 ; 3, 77-78.

G

Gallousi, C., Koukouvelas, I. K. (2007) Quantifying geomorphic evolution of earthquake-triggered landslides and their relation to active normal faults. An example from the Gulf of Corinth, Greece, *Tectonophysics*, Volume 440, Issues 1-4, 1 August 2007, Pages 85-104, doi:10.1016/j.tecto.2007.02.009.

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

Garcia-Rodriguez, M-J., Malpica, J- A., Benito, B., et Diaz, M.(2008) Susceptibility assessment of earthquake-triggered landslides in El Salvador using logistic regression, *Geomorphology*, 95, 172– 91, 2008.

Ghosh, S., Carranza, E-J-M., Van Westen, C.J., Jetten, V.G., et Bhattacharya, D-N. (2011) Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas, India. In: *Geomorphology : an international journal of pure and applied geomorphology*, 131 (2011)1-2 pp. 35-56p.

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

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

- Glade, T. (1998)** Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand. *Environmental Geology*, 35:2-3 160-174p.
- Godefroy, P. et Humbert, M. (1983)** La cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain et aux séismes. *Hydrogéologie et Géologie de l'Ingénieur*, 2: 69-90p.
- Gorsevski, P.V., Gessler, P.E., et Jankowski, P. (2003)** Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *Journal of Geographical Systems* 5, 223–251.
- Greco, R., Sorriso-Valvo, M., et Catalano, E. (2007)** Logistic regression analysis in the evaluation of mass movements susceptibility: The Aspromonte case study, Calabria, Italy. *Engineering Geology* 89(1-2), 47-66p.
- Griffiths, J.S. (1999)** Proving the occurrence and cause of a landslide in a legal context. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 75-85.
- Grillot, J.C., C. Almeida (1982)** Tectonique cassante posthercynienne dans l'Algarve (Sud du Portugal). Incidence sur l'hydrogéologie karstique *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, vol. 23(2), 119-130p.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., et Stark, C.P. (2007)** Rainfall thresholds for the initiation of landslides. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. 98, 239-267p.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., Ardizzone, F. (2005)** Landslide hazard assessment in the Staffora basin, northern Italian Apennines. *Geomorphology* 72, 272–299p.
- Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P. and Carrara, A. (2000)** Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. *Environmental Management*, 25:3, 247-363p.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., et Reichenbach, P. (1999)** Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216p.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1999)** Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. *Geomorphology*, 31: 181-216p.
- Guzzetti, F., Cardinali, M. and Reichenbach, P. (1994)** The AVI Project: a bibliographical and archive inventory of landslides and floods in Italy. *Environmental Management*, 18:4 623-633p.
- Guzzetti, F. and Reichenbach, P. (1994)** Toward the definition of topographic divisions of Italy. *Geomorphology*, 11: 57-74p.

H

- Hansen, A., Franks, C-A-M., Kirk, P-A., Brimicombe, A-J., et Tung, F. (1995)** Application of

GIS to hazard assessment, with particular reference to landslides in Hong Kong. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.

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

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

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

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

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., et Lemeshow, S. (2000) *Applied Logistic Regression*. New-York: John Wiley and Sons (2nd ed.). ISBN: 978-0-471-35632-5, Hardcover, 392p.

Hovius, N., Stark, C-P., Hao-Tsu, C., et Jinn-Chuan, L. (2000) Supply and removal of sediment in a landslide-dominated mountain belt: Central Range, Taiwan. *Journal of Geology*, 108: 73-89.

Humbert, M. (1977) *La Cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des cartes des zones exposées.*

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.

Huang, L-Sh., McRaney, J., Teng, T-L., Prebish, M. (1979) A preliminary study on the relationship between precipitation and large earthquakes in Southern California. *Pure Appl. Geophys.* 117, 1286–1300p.

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

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

I

Innes, J-L. (1983) Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Higlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8: 579-588.

J

K

Kafri, U., Shapira, A. (1990) A correlation between earthquake occurrence, rainfall and water level in Lake Kinnereth, Israel. *Phys. Earth. Planet. Int.* 62, 277–283.

Keefer, D-K. (2002) Investigating Landslides Caused by Earthquakes – A Historical Review. *Surveys in Geophysics*, 23: 473-510p.

Keefer, D-K. (1984) Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 95: 406-421p.

Kienholz, H., Hafner, H., Schneider, G., et Tamrakar, R. (1983) Mountain hazards mapping in Nepal's Middle Mountains. Maps of land use and geomorphic damages (Kathmandu-Kakani area). *Mountain Research and Development*, 3:3 195-220p.

Kleinbaum, D-G., Klein, M. (2002) Logistic Regression. A Self-Learning Text. Berlin-New-York: Springer Verlag (2nd ed.).

L

Lamb, P-J., et Pepler, R-A. (1987) North Atlantic Oscillation: concept and application. *Bull.Am. Met. Soc.* 68, 1218–1225p.

Lamb, P-J., El Hamly, M., et Portis, D-H. (1997) North-Atlantic Oscillation. *Geo Observateur* 7, 103–113p.

Lan, H-X., Lee, C-F., Zhou, C-H., et Martin, C-D. (2005) Dynamic characteristics analysis of shallow landslides in response to rainfall event using GIS. *Environmental Geology*, 47: 254-267.

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

Lautridou, J.P. (1984) Le cycle périglaciaire pleistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie. Thèse d'Etat, Caen, 2 t., 907 p.

Le Blanc, D., et Olivier, Ph. (1983) Role of strike-slip faults in the betic-rifian orogeny. *Tectonophysics*, 101: 345-355p.

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

Lee, E-M., et Jones, D-K-C (2004) Landslide Risk Assessment. Thomas Telford, London. 454 p.

Lee, S., et Talib, J-A (2005) Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47:7 982-990p.

- Lee, S., Ryu, J-H., Won, J-S., et Park, H-J. (2004)** Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Engineering Geology*, 71:3-4 289-302p.
- Lee, S., Oh, H-J, Dong, K-K. (2010)** Statistical Spatial Modeling of Ground Subsidence Hazard near an Abandoned Underground Coal Mine *Disaster Advances*, 3, 11-23p.
- Lee, S., Choi, J. and Min, K. (2002)** Landslide susceptibility analysis and verification using the Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43:1-2 120-131p.
- Lee, S., Chwae, U. and Min, K. (2002)** Landslide susceptibility mapping by correlation between topography and geological structure: the Janghung area, Korea. *Geomorphology*, 46:3-4 149-162p.
- Lee, S., et Min, K. (2002)** Landslide susceptibility analysis and verification using a Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43: 120-131p.
- Lee, S., et Min, K. (2001)** Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40: 1095-1113p.
- Le Gall B., Piqué, A., Rehault, J-P., Specht, M., et Malod, J. (1997)** Structure et mise en place d'une ride océanique dans un contexte de limite de plaques convergentes : le banc de Gorrige (SW Ibérie). *C.R. Acad. Scien. Paris*, t. 325, Sér. II(11), 853-860p.
- Le Mignon, G (2004)** Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Applications à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France). Doctorat Géologie de l'Ingénieur, Paristech, ENPC, 261p.
- Le Mignon, G., Cojean, R. (2002)** Rôle de l'eau dans la mobilisation de glissements-coulées (Barcelonnette - France). In: Rybár, J., Stemberk, J., Wagner, P. (Eds.): *Proceedings of the 1st European Conference on Landslides*, Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 239-245p.
- Leroi, E. (1996)** Landslides hazard – risk maps at different scales: objectives, tools and developments. *Landslides Senneset*, pp35-51.
- Lespinasse, P. (1975)** Géologie des zones externes et des flyschs entre Chaouène et Zoumi (centre de la chaîne rifaine, Maroc). Thèse de Doctorat d'État, Université de Toulouse I, 248 p.
- Letavernier, G., et Ozouf J-C. (1987)** La gélifraction des roches et des parois calcaires. *Bulletin de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, 31, 139-145.
- Liritzis, Y., et Petropoulos, B. (1992)** A preliminary study of the relationship between large earthquakes and Precipitation for the region of Athens, Greece. *Earth, Moon and Planets*, 57, 13-21p.
- 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.

Liu, J-G., Mason, P-J., Clerici, N., Chen, S., Davis, A., Miao, F., Deng, H., et Liang, L. (2004) Landslide hazard assessment in the Three Gorges area of the Yangtze river using ASTER imagery: Zigui–Badong. *Geomorphology*, 61:1-2 171-187p.

M

Malamud, B-D., Turcotte, D-L., Guzzetti, F., et Reichenbach, P. (2004) Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29:6 687-711p.

Malet, J-P., Thiery, T., Maquaire, O., et Puissant, A. (2006) Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque « glissement de terrain ». *Revue Internationale de Géomatique*. Volume spécial – n° X/2006, pages 1 à X

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

Maquaire, O., Thiery, T., Malet, J-P., et Puissant, A. (2006) Evaluation et cartographie par SIG du risque 'glissement de terrain'. Application aux Alpes du Sud. *Interactions nature – société – analyse et modèles*. UMR CNRS 6556 LETG, La Baule 2006, 1-5p.

Maquaire, O. (2002) Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain): processus, fonctionnement, cartographie. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219 p. + 1 volume d'annexes.

Mansour, M. (1998) Geodynamic processes and cartography of ground movements in the area of Chefchaouen (District of Bouhalla-Amtrass). Application to the stabilization of main road Nb: 39. Western Rif, Morocco. Thèse nouveau doctorat .Université de Paris 07. 192 p.

Mansour, M. et 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*, 2005, Vol. 5, n°1-2-3, p 95-103.

Margaa, Kh. (1994) Essai de cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de la région d'Al Hoceima (Rif Nord-Maroc). Thèse Doctorat. Université de Franche-Comté, 196 pp.

Mastere, M., Aït Brahim, L., Elfahchouch, N., Guelzim, E., Mansour, M. (2011) Spatiotemporal analysis of landslides using digital photogrammetry and DEM (Teledetection review, in press).

Mastere, M., Ait Brahim, L., Van Vliet Lanoe, B., Elfahchouch, N., Guelzim, E., Jirari, H., et Abdelouafi, A. (2010) Utilization of Digital Photogrammetry in spatiotemporal knowledge of Landslides. *GeoCanada 2010 – Working with the Earth*. Alberta, Canada.
(www.geocanada2010.ca/uploads/abstracts_new/view.php?item_id=180)

Mastere, M., Thiery, Y., Ait Brahim, L., Van Vliet Lanoë, B. (2010) Landslide Susceptibility Mapping Using Weights of Evidence Approach and Gis Analysis. Actes de la 23 èmes Réunion des Sciences de la Terre (RST) Boreaux, France. 456, 199-200.

Mastere, M., Ait Brahim, L., Guelzim, E., Elfahchouch, N., Mansour, M., et Abdelouafi, A. (2009) Actes des 12èmes Journées d'Animation Scientifique (JAS09) de l'Agence Universitaire de la Francophonie à Alger Novembre 2009-Synergie de la photogrammétrie numérique et du MNT à l'étude Spatiotemporelle des mouvements de terrain : Application à la coulée de pierres d'Amtrass, Maroc Nord Occidental.41-47pp.

Mastere, M. (2008) Intégration des données multi-source dans un SIG pour la cartographie de l'aléa lie aux mouvements de terrain au niveau de l'accident de Jebha (province de Chefchaouen). Impact sur l'aménagement, et l'urbanisme. The framework of Hubert Curien Volubilis 17174 PK program and integrated action MA/08/192.

Martin, Y., Rood, K., Schwab, J.W., et Church, M. (2002) Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. Canadian Journal of Earth Sciences, 39:2 189-205p.

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

Marzorati, S., Luzi, L., et De Amicis, M. (2002) Rock falls induced by earthquakes: a statistical approach. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, 565-577p.

Maurer, G. (1968) Les montagnes du Rif central. Etude géomorphologique. Thèse lettres, université Paris 7, 499p.

Mark, R-K., et Ellen, S-D. (1995) Statistical and simulation models for mapping debris-flow hazard. In: Carrara, A. and Guzzetti, F. (eds.) Geographical Information Systems in assessing Natural Hazards, Kluwer Publishing co., Dordrecht, The Netherlands, 93-106p.

Mckenzie, D. (1973) Active tectonic of the Mediterranean region. Geophysics, J.R.Astr.Soc.; 30, 109-185p.

