

THESE

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

Centre de Recherche : Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable (CERNE2D)

Structure de Recherche : Laboratoire de Géosciences Eau et Environnement (L-G2E)

Discipline : Sciences de la Terre et de l'Univers

Spécialité : Géomatique, Vulnérabilité et Risques naturels

Présentée et soutenue le 22/07/2023 par :

Mohamed RFIFI

Démarches d'expertise pour la réduction des risques de mouvement de terrain et la vulnérabilité associée. Cartographie à différentes échelles, appliquée à la région d'Al Hoceima

JURY

Ilias KACIMI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat	Président
Mohammed SAADI	PH, Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat	Rapporteur, Examineur
Mohamed HILALI	PES, Faculté Sciences, Université Moulay Ismail - Meknès	Rapporteur, Examineur
Larbi BOUDAD	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat	Rapporteur, Examineur
Lahcen AIT BRAHIM	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V – Rabat	Co-Encadrant
Tarik BAHAJ	PH, Faculté des Sciences, Université Mohammed V - Rabat	Encadrant

Année Universitaire : 2022-2023

Dédicaces

Les mots les plus simples étant les plus forts, j'adresse toute mon affection à ma famille, et en particulier à **mon père et ma mère** qui m'ont fait comprendre que la vie n'est pas faite que de problèmes qu'on pourrait résoudre grâce au travail. Malgré les conditions d'éloignement depuis quelques années, leur encouragement, leur confiance, leur amour me portent et me guident tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Merci à **ma femme RAJAE**, pour l'encouragement, les sacrifices, l'amour, le bonheur et la tendresse.

Merci à **mes sœur MANAL et MARWA**.

A mes petits cadeaux, **mes petits-enfants ZAYNAB, ADAM et IYAD**, mes sources de joie et d'innocence.

À mes parents : Aucune phrase, aucun mot, ne saura exprimer ma reconnaissance et amour que je vous porte. Vos sacrifices, vos encouragements, vos conseils tout au long de mes années d'études m'ont été d'un grand soutien.

Je remercie aussi mes proches de leur présence, de leur amitié, de leur encouragement, de tout ce qu'ils ont fait pour moi. Mes sœurs, mes frères, femme, ami(e)s, c'est grâce à vous que j'ai pu finir ce travail, je vous remercie profondément.

À vous tous et à tous ceux que je ne nomme pas, mais qui se reconnaîtront.

Remerciements

Cette thèse a été initiée au sein de la structure de recherche **GEORISK (Risques Géologiques, Télédétection et Environnement)** de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat ; sous la direction du professeur **Lahsen AIT BRAHIM**, de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2016 à 2018. Par la suite au sein **du Centre Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable (CERNE2D)** et le **Laboratoire de Géosciences Eau et Environnement (L-G2E)** sous la direction du professeur **Abdellah ABDELOUAFI** (Rahimah Allah), de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat de 2019 à 2021 et le professeur **Tarik BAHAJ** de la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de 2022 à 2023 et Monsieur **Lahsen AIT BRAHIM** professeur, retraité a assuré la Codirection de ma thèse de 2019 à 2023.

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

C'est avec une vive émotion que je vous remercie de m'avoir accueilli et proposé ce sujet grâce auquel j'ai pu découvrir le monde très diversifiée et multidisciplinaire de la gestion des risques géologiques. Je vous remercie d'avoir dirigé avec rigueur mes travaux de terrain et de laboratoire. Vous m'avez fait part de votre grande expérience dans le domaine de la gestion des risques d'instabilité de terrain et surtout de la vulnérabilité du bâti et leur relation avec la réalité du terrain. Je vous remercie de m'avoir soutenu dans les moments les plus difficiles. Vos conseils, votre rigueur, votre abnégation et votre disponibilité à tout moment malgré vos nombreuses préoccupations scientifiques m'ont beaucoup aidé et ont largement contribué à ma formation dans le domaine de la vulnérabilité sismique du bâti (combien très complexe du part les paramètres à prendre en considération et l'impact de ses résultats dans le domaine socio-économique) et à la réalisation de ce travail (en toute liberté et autonomie). Je réitère mes remerciements pour les efforts déployés pour faire aboutir mes articles dans des revues indexées Scopus. Au chercheur, à l'homme, veuillez trouver dans ces quelques mots : ma reconnaissance, ma gratitude, ma très haute considération et ma profonde estime.

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

Je remercie Monsieur **Tarik BAHAJ**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, directeur de ma thèse de 2021 à 2023. Merci, d'avoir accepté la relève pour assurer la direction de ma thèse. Vous avez toujours manifesté un intérêt envers ce travail. Je vous remercie de vos encouragements pour faire aboutir ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma très haute considération.