Meilliez, F., et Van Vliet Lanoë, B (2008) Formations superficielles anthropiques, 373-384p, In: Dewolf et Bourrié (Eds): Les formations superficielles, Genèse – Typologie – Classification, Payasages et Environnements – Ressources et Risques, ISBN 978-2-7298-3556-9, Ellipses Edition Marketing S.A., 2008.

Melchiorre, C., CastellanosAbella, E.A., VanWesten, C.J., et Matteucci, M. (2011) Evaluation of prediction capability, robustness, and sensitivity in non-linear landslide susceptibility models, Guantanamo, Cuba. Computers & Geosciences 37 (2011) 410–425p.

Menrad, S. (1995) Applied logistic regression analysis. In: Quantitative applications in the social sciences, No. 106. London: Sage Publications.

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

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

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

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

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

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

Miller, C.L. et Laflamme, R.A. (1958): *The Digital Terrain Model-Theory & Application*. MIT Photogrammetry Laboratory.

Moeyersons, J., Van Den Eeckhaut, M., Nyssen, J., Gebreyohannes, Tesfamichael, Van de Wauw, J., Hofmeister, J., Poesen, J., Deckers, J., Haile, M. (2008) Mass movement mapping for geomorphological understanding and sustainable development. *Tigray, Ethiopia. Catena*. 75, 45–54p.

Montgomery, D-R., Wright, R-H., et Booth, T. (1991) Debris flow hazard mitigation for colluvium-filled swales. *Bulletin Association of Engineering Geologists*, 28:3 303-323p.

Moreiras, S-M. (2005) Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza valley, Argentina. *Geomorphology*, 66:1-4 345-357p.

Moreiras, S-M. (2004) Landslide incidence zonation in the Rio Mendoza valley, Mendoza Province, Argentina. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 255-266p.

Morel J.C. (1989) Etats de contrainte et cinématique de la chaîne rifaine (Maroc) du Tortonien à l'actuel, *Geodinamica Acta* 3, 283–294p.

Muço, B. (1999) Statistical investigation on possible seasonality of seismic activity and rainfall induced earthquakes in Balkan area. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 114 (3):119–127p.

Muço, B. (1995) The seasonality of Albanian earthquakes and the cross-correlation with rainfall. *Phys. Earth. Planet. Int.* 88, 285–291p.

N

Nagarajan, R., Roy, A., Vinod Kumar, R., Mukherjee, A., Khire, M-V. (2000) Landslide hazard susceptibility mapping based on terrain and climatic factors for tropical monsoon regions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 275–287p.

Najjari, A. et Taoussi, L. (1987) Les glissements de terrain dans le Nord du Maroc. Rapport de fin d'études, Ecole Hassania des ingénieurs, Casablanca, 163p.

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

Neeley, M-K., et Rice, R.M. (1990) Estimating risk of debris slides after timber harvest in northwestern California. *Bulletin American Association of Engineering Geologists*, 27:3 281-289p.

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

Nefeslioglu, H-A., Gokceoglu, C., et Sonmez, H. (2008) An assessment on the use of logistic regression and artificial neural networks with different sampling strategies for the preparation of landslide susceptibility maps. *Engineering Geology*, Vol. 97, 171-171p.

Neuhäuser, B., et Terhorst, B. (2007) Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1-2), 12-24p.

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

Nilsen, T-H., et Brabb, E-E. (1977) Slope stability studies in the San Francisco Bay region, California. *Geological Society of America, Reviews in Engineering Geology*, 3: 235-243p.

Nold, A., Uttinger, J., et Wildi, W. (1981) Géologie de la Dorsale calcaire entre Tétouan et Assifan (Rif interne, Maroc) Notes et mémoires du service géologique, Maroc, 300, 233p.

Nossin, J-J. (1989) Aerospace survey of natural hazards. *ITC Journal*, 3-4: 183-188p.

O

Ohlmacher, G-C., Davis, J-C (2003) Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas, USA. *Engineering Geology*, 69:3-4 331-343p.

Olivier, Ph. (1981-1982) L'accident de Jebha-Chrafate (Rif, Maroc), *Rev. Géol. dynam. Géogr. phys.*, 23: 97-106.

Office of the United Nations Disaster Relief coOrdinator (1979) Natural disasters and vulnerability analysis, report of expert group meeting.

P

- Pachauri, A-K., et Pant, M. (1992)** Landslide hazard mapping based on geological attributes. *Engineering Geology*, 32: 81-100p.
- Pachauri, A-K., Gupta, P-V., et Chander, R. (1998)** Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environmental Geology*, 36:3-4 325-334p.
- Peláez, J-A., Chourak, M., Tadili, B., Aït Brahim, L., Hamdache, M., López Casado, C., et J. Martínez Solares, M. (2007)** A catalog of main Moroccan earthquakes from 1045 to 2005. *Seismological Research Letters* 78, 614–621p.
- Pradhan, B. (2010)** “Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches”. *J.Indian Soc. Remote Sens.*, 38: 301-320p.
- Pradhan, B. Oh, H., et Buchroithner, M. (2010)** “Weights-of-evidence model applied to landslide susceptibility mapping in a tropical hilly area”. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 1(3), 199- 223p.
- Pradhan, B., et Lee, S. (2010)** Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modeling, *Environmental Modelling & Software* 25, 747-759p.
- Parise, M., et Jibson, R-W. (2000)** A seismic landslide susceptibility rating of geologic units based on analysis of characteristics of landslides triggered by the 17 January, 1994 Northridge, California earthquake, *Engineering Geology*, 58: 251-270p.
- Pavel, M., Nelson, J-D., et Fannin, J-F. (2011)** An analysis of landslide susceptibility zonation using a subjective geomorphic mapping and existing landslides. *Computer and Geosciences*, Volume 37 issue4, 554-566p.
- Poli, S., Sterlacchini, S. (2007)** Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Nat. Resour. Res.* 16, 121–134p.
- Pomeroy, J.S. (1978)** Isopleth maps of landslide deposits, Washington county, Pennsylvania a guide to comparative slope stability. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Investigation Map, MF-1010.
- Pomeroy, J.S. (1978)** Map showing landslides and area susceptible to sliding in Beaver County, Pennsylvania. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Investigation Map, MF-1160, scale 1:50,000.
- Portis, D-H., Walsh, J-E., El Hamly, M., Lamb, P.J. (2001)** Seasonality of the North Atlantic Oscillation. *J Climate* 14, 2069–2078p.

Q

R

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

Ramdani, M. (1991) Etude sismotectonique du Nord du Maroc, Thèse, Université Mohammed I, Faculté des Sciences d'Oujda, 250 p.

Rampnoux, J.P., Angelier, J., Colleta, B., Fudral, S., Guillemin, M., Pierre, G. (1979) Sur L'évolution Néotectonique du Maroc Septentrional. Géologie Méditerranéenne 6, 439–464.

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

Reichenbach, P., Galli, M., Cardinali, M., Guzzetti, F., et Ardizzone, F. (2005) Geomorphologic mapping to assess landslide risk: concepts, methods and applications in the Umbria Region of central Italy. In: Glade, T., Anderson, M.G. and Crozier, M.J. (eds.) Landslide risk assessment. John Wiley, 429-468p.

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

S

Sarkar, S., Kanungo, D-P, et Mehrotra, G-S. (1995) Landslide hazard zoning: a case study in Garhwal Himalaya, India. Mountain Research and Development, 15:4 301-309p.

Saha, A-K., Gupta, R-P., et Arora, K-M. (2002) GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) Valley, Himalayas. International Journal of Remote Sensing, 23: 357-369p.

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

Sawatzky, D., Raines, G., et Bonham-Carter, G. (2010) Spatial Data Modeller (Read me), 19p.

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

Service géologique du Maroc (1975) Carte géologique de Bab-Taza à 1/50 000. Notes et mémoires, n° 288.

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

Shouyue, Z., Kuide, X., Chuanmao, J. (1988) Research on hydrogeology in karst regions of China. Proceedings of the 21st Congress of the International Association of Hydrogeologists Guillard, China, 10-15 October 1988, IAI-IS Publication No 176.

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

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

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

Spiegelhalter, D., et Kill-Jones R.P. (1984) Statistical and knowledge approaches to clinical decision support systems, with an application in gastroenterology », *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 147, n° 1, 1984, 35-77p.

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

Steyn, D. (1976) Computation of azimuths, slope angles and surface normals over a given topography. *The South African Journal*, vol. 58, no 2.

Suter, G.(1980a) Carte géologique de la chaîne rifaine au 1/500 000. Notes et Mém. Ser. géol. Maroc, n°245a.

Suter, G. (1980b) Carte structurale de la chaîne rifaine au 1/500 000. Notes et Mém. Ser. géol. Maroc, n°245b.

Süzen, M.-L., et Doyuran, V. (2004) A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental Geology*, 45:5 665-679p.

Süzen, M.-L., et Doyuran, V. (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: a method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. *Engineering Geology*, 71:3-4 303-321p.

Swets, J. (1988) Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science* 240, 1285-1293p.

Sykes, L.-R. (1978) Intra-plate seismicity, reactivation of pre-existing zones of weakness, alkaline magnetism, and other tectonics post-dating continental separation, *Rev. Geophys. Space Phys.*, 16, 621-688p.

Sykes, L-R (1978) Plate tectonic framework of Middle America and Caribbean regions and prospects for earthquake prediction, International Symposium on the February 4th, 1976 Guatemalan Earthquake and Reconstruction Process, Proceedings, vol. 2, 11p.

T

Tahayt, A., (2008) Apport des mesures de la géodésie spatiale dans l'étude des déformations tectoniques actuelles dans la Méditerranée occidentale. Thèse de l'Université de Toulouse III (Paul Sabatier), 231p.

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.

Tapponnier, P. (1977) Evolution tectonique du système alpin en Méditerranée: poinçonnement et écrasement rigide-plastique. Bulletin de la Société Géologique de France 19, 437–460p.

Terray, L., Demory, M-E., Déqué, M., De Coetlogon, G., Maisonnave, E. (2004) Simulation of late-twenty-first-century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. J Climate 17, 4630–4635p.

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

Thierry, Y., Malet, J-P., Sterlacchini, S., Puissant, A., et 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, 227–245p.

Till C, Guiot J (1990) Reconstruction of precipitation in Morocco since A.D. 1100 based on Cedrus Atlantica tree-ring width. Quaternary Research 33:337–351p.

Till, C. (1987) Caractéristiques des chronologies de Cernes définies sur le cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica (Endl.) Carrière) au Maroc pour étudier l'évolution des Forêts et du climat. Estratto da Dendrochronologia, 5, 143-181p.

Trouet, V. Esper, J., Graham, N-E., Baker, A., Scourse, J-D., et Frank, D-C. (2009) Persistent Positive North Atlantic Oscillation Mode Dominated the Medieval Climate Anomaly. Science Vol. 324, No. 5923, 78-80p.

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.

V

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

Van Steijn, H. (1999) Frequency of hillslope debris flows in the Bachelard valley (French Alps). In: M. Panizza, M. Soldati, M. Bertacchini, Th.W.J. van Asch & S. Malmusi (Eds.): *The Erasmus 96-97 Programme in Geomorphology: Intensive Course in the French Alps and Students' Mobility*, University of Modena & Region Emilia, Modena, pp. 15-24.

Van Steijn, H. (1996) Debris flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. *Geomorphology*, 15: 259-273.

Van Steijn, H. (1988) Etudes de "debris flow" à partir de quelques exemples pris dans les Alpes françaises. *Travaux de l'Institut de Géographie de Reims*, 69, 70, 71, 72, pp. 55-67

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

Van Vliet-Lanoë, B. (1995) Cryosols, in AFES Référentiel pédologique 1995. INRA, Paris, 131 – 142p.

Van Vliet-Lanoë, B., Seppälä, M., et Kaykho J. (1993) Dune dynamics and cryoturbations features controlled by Holocene water level change. *Hietatievat, Finish Lapland. Géologie en Mijnbouw*, 72, 2 1 1 -224p.

Van Vliet-Lanoë, B. (1987) Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest. *Processus et héritages. Thèse d'État Paris I. Éditée Caen* (1988). 854 p.

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

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

Van Westen, C-J., Soeters, R., et Sijmons., K. (2000) Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpago area, Italy. *International Journal of Aplied Earth Observation and Geoinformation* 2 (1), 51–59p.

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

Van Westen, C-J et Terlien, M-T-J.(1996) An aproach towards deterministic landslide hazard analysis in GIS. A case study from Manizales (Colombia). *Earth Surface Processes and Landforms* 21, 853–868p.

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

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

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

Verstappen, H-T. (1983) Applied geomorphology: Geomorphological survey for environmental development. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam.

Voogd, H. (1983) Multi-criteria evaluation for urban and regional planning. Pion, London. 367p.

W

Wachal, D-J., et Hudak, P-F. (2000) Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. *GeoJournal*, vol. 51, p. 245-253p.

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

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

Wildi, W., Nold, M., Uttinger, J. (1977) La dorsale calcaire entre Tétouan et Assifane (Rif interne, Maroc). *Ecl.Geol.Helv*, 70, 2. P371-415.

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

Wilson, J-P., et J-C. Gallant (2000) Secondary Topographic Attributes. *Terrain Analysis: Principles and Applications*. J. P. Wilson, Gallant, J. C. New York, John Wiley and Sons: 87-131.

Wright, R-H., et Nilsen, T-H. (1974) Isopleth map of landslide deposits, southern San Francisco Bay Region, California. U.S. Geological Survey Miscellaneous Field Studies Map MF-550, scale 1:250,000.

Wright, R-H., Campbell, R-H., et Nilsen, T-H. (1974) Preparation and use of isopleth maps of landslide deposits. *Geology*, 2: 483-485p.

X

Y

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

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

Yilmaz, I. (2009) Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey), *Comput. Geosci.*, 35(6): 1125-1138p.

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

Z

Zahiri, H., Palamara, DR., Flentje, P., Brassington, GM., Baafi, E. (2006) A GIS-based weights-of-evidence model for mapping cliff instabilities associated with mine subsidence. *Environ Geol* 51:377–386p.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 : Pourcentages des dégâts causés par les mouvements de terrain dans le Rif.....	25
Figure I-2 : Exemples des méthodes possibles pour le calcul du risque mouvements de terrain spécifique à une habitation et aux habitants qui peuvent s'y trouver	29
Figure I-3 : Cadre théorique de l'évaluation, et de la gestion du risque pour les MT.....	30
Figure I-4 : Etapes pour une cartographie d'inventaire sous SIG.....	37
Figure I-5 : Exemple de cartographie de la susceptibilité sous SIG par l'utilisation d'une approche quantitativement indexée	37
Figure I-6 : Classification des approches de zonage de la susceptibilité (et/ou de l'aléa) adaptées en fonction de l'échelle du travail et du nombre de données nécessaires.	41

Chapitre II

Figure II-1 : A : Carte des 16 subdivisions régionales du Maroc avec les 3 régions formant le Maroc Nord – Occidental ; B : Zoom sur les trois régions du Maroc Nord – Occidental ; C : Couverture topographique du secteur d'étude.	47
Figure II-2 : Carte orographique du Rif nord – occidental.....	48
Figure II-3 : Carte schématique de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale	49
Figure II-4 : Carte schématique de la chaîne Rifaine, avec la localisation du secteur d'étude	49
Figure II-5 : A : Schéma montrant les subdivisions du Rif interne ; B : Logs stratigraphiques des terrains sébétides ; C : coupe géologique montrant les relations structurales entre les différentes subdivisions du Rif interne ; D : colonnes lithostratigraphiques des unités Ghomarides ; E et F : colonnes lithostratigraphiques des unités de la Chaîne calcaire interne et intermédiaire.....	52
Figure II-6 : A : Coupe géologique du domaine externe ; B : Coupe géologique du domaine externe.....	54
Figure II-7 : Coupe tectonique de la chaîne Rifaine	55
Figure II-8 : Etats de contraintes dans la chaîne Rifaine depuis le Trias supérieur à l'actuel	56
Figure II-9 : Champ de vitesses GPS par rapport à l'Eurasie.....	57

Chapitre III

Figure III-1 : Vue perspective (tridimensionnelle, X Y Z) d'un MNT raster	64
Figure III-2 : Canevas des scènes ASTER GDEM utilisées.....	65
Figure III-3 : Modèle Numérique de terrain de la province de Chefchaouen obtenu à partir des données Radar ASTER GDEM.	66
Figure III-4 : Deux types de MNT avec des résolutions différentes	67
Figure III-5 : MNT (ASTER GDEM) avant (A) et après estompage (B)	67
Figure III-6 : Série d'estompages effectuée sur le MNT (ASTER GDEM) de la province de Chefchaouen.....	68
Figure III-7 : grandes anomalies morphostructurales (alignements) extraites manuellement à partir du Modèle Numérique de Terrain.....	69
Figure III-8 : Principales anomalies de drainages.	71
Figure III-9 : illustration de la démarche menée sous le programme SAGA pour les calculs hydrographiques à partir du MNT.....	73
Figure III-10 : Carte du RH de la province de Chefchaouen obtenue sous SAGA et ArcGis 10.	74
Figure III-11 : Carte des alignements de la province de Chefchaouen extraits du RH.	75

Chapitre IV

Figure IV-1 : Répartition des phénomènes hydrogravitaires et domaines de comportement	81
Figure IV-2 : exemple d'écroulements de la Dorsale Calcaire bordant longéant l'Est de la commune urbaine de Chefchaouen	83
Figure IV-3 : exemples de glissements de terrain repérés sur l'imagerie satellitaire THR Spot5.	85
Figure IV-4 : exemples de glissements par sapement de rivière	86
Figure IV-5 : Morphologie d'une coulée boueuse. A : Escarpement ; B et F : Zones de ruptures ; C : Chenal d'érosion ; D : Digue ; E : Zone d'accumulation. D'après Corominas et al., 1996 ; adaptée.....	87
Figure IV-6 : exemples de coulées boueuses repérées sur l'imagerie satellitaire THR Spot5.....	87
Figure IV-7 : Tableau récapitulative des différents types de mouvements de terrain.....	88
Figure IV-8 : Données utilisées pour l'inventaire des mouvements de terrain avec le positionnement du même exemple "le debris flow" d'Amtrass sur	91
Figure IV-9 : Cartes d'inventaire des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen par PIAO des images THR (Spot5).....	93
Figure IV-10 : Comparaison de trois cartes d'inventaire de mouvements de terrain pour une partie de notre secteur d'étude.....	94
Figure IV-11 : Contexte géologique des localités d'Amtrass et Bou Halla.....	96
Figure IV-12 : coupe schématique de la coulée de débris d'Amtrass.	97
Figure IV-13 : La coulée de pierre d'Amtrass dans son contexte géologicomorphologique.....	97
Figure IV-14 : Plan montrant l'état actuel des coulées de débris du Versant d'Amtrass établi à partir de l'image satellitaire haute résolution de Spot5.	98
Figure IV-15 : Schéma interprétatif de la coulée de débris d'Amtrass en relation avec la faille majeur de Jebha ; et la rosace issue de l'analyse statistique des directions des failles en longueur cumulée pour le secteur d'Amtrass – Bou Halla.	99
Figure IV-16 : A : Photo montrant la production du matériel ; B : Zone de fluage de l'accumulation de gélifracsts et matériel fin alimentée par les éboulis.....	100
Figure IV-17 : Schéma montrant l'évolution du versant d'Amtrass entre 1965 et 1995	101
Figure IV-18 : A : Vue d'ensemble du versant du Jbel Akroud montrant le comportement en coulée de débris (bourrelet latéral) ; B : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1995	102
Figure IV-19 : A : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1961 ; B : Vue d'ensemble de la coulée de débris en 1976 ; F : Vue d'ensemble du versant du Jbel Akroud montrant le comportement en coulée de débris ; C : couloir de la coulée de débris (activité probable 1970 – 1978) et qui est actuellement végétalisé.....	102
Figure IV-20 : A : Vue générale de la route nationale N°2 affectée par le glissement de Bou Halla, avec la route actuelle (1), et l'ancienne route détruite et déplacée par le glissement de Bou Halla sachant que la 2 avait comme ancienne position la 1 ; B : Détaille de la route détruite par une des phases du glissement ; C : Panneau signalétique déplacé avec la section de la route d'environ 20m lors de la réactivation du glissement en hiver (2010) ; D : Mur de soutènement disloqué par la poussée continue du glissement de Bou Halla.	104
Figure IV-21 : Coupe géologique schématique du versant de Bou Halla : R : Position de la route sur le versant ; S : Source d'eau ; 1 : Escarpement principal ; 2, 3 : Escarpements secondaires ; 4 : Contact chevauchant ; 5 : Surface de discordance.....	105
Figure IV-22 : A : Photo montrant les carrières exploitant les formations de grèzes à l'aplomb du glissement de Bou Halla ; B : Ecoulement de l'eau de la résurgence qui se fait parallèlement à la	

<p> pente du versant ; C : Ecoulement de l'eau de source canalisé artificiellement ; D : Photo montrant les formations des grèzes litées..... </p>	106
<p> Figure IV-23 : A : Processus d'érosion et d'écoulement de surface dans la partie amont du versant de Bou Halla ; B : Processus d'infiltration, d'écoulement et d'érosion en surface et de lubrification dans la partie aval du versant de Bou Halla..... </p>	107
<p> Figure IV-24 : A : Photosatellite haute résolution du versant de Chrafate ; B : Vue d'ensemble du côté Ouest du Jbel Chrafate, où on arrive à distinguer l'escarpement majeur de ce massif ; C : Partie Est du massif faisant face au versant d'Amtrass montrant les écroulements et les chutes qui atteignent la route ; D : L'entrée du village de Chrafate avec les blocs qui détériorent la section de la route nationale N°2 à chaque détachement de bloc..... </p>	108
<p> Figure IV-25 : Coupe schématique du versant de Chrafate..... </p>	109
<p> Figure IV-26 : Schématisation des étapes d'analyse de la densité des MT sous SIG . </p>	113
<p> Figure IV-27 : Densité des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen..... </p>	114
<p> Figure IV-28 : Carte de persistance spatiale des MT dans la province de Chefchaouen </p>	115
<p> Figure IV-29 : Le large spectre du phénomène mouvement de terrain..... </p>	116
<p> Figure IV-30 : Représentation en perspective de la distribution spatiale des mouvements de terrain de la province de Chefchaouen en fonction de leur taille. </p>	117
<p> Figure IV-31 : A : Carte de la distribution spatiale des mouvements de terrain; B : Histogramme montrant les fréquences des superficies des MT de la province de Chefchaouen en log décimale ; C : Courbe de la déviation standard de la distribution des superficies ; D : Courbe du coefficient de Kurtosis ; et E : Courbe de Skewness avec les positions respectives des valeurs médiane et moyenne. </p>	118
<p> Figure IV-32 : diagramme quantile-quantile des superficies des MT de la province de Chefchaouen. </p>	119

Chapitre V

<p> Figure V-1 : Carte du découpage lithologique en unités géotechniques et géomorphologique de la province de Chefchaouen..... </p>	128
<p> Figure V-2 : Fréquences des différentes unités géotechniques de la province de Chefchaouen..... </p>	129
<p> Figure V-3 : Canevas des données satellitaires utilisées </p>	130
<p> Figure V-4 : Résolutions spatiales de deux images satellitaires. A : 20m, Spot XS (321), et B : 30m, Landsat7 ETM+ (432)..... </p>	131
<p> Figure V-5: Exemples de codage des images numériques. A : Codage 16-bit (images Radar et MNT), B : Codage 8-bit (la plus part des images)..... </p>	131
<p> Figure V-6 : Comparaison de la résolution spectrale entre les capteurs Landsat7 ETM+ et SPOT XS, Abdelouafi, 2007, modifiée. </p>	131
<p> Figure V-6 bis : méthodologie adoptée pour l'extraction de la fracturation à partir des images satellitaires </p>	132
<p> Figure V-7 : Réseau d'alignements (en bas) extrait à l'aide du traitement Crisp (en haut)..... </p>	134
<p> Figure V-8 : Réseau d'alignements (en bas) extrait à l'aide du traitement Natural Color (en haut) . </p>	135
<p> Figure V-9 : Carte composite d'alignements issue des données satellitaire de la de la province de Chefchaouen (Assemblage des résultats de la figure V-7 et 8, plus d'autres traitements)..... </p>	136