Je remercie Monsieur **Ilias KACIMI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences, Université Mohammed V de Rabat, Président du jury., Responsable du laboratoire de Géosciences Eau et Environnement (L-G2E). Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre et de l'hydrogéologie et de la géomatique. Je vous remercie pour l'honneur que vous me faites en acceptant d'être Président de mon Jury. Je vous adresse mes respects et mes sincères remerciements.

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

Je remercie Monsieur **Mohammed HILALI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences Université Moulay Ismail, Meknes. Rapporteur et examinateur. Eminent spécialiste dans le domaine des sciences de la terre, de l'hydrogéologie et de la géomatique. Merci, pour vos conseils ; vos remarques lors de l'évaluation du

présent travail. Je vous remercie chaleureusement d'avoir accepté de juger ce travail. Votre présence dans ce jury, m'honore énormément.

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

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

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

J'adresse toute ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce travail. Je remercie toutes les personnes formidables que j'ai rencontrées par le biais du travail au sein de l'équipe GEORISK. Merci pour votre support et votre partage constructif. Je pense particulièrement à tous les membres de l'équipe et les acteurs du projet de recherche. Je ne saurais terminer sans remercier toutes ces personnes dans l'ombre dont la contribution à mon travail est non négligeable, mes ami(e)s, collègues et l'ensemble du personnel de la Faculté des sciences de Rabat.

RESUME

Au Maroc, les dommages associés aux risques naturels sont d'autant plus lourds pendant les dernières décennies en raison de plusieurs.

Les approches possibles pour gérer le risque associé aux phénomènes naturelles se multiplient et les résultats retrouvés s'affranchir à des limites : typologie de la donnée, disponibilité et coût de production, précision et fiabilité, fréquence de production et circuit de mise à jour, étendu de la zone étudiée/échelle de production cartographique, événements historiques de l'aléa/risque et objectifs de l'étude.

L'exemple concret du choix de l'approche d'expertise des risques est celui des Cartes d'Aptitudes à l'Urbanisation (CAU), qui se généralisent à l'échelle des provinces/préfectures du Maroc. Le choix de l'approche d'expertise adéquate impose encore une réflexion et recherche pour l'adéquation de la démarche à la base de données disponible, la sélection des données en fonction de leur échelle disponible et l'échelle attendue en production cartographique des résultats, tout en restant conforme à des questions du cout, enjeux existants du territoire, dimension humaine, pression de l'action d'aménagement et construction en descendant des petites échelles (projets intercommunaux) aux grandes (projet d'infrastructure communale et locale) et très grandes échelles (projets urbanistiques de construction ...).

L'objectif principal de ce travail de recherche était tout d'abord l'établissement d'un état de l'art des différentes démarches d'expertise en matière d'évaluation et cartographie de l'aléa, la vulnérabilité et le risque résultant. La synthèse a permis de mener des expertises adéquates aux spécificités de la région d'Al Hoceima, suivant trois niveaux d'échelle : de la région, de la ville et du quartier en intégrant la dimension la plus petite du projet urbain par intégration de données multiples sous l'environnement des systèmes d'information géographique (SIG) : géologie, géotechnique, sismicité, failles actives, hydrogéologie, géomorphologie, topographie et occupation du sol.

MOTS-CLES : Instabilité de terrain, vulnérabilité socioéconomique, risque, Carte d'Aptitude à l'Urbanisation (CAU), cartographie, démarche, expertise, Système d'Information Géographique (SIG), Al Hoceima, Maroc.

Abstract

In Morocco, the damage caused by natural hazards has become increasingly severe in recent decades.

The possible approaches to manage the risk associated with natural phenomena are multiplying, and the results obtained are subject to several limitations: Type of data, availability and cost, accuracy and reliability, frequency and updating, extent of the studied area and its mapping scale, historical events and objectives studied.

A concrete example of risk assessment approaches is the production of Urbanization Suitability Maps, which are being generalized across Morocco's to provide territories with a set of regulatory prescriptions and technical guidance measures.

The choice of the right expert approach requires further thought and research to ensure that the approach is suited to the available database, the type of data and the available scale, while remaining consistent with issues of cost, existing issues in the territory, the human dimension, and the pressure of planning and construction action, from small scale (inter-communal projects) to large scale (local and municipal infrastructure projects) and very large scale (urban construction projects, etc.).

The bibliographical study enabled us to carry out expert assessments appropriate to the Al Hoceima region, at three levels of scale: regional, city and neighborhood, integrating the smallest dimension of the urban project. The approaches applied to the production of risk-reduction maps combine a large set of data that highlight the combined effect of several factors (geology, geotechnics, seismicity, active faults, hydrogeology, geomorphology, topography and land use) that contribute to the triggering of instabilities in the region. The study sets out to assess, evaluate and map the ground instabilities identified in the area at different scales, using recent data, appropriate methods and the functionalities of geographic information systems (GIS). Hazard assessment methods are adapted to the specific features of the Al Hoceima area (Eastern Rif, Morocco).

KEYWORDS: Terrain instability, socioeconomic vulnerability, risk, urbanization suitability map, mapping, approach, expertise, Geographic Information System (GIS), Al Hoceima, Morocco.

ملخص

في المغرب، أصبحت الأضرار المرتبطة بالمخاطر الطبيعية أكثر حدة في العقود الأخيرة. وبالفعل، أظهر عدد من الكوارث الطبيعية مدى الأضرار التي لحقت بالأشخاص والممتلكات، وهو وضع أصبح أكثر حدة مع النمو السكاني، التوسع الحضري غير المنضبط في المناطق عالية المخاطر، هشاشة البنية التحتية، غياب عنصر المخاطر في الاستراتيجيات القطاعية وأدوات التخطيط والإدارة المكانية.

تتكاثر المقاربات الممكنة لإدارة المخاطر المرتبطة بالظواهر الطبيعية، وتخضع النتائج التي يتم التوصل إليها لعدد من القيود: تصنيف المعلومات، تكلفة إنتاجها، دقتها وموثوقيتها، دورية الإنتاج ومراحل التحديث، مدى المنطقة المدروسة/مقياس إنتاج الخرائط، والأحداث التاريخية للمخاطر وأهداف الدراسة.

ومن الأمثلة الملموسة على اختيار نهج لإعداد خبرة للمخاطر هو خرائط المناطق المفتوحة للتعمير، والتي يجري تعميمها في جميع أنحاء الأقاليم/العمالات في المغرب لتزويدها بوثائق ودراسات تنظيمية (مناطق ذات مستوى أخطار بدرجات متفاوتة + تدابير التوجيه التقني والفتي في مرحلة التطوير والبناء) في إطار خرائط رقمية مدمجة في الدراسات الخاصة بإعداد وثائق التنمية الحضرية والتخطيط والإدارة المحلية.

يتطلب اختيار نهج لإعداد خبرة للمخاطر مزيداً من التفكير والبحث في مدى ملاءمة النهج لقاعدة البيانات المتاحة، واختيار البيانات وفقاً لنطاقها المتاح، حجم المعطيات، تكلفة البيانات، ومشاكل البعد المجالي والبشري، وضغط أعمال التخطيط والبناء حسب سلم المشاريع (مشاريع بناء صغيرة) إلى النطاقات الكبيرة (مشاريع البنية التحتية المجتمعية والمحلية) والنطاقات الكبيرة جداً (مشاريع البناء الحضري، التوسيع العمراني...).

كان الهدف الرئيسي من هذا العمل البحثي هو أولاً ضبط مناهج إعداد خبرة للمخاطر وإنجاز خرائط تنطبق للمخاطر الطبيعية الناتجة. تمكنا هذه المرحلة من تحليل السمات المحددة لكل طريقة (النوع: تجريبي، حتمي، إحصائي/احتمالي؛ قاعدة البيانات المتدخلة؛ طريقة إعداد الخرائط النوعية/الكمية؛ مقياس الإنتاج المناسب؛ مستوى الدقة...).

وقد أتاحت هذه التقنية الحديثة إجراء تقييمات مصممة خصيصاً للخصائص المحددة لمنطقة الحسيمة، على ثلاثة مستويات من المقياس: الإقليم والمدينة والمقاطعة/الحي، مع دمج أصغر بعد: المشروع الحضري. تجمع المناهج المطبقة في إنتاج خرائط الحد من المخاطر بين مجموعة كبيرة من البيانات التي تبين التأثير المشترك لعدة عوامل (الجيولوجيا، والجيوتقنية، والزلزالية، والصدوع النشطة، والجيولوجيا المائية، والجيومورفولوجيا، والطبوغرافيا، وتصاميم استغلال المجال = تصاميم الاسترداد) التي تساهم في عدم الاستقرار في المنطقة. وتحدد الدراسة إجراءات تقييم واعداد الخرائط لحالات عدم استقرار الأرضي التي تم تحديدها في المنطقة على نطاقات مختلفة، باستخدام بيانات حديثة وإجراءات مناسبة وبالاعتماد على وظائف نظم المعلومات الجغرافية. تم تكييف أساليب تقييم المخاطر مع السمات الخاصة بمنطقة الحسيمة (الريف الشرقي للمغرب).

كما تمت دراسة عنصر الهشاشة لكل حالة من حالات عدم الاستقرار باستخدام مناهج اجتماعية واقتصادية وبشرية، من خلال رسم الخرائط وفقاً لبيانات استخدام الأراضي بأبعاد الدقيقة. كما تم تقييم المخاطر الإجمالية الناجمة عن التحركات الأرضية من خلال الجمع بين خرائط الأخطار وقابلية التأثير.