Figure V-10 : Carte synthétique de la fracturation de la de la province de Chefchaouen, issue de l'assemblage de l'analyse morphostructurale du MNT, l'analyse des anomalies de drainage, traitements satellitaires, et données bibliographiques.	137
Figure V-11 : Cartes de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen. A : Carte initiale avec 14 classes obtenues automatiquement ; B : Carte reclassifiée en 5 classes (très faible, faible, moyenne, élevée, et très élevée).	138
Figure V-11 bis : Fréquences des différentes classes de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen.	139
Figure V-12 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque unité géotechnique et géomorphologique (UG) de la province de Chefchaouen.	141
Figure V-13 : Fréquences de chaque type de mouvement de terrain par unité géotechnique et géomorphologique	142
Figure V-14 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen.	143
Figure V-15 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain au niveau de chaque classe de densité de la fracturation de la province de Chefchaouen.	144
Figure V-16 : Réseau sismique télémétré du Maroc	146
Figure V-17 : Distribution spatiale des séismes (1901 – 2008) dans la province de Chefchaouen et son pourtour.	147
Figure V-18 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2009 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.	148
Figure V-19 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2010 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.	148
Figure V-20 : Distribution spatiale des séismes de l'année 2011 dans la province de Chefchaouen et son pourtour.	149
Figure V-21 : Carte des isoprofondeurs des séismes dans la province de Chefchaouen.	150
Figure V-22 : Fréquences des différentes classes des isoprofondeurs des séismes de la province de Chefchaouen.	152
Figure V-23 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe de profondeur (Km) des séismes de la province de Chefchaouen	153
Figure V-24 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain par classe de profondeur des séismes de la province de Chefchaouen	154
Figure V-25 : Carte du gradient de pente de la province de Chefchaouen.	154
Figure V-26 : Fréquences des différentes gammes des gradients de pentes de la province de Chefchaouen.	157
Figure V-26 bis: Carte hypsométrique de la province de Chefchaouen.	158
Figure V-27 : Fréquences des différentes subdivisions hypsométriques de la province de Chefchaouen.	159
Figure V-28 : Carte des expositions de la province de Chefchaouen.	160
Figure V-29 : Fréquences des différentes classes d'exposition des versants de la province de Chefchaouen.	161
Figure V-30 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe de degré de pente (en °) de la province de Chefchaouen.	162
Figure V-31 : Fréquences de chaque type de mouvements de terrain par classe de degré de pente de la province de Chefchaouen	163

Figure V-32 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe hypsométrique (m) de la province de Chefchaouen.	164
Figure V-33 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe d'exposition de la province de Chefchaouen.	165
Figure V-34 : Schéma conceptuel de la relation torrents - mouvements de terrain.	166
Figure V-35 : Modèle de circulation des eaux dans le domaine rifain interne dans les conditions de la déformation actuelle.....	167
Figure V-36 : Cartes de densité du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen.....	169
Figure V-37 : Fréquences des différentes classes de densité du réseau hydrographique de la province de Chefchaouen.....	170
Figure V-38 : A : Vue d'ensemble d'un paysage en badlands de la région d'Ouazzane ; B et C : sections de badlands entaillées dans les formations pélitiques de Zoumi, avec leurs zooms respectifs B1 et C1. B2 et C2 : étant leurs filtres respectifs montrant l'intensité de la dégradation par ravinement subie par les versants.....	171
Figure V-39 : A : Fréquences des mouvements de terrain (tous types confondus) au niveau de chaque classe de densité du réseau hydrographique (DRH) de la province de Chefchaouen; B : Fréquences des glissements de terrain par classe de DRH ; C : Fréquences des coulées de débris par classe de DRH; D : Fréquences des écroulements par classe de DRH ; E : Fréquences des sapements par classe de DRH ; F : Fréquences des badlands par classe de DRH.....	173
Figure V-40 : variations des précipitations moyennes mensuelles de la station météorologique de Chefchaouen entre 1941 et 2011.....	174
Figure V-41 : variations interannuelles des hauteurs des précipitations de la station météorologique de Chefchaouen.....	175
Figure V-42 : A : Stations météorologiques et précipitations moyennes mensuelles intégrées dans l'interpolation, et B : leur positionnement géographique.	177
Figure V-43 : Carte des précipitations du secteur d'étude. A : interpolation polynomiale globale ; B : interpolation polynomiale locale ; C : interpolation Kernel ; et D : interpolation IDW.....	178
Figure V-44 : Carte des précipitations de la province de Chefchaouen par interpolation IDW.....	179
Figure V-45 : Fréquences des précipitations de la région de Chefchaouen.....	180
Figure V-46 : A : Précipitations moyennes annuelles et altitudes respectives des 25 points échantillonnés selon le modèle ; B : corrélations des précipitations moyennes annuelles avec les altitudes de la province de Chefchaouen.....	180
Figure V-47 : A : Précipitations moyennes annuelles effectives et altitudes respectives des stations ; B : corrélations des précipitations moyennes annuelles avec les altitudes de la province de Chefchaouen..	180
Figure V-48 : Diagrammes ombrothermiques de trois des stations représentatives du climat de la province de Chefchaouen et ses alentours, Direction de l'Hydraulique, 2010.....	182
Figure V-49 : A : Phase NAO positive ; B : Phase NAO négative	184
Figure V-50 : Corrélation entre les indice NAO, les précipitations hivernales (ONDJF, trait) et la sismicité (le nombre de tirets indique le nombre des séismes, seuls les tirets en orange contiennent des séismes avec $7.9 \geq M \geq 5$) de la province de Chefchaouen et son pourtour entre 1941 et 2011....	185
Figure V-51 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe de précipitations de la province de Chefchaouen.....	186
Figure V-51 bis : A : Noms, superficies, et densité de la population par communes; (*) : RGPH, 2004 ; B : Distribution des communes rurales et urbaine du secteur d'étude.	190

Figure V-52 : Carte d'occupation des sols de la province de Chefchaouen.	191
Figure V-53 : Fréquences des différentes classes d'occupation des sols de la province de Chefchaouen.	193
Figure V-54 : A : Fréquences des mouvements de terrain au niveau de chaque classe d'occupation des sols de la province de Chefchaouen;.....	194

Chapitre VI

Figure VI-1 : les secteurs d'étude sélectionnés à trois différentes échelles pour l'évaluation de la susceptibilité aux MT.....	201
Figure VI-2 : Résumé du déroulement des différentes étapes pour la cartographie de la susceptibilité aux M par combinaison des cartes d'index dans la province de Chefchaouen.	203
Figure VI-4 : Histogramme d'indices (index) de la susceptibilité par combinaison de carte d'index. Reclassification par la méthode de la déviation standard (Standard deviation) ; SN : susceptibilité nulle ; STF : susceptibilité très faible ; SF : susceptibilité faible ; SM : susceptibilité moyenne ; SE : susceptibilité élevée ; et STE : susceptibilité très élevée.	207
Figure VI-5 : Histogramme d'indices (index) de la susceptibilité par combinaison de carte d'index. Reclassification par la méthode des ruptures naturelles (Naturel breaks) ; SN : susceptibilité nulle ; STF : susceptibilité très faible ; SF : susceptibilité faible ; SM : susceptibilité moyenne ; SE : susceptibilité élevée ; et STE : susceptibilité très élevée.	208
Figure VI-3 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la province de Chefchaouen, obtenue par approche de combinaison de cartes d'index.....	210
Figure VI-6 : Carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain de la province de Chefchaouen, par combinaison de cartes d'index, A : Reclassification par la méthode de la déviation standard ; B : Reclassification par la méthode des ruptures naturelles.....	211
Figure VI-7: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) (ordonnée du gauche etabscisse du haut) par ruptures naturelles (RN, Natural breaks) représentée par la courbe en tirets noirs; par déviation standard (D-Sdt, Standard deviation) représentée par la courbe en tirets verts..	212
Figure VI-8: Résumé de la démarche de zonage de la susceptibilité à méso-échelle par la TDE et les RL.	215
Figure VI-9: Position de la région de Bab Taza dans le rif occidental, et son hypsométrie.	216
Figure VI-10: Relation entre la variable à modéliser (VM : MT), et la variable prédictive (VP : VP), illustrant la présence et l'absence du paramètre causal (VP) en relation avec les mouvements de terrain par l'utilisation du diagramme.	218
Figure VI-11 : Variables prédictives de gauche à droite, la lithologie, la fracturation, et l'occupation des sols.	221
Figure VI-12 : Variables prédictives de gauche à droite : les précipitations, le réseau hydrographique, et la sismicité.....	222
Figure VI-13 : Variables prédictives de gauche à droite : le gradient de pente, l'hypsométrie, et l'exposition des versants.....	223
Figure VI-14: A : Tableau des valeurs des contingences du test chi-carré χ^2 théoriques ; B : Valeurs des contingences du test chi-carré χ^2 observées ; C : Valeurs du degré de liberté (α) ; D : Valeurs du coefficient V de Cramer.....	224

Figure VI-15: Courbes de probabilité de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la région de Bab Taza par plusieurs simulations avec différentes combinaisons de variable prédictives. Les abréviations en rouge correspondent aux variables non intégrées dans la simulation.	231
Figure VI-16 : Extraits de deux cartes de prédictibilité de la susceptibilité obtenues par deux différentes combinaisons de variables.....	232
Figure VI-17 : Les deux cartes probabilité d'occurrence des glissements de terrain issues des deux meilleures simulations..	233
Figure VI-18 : A : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local »..	234
Figure VI-19 : A : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux glissements de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local »..	236
Figure VI-20 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).....	237
Figure VI-21 : Courbe de probabilité de la susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris.	238
Figure VI-22 : A : Carte de probabilité d'occurrence des écroulements et des coulées de débris dans la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité des versants de la région de Bab Taza aux écroulements et aux coulées de débris.....	238
Figure VI-23 : A : Carte de susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris de la région de Bab Taza ; B : Carte de susceptibilité aux écroulements et aux coulées de débris de la région de Bab Taza lissée par la méthode « Polynôme local ».....	240
Figure VI-24 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les écroulements et les coulées de débris par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).	241
Figure VI-25 : Carte synthétique de la susceptibilité aux MT dans la région de Bab Taza.	241
Figure VI-26 : Carte synthétique de la susceptibilité aux MT dans la région de Bab Taza.	243
Figure VI-27 : Comparaison des superficies des classes de susceptibilité aux MT dans la région de Bab Taza obtenues par la théorie de l'évidence (TDE) et par les régressions logistiques (RL).	243
Figure VI-28: Comparaison des courbes ROC (Receiver Operating Characteristic) obtenues par les deux approches utilisées.	245
Figure VI-29 : Comparaison des aires de susceptibilité élevée obtenues par les deux modèles.....	246
Figure VI-30 : Carte de susceptibilité aux écroulements de la commune urbaine de Chefchaouen. .	248

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 : Caractéristiques des approches proposées dans la littérature pour le zonage de la susceptibilité aux mouvements de terrain, Van Westen et al, 1997 ; Guzzetti, 2005 ; adaptée.....	33
Tableau I-2 : Echelles d'analyses de la susceptibilité (et/ou de l'aléa) aux mouvements de terrain, utilisation et approches adaptées.....	39
Tableau I-3: Avantages et inconvénients des différentes approches d'évaluation de l'aléa à différentes échelles (Adaptée par Maquaire, 2002 d'Aleotti et Chowdhury, 1999).....	40

Chapitre II

Chapitre III

Tableau III-1 : Caractéristiques des MNT suivant les données source et les techniques utilisées (Dupont et al., 1998).	65
--	----

Chapitre IV

Tableau IV-1 : classification des MT selon des critères cinématiques, d'après Varnes, 1978 et Crozier, 1986. E.R. : extrêmement rapide, T.R. : très rapide, R. : rapide, M. : modéré, L. : lent, T.L. : très lent, E.L. : extrêmement lent, adaptée par Campina, 2005.	81
Tableau IV-2 : classification des mouvements de terrain selon des critères morphologiques et géométriques, d'après Varnes, 1978, adaptée par Campina, 2005.....	82
Tableau IV-3 : corrélations entre les principales phases de réactivation des massifs d'Amtrass, Chrafate, et Bou Halla avec les variations NAO.....	110
Tableau IV-4 : caractéristiques des séismes du secteur d'Amtrass – Chrafate – Bou Halla sur les dernières 50 années.	111
Tableau IV-5 : résumé des caractéristiques des trois mouvements de versants décrits.	112

Chapitre V

Tableau V-1: caractéristiques géotechniques des unités géotechniques de la province de Chefchaouen.	128
--	-----

Chapitre VI

Tableau VI-1 : Groupes et liste des paramètres sélectionnés dans la présente étude ainsi que les données utilisées.....	202
Tableau VI-2 : Pondération des différentes classes et poids relatifs des paramètres pris en compte pour la genèse des mouvements de terrain dans le province de Chefchaouen, SC : superficie de la classe ; FC : Fréquence de la classe ; NBR de MT : Nombre de mouvement de terrain ; F de MT : Fréquence des mouvements de terrain ; PRC : Poids relatifs de chaque classe W_{ij} ; et PRF : Poids relatif de chaque facteur (\bar{W}_j = valeur max du PRC du paramètre).	204
Tableau VI-2 bis : Caractéristiques statistiques des huit paramètres indépendants (prédictifs) à intégrer dans l'analyse de la susceptibilité. La valeur Bêta exprime le coefficient par régressions	

logistiques de chaque paramètre indépendant selon son importance dans la genèse des mouvements de terrain dans le secteur. L'index du diagnostic de la multicollinéarité est exprimé par les deux colonnes : TOL et VIF.....	226
E : expositions des versants ; H : hypsométrie ; F : fracturation ; L : lithologie ; O.sols : occupation des sols ; RH : réseau hydrographique ; Pr : précipitations ; S : sismicité ; Gp : gradient de pentes.....	226
Tableau VI-3 : Statistiques sommaires du modèle avec les huit paramètres.	226
Le R, R ² , et le R ² ajusté indique le degré de justesse du modèle.	226
Tableau VI-4 : Corrélation spatiale entre les variables prédictives et les valeurs de pondération calculées par la théorie de l'évidence. W ⁺ : Poids positif ou probabilité a priori ; W ⁻ : Poids négatif ou probabilité à posteriori ; C : Contraste qui est la différence entre le poids positif et celui négatif.TF : Très faible ; F : Faible ; M : Moyenne ; E : Elevée ; TE : Très élevée, et RH : Réseau hydrographique.	229
Tableau VI-5 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables.	232
Tableau VI-6 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain	234
Tableau VI-7 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables.	235
Tableau VI-8 : Caractéristiques des classes de susceptibilité obtenues pour les glissements de terrain	239
Tableau VI-9 : Résultats du calcul de l'AUC des différentes combinaisons de variables	240.

Liste des annexes

Annexe 1 : définition des SIG	305
Annexe 2 : Catalogue des données sismiques utilisées	305

Annexes

Annexe 1 : définition des SIG

Un système d'Information Géographique ou SIG, est un système informatique d'intégration, localisation, création, analyse, et représentation des données spatiales. Le mot spatiale se réfère à la partie géographique, et suppose que les emplacements des données sont définis par des coordonnées géographiques (latitudes et longitudes). Un SIG est basé sur cinq composantes principales, à savoir :

- a. **L'utilisateur**: qui est l'élément le plus important dans un SIG, puisque c'est lui qui doit définir les traitements et développer les procédures d'exploitation à mener pour arriver à ses fins. Dans notre cas, ce sont des procédures pour la cartographie de la susceptibilité.
- b. **La disponibilité et l'exactitude des données** (variable à modéliser et variables prédictives): elles conditionnent les possibilités d'interrogation et d'analyse et impactent fortement les résultats finaux. Par exemple et dans le cas d'évaluation de la susceptibilité, une stratégie d'évaluation à l'échelle du 1/50 000ème, exigerait des données plus précises (détaillées) et plus nombreuses que pour une évaluation à l'échelle du 1/200 000ème.
- c. **Le matériel** (ressources informatiques) : les capacités du matériel conditionnent la rapidité d'exploitation, la facilité d'utilisation et le type de sortie possible.
- d. **Les logiciels** (ArcGis 10, Erdas 10, Global Mapper 12...): on entend par là les SIG, mais aussi les logiciels de bases de données, de dessin, de statistiques, d'imagerie ou d'applications spécifiques.
- e. **Les procédures de traitement de l'information** (la méthodologie d'approche) : la mise en place d'un SIG suppose l'application de certaines règles et procédures.

C'est la combinaison de tous ces éléments qui donne accès aux fonctions de base d'un SIG

Annexe 2 : Catalogue des données sismiques utilisées (Cherkaoui, 1991)

Numéro	Année	Mois	Jour	Latitude	Longitude	Profondeur	Magnitude	Région
1	1932	2	5	35,451	-4,902	18,0	4,6	ALBORAN
2	1934	9	5	34,800	-5,600	0,0	—	OUEZZANE
3	1938	4	28	34,800	-5,600	0,0	—	OUEZZANE
4	1938	9	20	34,900	-5,400	45,0	—	OUEZZANE
5	1952	3	30	34,800	-5,600	—	3,1	OUEZZANE
6	1955	2	7	34,800	-5,300	—	—	ZOUMI
7	1963	3	28	35,130	-4,866	29,9	3,6	BAB BERRET
8	1963	11	2	35,053	-4,652	5,0	4,1	JEBHA
9	1963	3	5	34,915	-5,965	5,0	4,0	OUEZZANE
10	1964	4	22	35,150	-4,807	10,0	2,8	BAB BERRET
11	1964	11	15	34,905	-5,425	8,6	5,0	MOKRISSET
12	1964	10	16	34,990	-4,842	10,0	3,2	TAMOROTE

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

13	1965	12	5	34,843	-5,698	5,0	4,4	OUZZANE
14	1968	6	15	35,192	-5,022	5,0	3,7	BOU AHMED
15	1968	6	30	35,308	-5,012	33,0	—	BOU AHMED
16	1968	6	30	34,967	-5,190	33,0	—	BOU AHMED
17	1968	6	30	34,917	-5,200	33,0	—	BOU AHMED
18	1968	6	30	34,951	-5,217	33,0	—	BOU AHMED
19	1968	2	12	34,990	-5,660	10,0	3,1	OUZZANE
20	1968	8	4	34,500	-5,500	—	—	OUZZANE
21	1969	1	26	35,000	-5,000	—	3,0	BAB TAZA
22	1969	10	22	35,155	-5,069	33,0	3,3	BAB TAZA
23	1969	3	29	35,122	-5,400	33,0	—	CHEFCHAOUEN
24	1969	10	11	35,010	-4,509	10,0	2,9	JEBHA
25	1969	6	1	34,567	-5,258	5,0	2,8	M'JARA
26	1970	2	4	35,590	-4,708	20,0	3,6	ALBORAN
27	1970	7	12	35,601	-4,736	5,0	2,0	ALBORAN
28	1970	6	2	35,178	-5,021	33,0	2,7	BAB TAZA
29	1970	11	6	35,532	-4,995	20,0	3,9	BOU AHMED
30	1970	12	16	35,065	-5,372	5,0	2,5	CHEFCHAOUEN
31	1970	10	10	35,119	-5,673	33,0	2,6	CHEFCHAOUEN
32	1970	3	5	34,719	-5,726	10,0	2,0	HAD KOURT
33	1970	1	11	35,334	-5,504	5,0	3,8	K.BENI AROUSS
34	1970	9	29	35,136	-5,823	5,0	2,8	K.EL KEBIR
35	1970	9	29	35,151	-5,831	5,0	2,2	K.EL KEBIR
36	1970	10	10	35,023	-5,760	33,0	2,6	K.EL KEBIR
37	1970	5	26	34,847	-4,652	5,0	2,4	KETAMA
38	1970	10	13	34,808	-4,762	33,0	3,1	TAMOROTE
39	1970	12	4	34,723	-5,438	5,0	3,5	TEROUAL
40	1970	6	10	34,759	-5,385	33,0	—	ZOUMI
41	1970	2	4	34,818	-5,266	10,0	2,7	ZOUMI
42	1971	2	11	35,832	-4,776	33,0	2,0	ALBORAN
43	1971	1	24	35,213	-4,893	33,0	2,1	BAB BERRET
44	1971	3	23	34,892	-5,225	5,0	2,1	BENI AHMED
45	1971	3	5	35,355	-4,917	33,0	2,7	BOU AHMED
46	1971	4	24	35,002	-5,575	33,0	2,0	CHEFCHAOUEN
47	1971	8	12	35,038	-5,699	8,4	4,1	CHEFCHAOUEN
48	1971	12	26	35,361	-5,638	10,0	4,0	K.BENI AROUSS
49	1971	9	24	34,913	-4,570	14,0	3,4	KETAMA
50	1971	3	5	35,303	-5,023	33,0	2,6	TALEMBOTE
51	1971	3	5	35,294	-5,018	33,0	3,2	TALEMBOTE
52	1971	2	14	34,565	-5,327	16,9	3,5	TEROUAL
53	1971	8	25	34,828	-5,453	10,0	2,7	ZOUMI
54	1972	2	25	35,735	-4,700	5,0	2,3	ALBORAN
55	1972	2	1	35,360	-4,570	42,0	4,1	JEBHA
56	1972	12	1	34,871	-5,545	10,0	3,0	OUZZANE

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

57	1973	6	24	35,850	-4,600	90,2	3,2	ALBORAN
58	1973	2	5	35,170	-4,880	26,5	3,0	BAB BERRET
59	1973	10	1	35,090	-5,770	4,4	3,5	K.EL KEBIR
60	1973	5	28	34,687	-5,914	5,0	2,9	M.BEL KSIRI
61	1973	8	5	34,680	-4,572	15,0	3,0	TAOUNATE
62	1973	11	24	34,600	-4,500	0,0	2,8	TAOUNATE
63	1974	9	27	35,780	-4,630	116,0	3,6	ALBORAN
64	1974	11	12	35,958	-4,900	5,0	3,1	ALBORAN
65	1974	1	4	35,140	-4,900	0,0	3,1	BAB BERRET
66	1974	1	4	34,784	-5,100	1,0	2,7	BENI AHMED
67	1974	1	11	35,400	-4,840	79,2	3,6	BOU AHMED
68	1974	2	9	35,120	-4,740	14,1	2,9	JEBHA
69	1974	2	3	34,650	-5,420	5,7	3,4	TEROUAL
70	1974	8	22	34,685	-5,344	10,0	2,8	TEROUAL
71	1975	7	5	35,160	-5,070	91,9	3,0	BAB TAZA
72	1975	9	19	35,152	-5,053	10,0	2,3	BAB TAZA
73	1975	10	2	34,953	-5,178	10,0	2,9	BENI AHMED
74	1975	12	18	35,097	-4,629	5,0	3,0	JEBHA
75	1975	1	9	35,060	-5,757	51,0	3,8	K.EL KEBIR
76	1976	3	16	35,630	-4,790	91,4	3,7	BOU AHMED
77	1976	1	8	35,130	-5,730	90,0	3,4	CHEFCHAOUEN
78	1976	9	20	35,327	-4,611	10,0	3,0	JEBHA
79	1976	7	8	35,282	-5,544	10,0	3,1	K.BENI AROUSS
80	1977	7	26	34,856	-5,659	10,0	3,0	OUEZZANE
81	1977	6	26	35,310	-5,170	32,0	2,6	TALEMBOTE
82	1979	6	23	34,753	-5,867	5,0	3,1	ARBAOUA
83	1979	7	29	35,194	-5,304	5,0	2,8	CHEFCHAOUEN
84	1979	7	5	35,286	-5,431	3,1	3,6	SK BNI HASSANE
85	1979	11	8	35,264	-5,059	5,0	3,1	TALEMBOTE
86	1980	4	25	35,510	-4,533	33,0	2,8	ALBORAN
87	1980	10	13	35,803	-4,562	100,0	4,2	ALBORAN
88	1980	10	8	35,895	-4,740	7,2	2,9	ALBORAN
89	1980	4	20	34,961	-5,168	1,2	3,3	BENI AHMED
90	1980	2	10	35,287	-4,938	32,8	4,0	BOU AHMED
91	1980	2	10	35,266	-4,864	29,1	3,2	BOU AHMED
92	1980	12	1	34,879	-4,988	5,0	3,1	TAMOROTE
93	1981	6	26	35,603	-4,702	27,1	3,3	ALBORAN
94	1981	1	2	34,854	-5,800	1,2	3,8	ARBAOUA
95	1981	3	17	34,986	-5,919	5,0	2,6	ARBAOUA
96	1981	6	19	34,813	-5,908	10,0	1,9	ARBAOUA
97	1981	9	25	35,019	-5,585	10,0	3,2	CHEFCHAOUEN
98	1981	9	25	34,680	-5,580	10,0	2,8	HAD KOURT
99	1981	3	19	35,000	-4,540	5,0	3,1	JEBHA
100	1981	2	5	35,257	-4,560	30,0	3,3	JEBHA

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

101	1981	8	30	34,562	-4,981	5,0	2,9	RHAFAI
102	1981	7	30	34,873	-4,832	18,7	2,2	TAMOROTE
103	1981	8	18	34,642	-5,319	5,0	3,4	TEROUA
104	1981	9	17	34,698	-5,303	10,0	3,3	TEROUA
105	1981	9	17	34,691	-5,479	10,0	2,7	TEROUAL
106	1982	4	5	34,962	-5,810	10,0	3,2	ARBAOUA
107	1982	7	19	35,375	-4,623	31,9	3,3	JEBHA
108	1982	7	21	34,666	-5,060	10,0	3,2	TAFRANNT
109	1982	4	29	34,597	-5,391	5,0	3,3	TEROUAL
110	1983	2	2	35,023	-5,169	5,0	3,5	BAB TAZA
111	1983	5	18	35,078	-5,067	33,0	3,1	BAB TAZA
112	1983	10	19	34,676	-5,548	33,0	2,5	HAD KOURT
113	1983	2	14	34,673	-5,974	30,0	2,3	M. BEL KSIRI
114	1983	6	17	34,562	-4,820	33,0	3,9	RHAFAI
115	1983	4	20	34,839	-5,380	20,0	3,7	ZOUMI
116	1983	9	20	34,884	-5,492	0,2	4,5	ZOUMI
117	1984	9	6	34,834	-5,869	10,0	2,5	ARBAOUA
118	1984	6	6	35,307	-4,846	15,0	3,2	BOU AHMED
119	1984	3	26	35,676	-4,803	10,0	2,6	BOU AHMED
120	1984	4	13	35,982	-5,479	5,0	-	GIBALTAR
121	1984	2	12	34,663	-5,920	10,0	2,8	M. BEL KSIRI
122	1985	2	16	35,080	5,964	5,0	2,9	KSAR EL KEBIR
123	1985	8	10	34,755	5,620	4,2	3,2	OUEZZANE
124	1985	4	27	34,910	5,421	32,9	3,2	ZOUMI
125	1986	5	31	35,797	4,689	32,0	2,8	ALBORAN
126	1986	4	3	35,053	4,654	27,8	3,4	JEBHA
127	1987	6	18	35,669	4,584	18,1	3,1	ALBORAN
128	1987	9	11	35,750	4,610	120,0	4,1	ALBORAN
129	1987	8	29	34,837	5,943	45,0	3,0	ARBAOUA
130	1987	5	31	34,981	5,137	3,4	3,3	BENI AHMED
131	1988	5	8	35,448	4,635	24,0	3,2	JEBHA
132	1989	1	27	35,922	4,665	90,0	3,3	ALBORAN
133	1989	1	29	35,887	4,682	100,0	3,1	ALBORAN
134	1989	11	8	35,867	4,652	110,0	3,2	ALBORAN
135	1989	9	9	34,649	5,528	10,0	2,7	HAD KOURT
136	1989	1	7	35,427	4,709	27,7	3,1	JEBHA
137	1989	12	8	35,259	4,555	24,8	2,9	JEBHA
138	1989	8	5	34,981	5,667	21,3	3,4	OUEZZANE
139	1989	7	17	34,540	5,445	12,1	2,4	TEROUAL
140	1989	8	23	34,553	5,271	17,6	3,7	TEROUAL
141	1989	8	23	34,537	5,412	26,2	3,3	TEROUAL
142	1989	8	23	34,554	5,412	12,9	3,6	TEROUAL
143	1989	6	11	34,815	5,360	6,4	3,2	ZOUMI
144	1989	8	5	34,843	5,278	10,0	2,9	ZOUMI
145	1990	2	11	35,965	4,967	18,0	2,7	ALBORAN

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

146	1990	4	21	34,808	5,155	30,0	3,3	BENI AHMED
147	1990	4	24	34,982	5,071	10,0	2,5	BENI AHMED
148	1990	3	31	35,426	4,801	45,0	3,1	BOU AHMED
149	1990	4	13	35,573	4,840	32,8	4,2	BOU AHMED
150	1990	4	21	34,854	5,641	5,3	3,3	OUEZZANE
151	1990	8	19	34,682	4,626	3,0	3,1	TAOUNATE
152	1990	4	30	34,623	5,412	10,0	3,3	TEROUAL
153	1990	8	13	34,922	5,313	90,0	3,5	ZOUMI
154	1991	1	28	35,030	4,757	13,0	3,0	BAB BERRET
155	1991	3	4	34,561	5,174	30,0	4,1	TAFRRANT
156	1991	1	28	34,972	4,839	13,0	2,8	TAMOROTE
157	1991	5	23	34,934	4,899	10,0	3,2	TAMOROTE
158	1991	1	28	34,865	5,444	14,0	3,6	ZOUMI
159	1991	11	13	34,874	5,371	10,0	3,4	ZOUMI
160	1991	5	20	34,844	5,361	10,0	3,7	ZOUMI.
161	1992	1	6	35,895	4,800	30,0	3,0	ALBORAN
162	1992	4	28	35,815	4,601	80,7	3,8	ALBORAN
163	1992	9	12	35,728	4,586	38,0	3,6	ALBORAN
164	1992	9	17	34,884	5,912	10,0	2,8	ARBAOUA
165	1992	8	19	35,080	4,856	10,0	2,9	BAB BERRET
166	1992	4	17	34,768	5,167	10,0	2,8	BENI AHMED
167	1992	2	12	35,744	4,794	70,0	3,1	BOU AHMED
168	1992	5	28	34,668	5,530	13,2	3,4	HAD KOURT
169	1992	6	3	34,668	5,867	10,0	2,8	M.BEL KSIRI
170	1992	4	16	34,770	5,545	10,0	3,6	OUEZZANE
171	1992	1	10	34,634	5,312	18,0	3,1	TEROUAL
172	1992	5	15	34,800	5,429	2,6	3,2	ZOUMI
173	1992	10	3	34,848	5,331	10,0	2,8	ZOUMI
174	1993	1	1	35,763	4,582	63,0	3,2	ALBORAN
175	1993	7	27	35,537	4,595	33,0	2,6	ALBORAN
176	1993	9	13	35,760	4,750	50,0	3,2	ALBORAN
177	1993	12	15	35,637	4,638	28,0	3,4	ALBORAN
178	1993	8	19	34,890	5,228	5,0	3,0	BENI AHMED
179	1993	7	24	35,127	4,674	10,0	2,7	JEBHA
180	1993	11	4	34,583	5,830	10,0	1,9	M.BEL KSIRI
181	1993	10	24	34,971	5,670	7,0	2,8	OUEZZANE
182	1993	5	31	34,658	5,118	10,0	2,8	TAFRRANT
183	1993	12	21	34,897	4,973	10,0	2,7	TAMOROTE
184	1994	7	11	35,779	4,761	32,0	2,6	ALBORAN
185	1994	8	11	35,743	4,593	14,0	2,9	ALBORAN
186	1994	11	30	35,988	4,583	21,0	2,9	ALBORAN
187	1994	5	25	35,096	5,724	10,0	2,9	CHEFCHAOUEN
188	1994	3	16	34,544	5,575	15,0	3,4	HAD KOURT
189	1994	3	16	34,513	5,527	7,0	2,7	HAD KOURT
190	1994	3	16	34,510	5,572	19,9	2,4	HAD KOURT

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

191	1994	3	16	34,546	5,588	22,0	3,3	HAD KOURT
192	1994	4	5	34,551	5,521	10,0	3,5	HAD KOURT
193	1994	4	14	34,504	5,504	10,0	3,4	HAD KOURT
194	1994	3	20	35,308	5,102	10,0	2,7	TALEMBOTE
195	1994	11	25	34,642	4,532	31,0	4,5	TAOUNATE
196	1994	3	28	34,894	5,285	10,0	2,5	ZOUMI
197	1994	5	4	34,764	5,281	10,0	3,1	ZOUMI
198	1994	9	8	34,830	5,465	10,0	3,5	ZOUMI
199	1995	3	17	35,738	4,568		2,7	ALBORAN
200	1995	9	20	35,769	4,529	29,0	2,4	ALBORAN
201	1995	9	26	34,879	5,058	18,0	3,1	BENI AHMED
202	1995	8	7	34,533	5,563	2,0	2,9	HAD KOURT
203	1995	2	25	35,134	4,660	32,0	3,4	JEBHA
204	1995	3	26	35,450	4,674	10,0	3,2	JEBHA
205	1995	9	15	34,879	5,559	10,0	2,8	OUEZZANE
206	1995	5	28	34,723	5,188	6,0	3,2	TAFRANNT
207	1995	3	5	34,814	5,433	2,0	2,9	ZOUMI
208	1996	1	16	35,911	4,821	10,0	2,2	ALBORAN
209	1996	4	18	35,974	4,634	13,0	2,8	ALBORAN
210	1996	4	27	35,917	4,538	10,0	2,9	ALBORAN
211	1996	6	27	35,712	4,578	59,0	3,2	ALBORAN
212	1996	6	29	35,910	4,502	66,0	3,3	ALBORAN
213	1996	8	14	35,748	4,733	10,0	2,7	ALBORAN
214	1996	10	17	35,783	4,751	31,0	2,8	ALBORAN
215	1996	11	8	35,890	4,672	10,0	2,9	ALBORAN
216	1996	7	13	34,793	5,968	22,3	4,3	ARBAOUA
217	1996	8	21	35,555	4,999	10,0	2,8	BOU AHMED
218	1997	2	16	35,716	4,566	27,0	3,1	ALBORAN
219	1997	4	30	35,635	4,681	10,0	3,5	ALBORAN
220	1997	11	12	35,997	4,648	72,0	3,5	ALBORAN
221	1997	4	1	34,560	4,944	22,0	3,3	RHAFAI
222	1997	10	25	34,599	5,290	10,0	3,1	TEROUAL
223	1998	5	2	35,780	4,547	0,0	2,5	ALBORAN
224	1998	5	23	35,904	4,577	17,0	4,1	ALBORAN
225	1998	7	7	35,757	4,537	113,0	2,1	ALBORAN
226	1998	11	21	35,790	4,618	105,4	2,7	ALBORAN
227	1998	12	24	35,940	4,600	87,8	2,8	ALBORAN
228	1998	8	3	35,029	5,194	99,0	4,2	BAB TAZA
229	1998	3	25	35,726	4,979	89,0	3,5	BOU AHMED
230	1998	5	21	35,652	4,750	21,0	2,3	BOU AHMED
231	1998	2	24	34,537	5,636	23,0	2,3	HAD KOURT
232	1998	5	28	35,302	4,521	27,0	3,9	JEBHA
233	1998	4	20	35,280	5,745	45,0	3,5	K.BENI AROUSS
234	1998	2	23	34,668	5,467	19,0	3,5	TEROUAL
235	1998	2	23	34,649	5,269	33,0	2,9	TEROUAL

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

236	1999	1	11	35,675	4,627	103,0	2,8	ALBORAN
237	1999	1	29	35,716	4,547	68,0	2,6	ALBORAN
238	1999	1	31	35,990	4,899	10,0	2,2	ALBORAN
239	1999	2	7	35,873	4,617	63,0	2,8	ALBORAN
240	1999	3	4	35,979	4,807	84,0	2,5	ALBORAN
241	1999	3	18	35,899	4,578	59,0	2,0	ALBORAN
242	1999	3	29	35,998	4,562	83,0	1,7	ALBORAN
243	1999	7	18	35,702	4,694	25,0	2,5	ALBORAN
244	1999	8	16	35,797	4,935	24,0	3,1	ALBORAN
245	1999	8	17	35,898	4,971	10,0	2,9	ALBORAN
246	1999	8	17	35,794	4,973	15,0	3,4	ALBORAN
247	1999	8	30	35,754	4,836	27,0	4,0	ALBORAN
248	1999	11	5	35,940	4,561	103,0	1,3	ALBORAN
249	1999	11	10	35,686	4,706	111,4	4,1	ALBORAN
250	1999	10	27	34,838	5,093	8,0	3,5	BENI AHMED
251	1999	8	3	35,553	4,859	29,0	3,4	BOU AHMED
252	1999	9	5	35,654	4,952	10,0	2,9	BOU AHMED
253	1999	5	3	35,199	5,493	64,0	3,3	CHEFCHAOUEN
254	1999	1	29	34,913	5,692	10,0	2,8	OUEZZANE
255	1999	9	29	34,561	5,412	10,0	3,0	TEROUAL
256	2000	3	16	35,713	4,635	108,0	1,8	ALBORAN
257	2000	7	30	35,823	4,699	67,3	3,6	ALBORAN
258	2000	11	21	35,523	4,585	68,9	1,5	ALBORAN
259	2000	11	21	35,769	4,728	19,1	2,9	ALBORAN
260	2000	4	19	35,681	4,783	80,0	2,1	BOU AHMED
261	2000	12	23	35,666	4,772	83,5	2,0	BOU AHMED
262	2000	8	6	35,076	5,672	10,0	3,0	CHEFCHAOUEN
263	2000	4	30	35,428	4,527	90,6	1,9	JEBHA
264	2000	3	13	34,513	5,785	7,1	3,3	M. BEL KSIRI
265	2000	4	28	34,558	5,837	54,9	4,1	M.BEL KSIRI
266	2000	7	9	34,713	4,867	10,0	3,0	RHAFAI
267	2000	9	19	34,748	5,368	28,2	3,6	TEROUAL
268	2001	5	15	35,542	4,782	58,4	3,1	BOU AHMED
269	2001	1	1	35,857	4,529	110,5	1,7	ALBORAN
270	2001	6	23	35,779	4,772	113,2	1,3	ALBORAN
271	2001	7	5	35,929	4,657	106,1	2,0	ALBORAN
272	2001	8	31	35,954	4,768	100,3	3,5	ALBORAN
273	2001	9	13	35,838	4,522	82,6	3,2	ALBORAN
274	2001	10	27	35,757	4,701	77,8	3,8	ALBORAN
275	2001	12	1	35,839	4,554	75,7	2,2	ALBORAN
276	2001	6	22	35,407	4,792	68,2	3,5	BOU AHMED
277	2001	7	8	35,385	4,718	13,0	3,2	JEBHA
278	2002	2	3	35,844	4,670	109,2	2,1	ALBORAN
279	2002	3	4	35,840	4,645	99,0	1,7	ALBORAN
280	2002	4	16	35,999	4,606	7,6	1,4	ALBORAN

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

281	2002	5	12	35,832	4,613	111,8	2,1	ALBORAN
282	2002	6	3	35,894	4,670	18,3	3,3	ALBORAN
283	2002	8	5	35,713	4,586	94,3	1,5	ALBORAN
284	2002	9	29	35,978	4,693	10,0	4,0	ALBORAN
285	2002	10	15	35,747	4,552	65,0	3,0	ALBORAN
286	2002	10	19	35,586	4,619	21,1	3,4	ALBORAN
287	2002	11	16	35,740	4,586	92,8	1,7	ALBORAN
288	2002	5	12	35,190	4,930	22,5	3,4	BAB BERRET
289	2002	11	4	35,130	5,182	14,5	3,4	BAB TAZA
290	2002	9	28	35,696	4,896	102,2	2,0	BOU AHMED
291	2002	4	11	35,133	5,412	10,0	3,3	CHEFCHAOUEN
292	2002	12	31	34,573	5,510	13,3	3,5	HAD KOURT
293	2002	1	1	35,276	4,588	28,1	3,5	JEBHA
294	2002	9	28	35,316	5,708	12,1	4,0	K. DES AROUSS
295	2002	5	16	35,176	5,786	21,0	2,8	KSAR EL KEBIR
296	2002	4	3	34,807	5,505	16,6	3,9	OUEZZANE
297	2003	11	11	35,663	4,974	0,0	1,2	BOU AHMED
298	2003	2	23	35,739	4,640	111,0	1,6	ALBORAN
299	2003	2	24	35,991	4,691	107,5	1,9	ALBORAN
300	2003	3	20	35,744	4,631	99,1	2,4	ALBORAN
301	2003	3	30	35,730	4,699	139,2	1,2	ALBORAN
302	2003	5	18	35,991	4,709	115,7	1,2	ALBORAN
303	2003	7	4	35,755	4,746	74,4	3,4	ALBORAN
304	2003	7	19	35,819	4,778	30,2	3,0	ALBORAN
305	2003	7	30	35,991	4,767	101,8	1,8	ALBORAN
306	2003	8	3	35,840	4,653	126,5	1,1	ALBORAN
307	2003	8	4	35,654	4,502	10,0	2,6	ALBORAN
308	2003	8	9	35,922	4,874	109,4	1,6	ALBORAN
309	2003	8	15	35,777	4,631	141,9	1,1	ALBORAN
310	2003	9	6	35,846	4,813	9,6	2,5	ALBORAN
311	2003	9	17	35,730	4,589	103,6	2,8	ALBORAN
312	2003	9	21	35,681	4,723	24,0	1,2	ALBORAN
313	2003	9	21	35,829	4,647	117,7	1,8	ALBORAN
314	2003	11	10	35,938	4,780	0,0	1,8	ALBORAN
315	2003	11	12	35,944	4,668	106,9	1,2	ALBORAN
316	2003	1	31	35,735	4,915	60,7	4,3	BOU AHMED
317	2003	8	15	35,616	4,881	79,8	2,0	BOU AHMED
318	2003	12	22	35,735	4,887	86,2	1,9	BOU AHMED
319	2003	3	3	35,244	5,476	10,0	1,5	CHEFCHAOUEN
320	2003	5	4	35,108	4,502	25,9	3,3	JEBHA
321	2003	8	24	35,420	4,592	0,0	2,9	JEBHA
322	2003	9	13	35,469	4,571	112,8	1,4	JEBHA
323	2003	9	30	35,457	4,691	125,1	1,8	JEBHA
324	2003	10	16	35,233	4,602	14,7	3,2	JEBHA
325	2003	8	8	35,066	5,854	17,1	3,4	KSAR EL KEBIR

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

326	2003	12	26	35,146	5,879	6,0	2,3	KSAR EL KEBIR
327	2003	3	19	34,718	5,910	10,0	2,7	M.BEL KSIRI
328	2003	1	5	34,816	5,688	25,0	3,2	OUEZZANE
329	2004	1	16	35,969	4,791	145,9	1,6	ALBORAN
330	2004	1	18	35,904	4,797	125,6	1,4	ALBORAN
331	2004	1	21	35,893	4,649	131,4	1,3	ALBORAN
332	2004	2	1	35,769	4,640	114,6	1,5	ALBORAN
333	2004	2	13	35,670	4,645	75,5	2,4	ALBORAN
334	2004	3	3	35,722	4,699	113,2	1,4	ALBORAN
335	2004	3	8	35,910	4,738	0,0	1,9	ALBORAN
336	2004	3	13	35,844	4,844	80,0	3,0	ALBORAN
337	2004	6	5	35,897	4,818	114,2	1,2	ALBORAN
338	2004	6	29	35,930	4,884	0,0	1,8	ALBORAN
339	2004	8	1	35,698	4,678	90,8	1,7	ALBORAN
340	2004	8	8	35,618	4,629	0,0	2,6	ALBORAN
341	2004	8	15	36,000	4,754	95,0	1,7	ALBORAN
342	2004	8	16	35,833	4,716	1,2	1,5	ALBORAN
343	2004	8	23	35,766	4,619	70,2	3,0	ALBORAN
344	2004	10	17	35,784	4,730	79,7	2,6	ALBORAN
345	2004	11	4	35,712	4,596	97,5	1,7	ALBORAN
346	2004	12	7	35,688	4,676	77,9	2,7	ALBORAN
347	2004	12	31	35,868	4,684	103,5	3,3	ALBORAN
348	2004	4	24	34,879	5,981	13,1	3,7	ARBAOUA
349	2004	6	18	34,957	5,763	20,8	3,0	ARBAOUA
350	2004	10	24	34,805	5,775	10,0	3,2	ARBAOUA
351	2004	6	23	35,108	4,942	69,5	4,2	BAB BERRET
352	2004	4	6	35,195	5,110	7,4	2,8	BAB TAZA
353	2004	2	10	35,729	4,769	102,3	2,2	BOU AHMED
354	2004	8	1	35,742	4,969	67,4	3,9	BOU AHMED
355	2004	10	24	35,680	4,785	25,1	3,7	BOU AHMED
356	2004	11	8	35,469	4,884	0,0	2,3	BOU AHMED
357	2004	1	21	34,611	5,525	16,3	3,5	HAD KOURT
358	2004	1	21	34,563	5,600	14,2	3,2	HAD KOURT
359	2004	1	26	34,577	5,546	7,8	4,4	HAD KOURT
360	2004	1	28	34,582	5,516	15,2	4,5	HAD KOURT
361	2004	9	26	34,665	5,524	7,0	3,4	HAD KOURT
362	2004	3	1	35,377	4,740	0,0	2,7	JEBHA
363	2004	3	24	35,208	4,525	0,0	3,2	JEBHA
364	2004	10	15	35,291	4,749	5,5	3,7	JEBHA
365	2004	11	7	35,375	4,699	14,0	3,1	JEBHA
366	2004	11	26	35,082	4,643	26,5	3,6	JEBHA
367	2004	3	8	35,449	5,617	62,4	2,6	K.DES AROUSS
368	2004	1	7	35,189	5,939	13,1	3,4	KSAR EL KEBIR
369	2004	2	10	35,145	5,928	38,6	3,7	KSAR EL KEBIR
370	2004	11	24	34,932	5,630	82,7	3,2	OUEZZANE

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

371	2004	1	28	34,593	5,238	10,0	2,8	TAFRANNT
372	2004	2	16	34,640	5,246	9,3	4,1	TAFRANNT
373	2004	1	21	34,552	5,386	5,4	4,0	TEROUAL
374	2004	1	21	34,586	5,339	1,6	4,5	TEROUAL
375	2004	1	30	34,651	5,492	3,5	4,0	TEROUAL
376	2004	2	16	34,625	5,306	10,9	3,9	TEROUAL
377	2004	10	1	34,679	5,258	8,3	3,1	TEROUAL
378	2005	1	4	35,915	4,859	46,3	4,7	ALBORAN
379	2005	1	27	35,717	4,627	98,7	2,8	ALBORAN
380	2005	2	27	35,852	4,931	0,0	1,8	ALBORAN
381	2005	3	16	35,857	4,639	91,1	2,1	ALBORAN
382	2005	3	27	35,997	4,706	80,0	1,8	ALBORAN
383	2005	4	30	35,598	4,723	3,6	1,6	ALBORAN
384	2005	5	7	35,765	4,795	75,8	1,5	ALBORAN
385	2005	5	7	35,830	4,799	59,1	2,7	ALBORAN
386	2005	5	17	35,715	4,539	106,1	2,1	ALBORAN
387	2005	7	7	35,849	4,729	87,3	2,5	ALBORAN
388	2005	7	9	35,509	4,517	0,0	1,9	ALBORAN
389	2005	7	22	35,957	4,814	92,6	2,4	ALBORAN
390	2005	7	23	35,609	4,712	13,3	2,1	ALBORAN
391	2005	7	26	35,626	4,747	92,1	1,9	ALBORAN
392	2005	8	4	35,728	4,610	85,7	2,3	ALBORAN
393	2005	8	8	35,709	4,682	82,2	2,8	ALBORAN
394	2005	8	23	35,712	4,673	62,1	3,2	ALBORAN
395	2005	10	6	35,589	4,587	98,7	2,5	ALBORAN
396	2005	10	13	35,811	4,548	86,4	2,2	ALBORAN
397	2005	10	27	35,577	4,731	0,0	2,4	ALBORAN
398	2005	11	17	35,642	4,549	88,8	2,2	ALBORAN
399	2005	7	14	34,927	5,841	59,1	3,0	ARBAOUA
400	2005	8	13	34,948	5,219	13,0	2,0	BENI AHMED
401	2005	1	3	35,716	4,999	56,9	3,5	BOU AHMED
402	2005	1	26	35,689	4,762	68,9	3,4	BOU AHMED
403	2005	10	19	35,447	4,922	13,4	2,2	BOU AHMED
404	2005	1	2	35,039	5,397	8,4	3,3	CHEFCHAOUEN
405	2005	3	24	34,585	5,569	13,8	3,8	HAD KOURT
406	2005	7	9	34,614	5,679	19,4	3,8	HAD KOURT
407	2005	5	1	35,228	4,636	13,5	2,0	JEBHA
408	2005	7	6	35,127	4,592	16,4	4,1	JEBHA
409	2005	7	6	35,114	4,534	17,3	3,3	JEBHA
410	2005	7	6	35,491	4,578	0,0	1,7	JEBHA
411	2005	7	9	35,463	4,720	55,8	2,0	JEBHA
412	2005	8	6	35,374	4,697	27,6	1,6	JEBHA
413	2005	8	26	35,422	4,506	0,0	1,4	JEBHA
414	2005	5	27	35,030	5,975	7,1	3,6	K.EL KEBIR
415	2005	7	9	34,981	4,626	20,2	2,2	KETAMA

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

416	2005	11	8	34,990	4,686	14,0	2,3	KETAMA
417	2005	9	27	35,203	5,903	19,0	4,1	KSAR EL KEBIR
418	2005	5	26	34,605	5,877	59,0	4,2	M.BEL KSIRI
419	2005	7	14	34,563	4,795	92,2	3,6	RHAFAI
420	2005	11	16	35,354	5,137	69,1	3,3	TALEMBOTE
421	2005	6	29	34,502	4,564	1,4	2,6	TAOUNATE
422	2005	7	9	34,796	5,463	0,0	3,0	ZOUMI
423	2005	9	11	34,988	5,433	19,6	1,1	ZOUMI
424	2006	5	11	35,327	4,961	85,4	3,5	AFIRKANE
425	2006	2	10	35,708	4,626	79,6	2,8	ALBORAN
426	2006	3	3	35,747	4,694	78,5	3,0	ALBORAN
427	2006	3	6	35,858	4,833	78,7	2,4	ALBORAN
428	2006	3	16	35,774	4,629	98,0	2,0	ALBORAN
429	2006	4	5	35,879	4,779	80,4	2,3	ALBORAN
430	2006	4	21	35,685	4,702	86,4	2,0	ALBORAN
431	2006	4	25	35,772	4,695	76,7	2,8	ALBORAN
432	2006	5	9	35,740	4,586	83,4	2,3	ALBORAN
433	2006	6	4	35,694	4,720	78,6	2,2	ALBORAN
434	2006	6	9	35,331	4,580	32,6	2,1	ALBORAN
435	2006	6	14	35,704	4,706	79,9	2,5	ALBORAN
436	2006	6	17	35,996	4,870	64,3	2,4	ALBORAN
437	2006	8	15	35,767	4,729	108,0	3,0	ALBORAN
438	2006	8	25	35,587	4,618	80,0	2,1	ALBORAN
439	2006	8	27	35,842	4,611	66,0	3,0	ALBORAN
440	2006	10	3	35,631	4,659	5,3	3,4	ALBORAN
441	2006	11	3	35,740	4,742	74,5	2,0	ALBORAN
442	2006	11	16	35,819	4,590	91,7	2,4	ALBORAN
443	2006	11	25	35,555	4,578	85,4	2,3	ALBORAN
444	2006	12	12	35,435	4,773	0,0	2,2	ALBORAN
445	2006	12	24	35,847	4,564	95,3	1,9	ALBORAN
446	2006	12	25	35,384	4,760	0,0	2,0	ALBORAN
447	2006	3	8	35,248	4,772	70,3	3,8	BAB BERRET
448	2006	5	21	35,485	4,774	71,6	3,6	BOU AHMED
449	2006	1	5	34,576	5,677	1,8	3,4	HAD KOURT
450	2006	1	5	34,556	5,703	1,1	3,5	HAD KOURT
451	2006	1	29	34,687	5,688	14,8	3,1	HAD KOURT
452	2006	3	4	35,491	4,651	0,0	2,0	JEBHA
453	2006	3	6	35,365	4,619	26,8	2,5	JEBHA
454	2006	5	6	35,210	4,713	45,5	1,7	JEBHA
455	2006	7	2	35,000	4,584	23,0	2,9	JEBHA
456	2006	10	11	35,306	4,627	5,0	4,3	JEBHA
457	2006	7	18	35,440	5,612	21,9	2,5	K.BENI AROUSS
458	2007	1	6	35,250	5,074	46,2	1,4	TALEMBOTE
459	2008	1	5	35,8242	4,6903	78,16	2,9	ALBORAN
460	2008	2	23	35,698	4,7163	8	2	ALBORAN

*LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN DANS LA PROVINCE DE CHEFCHAOUEN
ANALYSE SPATIALE, MODELISATION PROBABILISTE MULTIECHELLE & IMPACTS SUR L'AMENAGEMENT ET L'URBANISME*

461	2008	3	25	35,5576	4,5531	108,6	1,9	ALBORAN
462	2008	4	29	35,6093	4,5852	83,1	2,4	ALBORAN
463	2008	5	8	35,9735	4,7563	74	2,7	ALBORAN
464	2008	7	23	35,5832	4,6373	77,8	2,5	ALBORAN
465	2008	7	28	35,8618	4,7265	80,8	2,8	ALBORAN
466	2008	8	4	35,5133	4,5753	7,2	2	ALBORAN
467	2008	8	7	35,8328	4,6265	90,1	2,1	ALBORAN
468	2008	8	8	35,6428	4,7207	67,5	2,8	ALBORAN
469	2008	8	13	35,7232	4,6647	77,5	2,3	ALBORAN
470	2008	8	21	35,8615	4,576	82,3	1,9	ALBORAN
471	2008	8	26	35,6355	4,64	65,4	2,8	ALBORAN
472	2008	8	26	35,8	4,7167	91,9	2,6	ALBORAN
473	2008	9	21	35,8462	4,647	102,98	1,9	ALBORAN
474	2008	11	26	35,8247	4,7173	15	3,3	ALBORAN
475	2008	12	29	35,6243	4,6517	72,4	2,2	ALBORAN
476	2008	6	13	35,0352	4,7743	10	3,7	BAB BERRET
477	2008	4	14	35,5173	4,7743	42,1	2,2	BOU AHMED
478	2008	12	11	35,4907	4,9485	14,2	1,9	BOU AHMED
479	2008	2	18	34,5187	5,5837	9,8	3,2	HAD KOURT
480	2008	9	23	34,594	5,5397	30	2,3	HAD KOURT
481	2008	4	4	35,3918	4,622	63,3	2,7	JEBHA
482	2008	7	4	35,1987	4,557	10	2,1	JEBHA
483	2008	8	26	35,1855	4,622	10	2,1	JEBHA
484	2008	11	28	35,4387	4,6148	72,9	3,3	JEBHA
485	2008	5	13	35,2608	5,6363	112,4	1,3	K. DES AROUSS
486	2008	10	31	34,792	5,40933	1,8	1,9	ZOUMI

Résumé

L'aléa géologique présente un axe de recherche en développement constant, les zones habitées étant de plus en plus envahissantes et les exigences pour la maîtrise des aléas étant de plus en plus fortes. Les zones de montagne sont parmi les régions concernées par différents types d'aléas. Cette étude s'est attachée à l'évaluation de la composante spatiale ou Susceptibilité de l'aléa Mouvements de terrain (MT) qui constituent l'aléa le plus important dans le Rif Nord – Ouest, Maroc. Ce travail présente une procédure en trois étapes pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrains (SMT). Neuf paramètres disponibles de prédisposition du milieu géologique (lithologie, fracturation, sismicité, gradient de pente, hypsométrie, exposition des versants, réseau hydrographique, précipitations, et occupation des sols) ont été cartographiés et hiérarchisés dans le but de mieux comprendre leurs interrelations et leurs effets respectifs dans la genèse des MT. Ensuite, la classification, l'inventaire, la description et l'analyse des MT ont été réalisés par interprétation d'images satellitaires THR associée à un travail de terrain. Enfin, la SMT a été évaluée par l'utilisation d'une approche multi-échelle (petite = 1/100 000^{ème}, moyenne = 1/50 000^{ème}, grande = 1/5000^{ème}). A petite échelle, cette évaluation a été effectuée par la combinaison de cartes d'index (CCI) où les poids et les pondérations pour chaque paramètre ont été introduits en se basant sur les données statistiques réelles afin de réduire l'aspect subjectif de la méthode. A une échelle moyenne, cette évaluation a été effectuée par l'application et la comparaison de deux approches probabilistes. Il s'agit - de l'approche bivariée de la théorie de l'évidence, et, - de l'approche multivariée des régressions logistiques ; cette seconde approche s'est avérée la plus performante à prédire la SMT à cette échelle, dans un environnement montagneux maghrébin. A grande échelle, cette évaluation a été effectuée par zonage géomorphologique effectué directement sur le terrain et puis finalisé grâce à la vision synoptique que confère l'imagerie satellitaire THR. Les différentes cartes réalisées constituent un puissant outil d'aide à la décision pour présenter, comparer et discuter des scénarios d'aménagement du territoire : aménagements urbains, ouvrages ou tracés routiers. Ces résultats s'inscrivent dans le cadre du développement durable et permettront d'atténuer les impacts socio-économiques habituellement constatés, lors de déclenchement des MT.

Mots clés : mouvements de terrain, susceptibilité, cartographie, combinaison de cartes d'index, théorie de l'évidence, régressions logistiques, analyse spatiale, SIG, modélisation probabiliste, multi-échelle, aménagement et urbanisme, le Rif, Maroc, Nord de l'Afrique.

Abstract

Geological hazards represent a research topic that is in constant development. Populated areas are ever expanding and the requirements for the control of the hazards they represent are becoming increasingly significant. Orogenic zones are among the areas affected by different types of hazards. This study focuses on the evaluation of the spatial component of the mass movement (MM) hazard which is the most common hazard in the Northwest part of the Rifain belt in Morocco. It introduces a three-step procedure to assess mass movement susceptibility (MMS). Nine contextual variables that characterize the geological environment (lithology, fracturing, seismicity, slope gradient, elevation, aspect, stream's net, precipitation and land-use) were mapped and classified in order to better understand their interrelationships and their respective effects in the onset of MM. Following this, the classification, inventory, description and the analysis of the MM were carried out by interpretation of high remote sensing data associated to the field study. Finally, MMS was assessed using a multi-scale approach (small = 1/100,000 ; mean = 1/50,000 ; large = 1/5,000). At the small scale, this assessment was carried out using an index-based approach where the rating and weighting of each parameter was introduced based on real statistical data to reduce the subjectivity of the method. At the meso-scale, this evaluation was performed by applying and comparing two probabilistic approaches. These are: (i) the bivariate weights of evidence approach (WEOA), and (ii) the multivariate logistic regression approach (LRA). LRA proved most successful in predicting MMS at the meso-scale in a North African mountain environment. At the large scale, the evaluation was conducted by geomorphological zoning during the field study and finalized by a synoptic view conferred by high remote sensing imagery. The various maps produced constitute a powerful decision-making tool to present, compare and discuss scenarios of town and land-use planning, i.e. urban planning, works or road plans. These results are part of a sustainable development framework which allows to mitigate the socioeconomic impacts that are usually noticed during the release of MM.

Key words: mass movement, susceptibility, mapping, index-based approach, weights of evidence, logistic regression, spatial analysis, probabilistic modeling, multi-scale, urbanism and land-use planning, Rifain orogen, Morocco, North Africa.