وتخصص هذه الدراسة أيضاً جزءاً مهماً لوصف البيانات المطلوبة لتقييم المخاطر المرتبطة بعدم الاستقرار الأرضي، وإجراءات استخراج الأبعاد وإجراءات التحقق من ملاءمتها فيما يتعلق بطبيعة وحجم المشاكل القائمة.

الكلمات المفاتيح: عدم استقرار الأرضي، الهشاشة الاجتماعية والاقتصادية، المخاطر، خريطة المناطق المؤهلة للتعمير، اعداد الخرائط، المناهج، الخبرة، نظام المعلومات الجغرافية، الحسيمة، المغرب.

LISTE DES COMMUNICATIONS

- Colloque international MORGEO 2017 « technologie géo-spatiale : Application et perspectives », 16 et 17 Mai, EHTP – Casablanca, Maroc ;
« Pertinence des démarches d'élaboration des Cartes d'Aptitudes à l'Urbanisation (CAU), confrontation à l'étude de vulnérabilité localisée » ;
- Second Congrès international de l'AMSR 2017, 12 Octobre, INAU – Rabat, Maroc ;
« Catastrophes naturelles et aménagement du territoire : Cadrage et état actuel au Maroc » ;
- 2^{ème} Congrès International Matériaux & Stabilité Structurale CMSS2017, 21 au 24 Novembre, EMI – Rabat, Maroc ;
« Evaluation qualitative et quantitative du risque mouvement de terrain à une échelle cartographique urbaine. Exemple de QUEMADO (Rif, Maroc) » ;
- 2nd General Assembly of the African Seismological Commission 2AfSC2018, 25 April, FSTH - Al Hoceima, Maroc.
« Application of CRISIS code to assess the seismic hazard in the Eastern Rif of Morocco » ;
- 4^{ème} Edition du Colloque International des Utilisateurs des SIG (GIS USERS 2018), 20 au 21 Décembre, UMI – Meknès, Maroc ;
« Cartographie des propices à l'implantation des équipements publics, contribution du SIG à la planification de l'espace urbain de la ville d'Al Hoceima ».

LISTE DES PUBLICATIONS

- **RFIFI Mohamed, AIT BRAHIM Lahsen (2017)**, Evaluation du risque "glissement de terrain" par analyse probabiliste : application au rif oriental du Maroc. **AMERICAN JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH AND APPLIED SCIENCES**. N° 5(5), pp. 319-325. <https://www.american-jiras.com/Rfifi-ManuscriptRef.3-ajira031017.pdf>
- **RFIFI Mohamed, AIT BRAHIM Lahsen (2018)**, Evaluation qualitative et quantitative du risque 'mouvement de terrain' à une échelle cartographique urbaine. Cas du versant QUEMADO, Rif oriental du Maroc (Qualitative and quantitative evaluation of the ground movement risk on an urban cartographic scale. Example of QUEMADO, Eastern Rif, Morocco). **MATEC Web of Conferences N°149, pp.02039 (2018)** <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902039>
- **RFIFI Mohamed, AIT BRAHIM Lahsen (2018)**, Evaluation probabiliste du risque glissement de terrain - Application auRif oriental du Maroc (Probabilistic Landslide risk assessment - Application to Eastern Rif, Morocco). **MATEC Web of Conferences N°149, pp. 02081 (2018)**. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902081>
- **RFIFI Mohamed, AIT BRAHIM Lahsen (2018)**, Dynamique d'artificialisation et gestion des zones côtières. Cas d'étude appliqué à la méditerranée d'Al Hoceima, Rif oriental du Maroc. **AMERICAN JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH AND APPLIED SCIENCES**. 6(3): 117-130. <http://www.american-jiras.com/Rfifi-ManuscriptRef.2-ajira010218.pdf>
- **RFIFI Mohamed, AIT BRAHIM Lahsen (2018)**, Bivariate Analysis of Susceptibility and Vulnerability to Mass Movements: A Case Study from Al Hoceima (Eastern Rif of Morocco), **INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY**, 9(5), pp. 534–548. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=5>
- **RFIFI Mohamed, RFIFI Saad, ELBOUHALI Rajae, AIT BRAHIM Lahsen, ABDELOUAFI Abdellah (2020)**, Implementation of public facilities by mapping the favorable sites; contribution of the GIS to the urban space planning. Case of AL HOCEIMA city, Morocco. **International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET) Volume 11, Issue 3, March 2020, pp. 344-359, Article ID: IJARET_11_03_030 (PDF)**

LISTE DES ABREVIATIONS

BRGM	: BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES
BD	: BASE DE DONNEES
CAU	: CARTE D'APTITUDE À L'URBANISATION
CEP	: COEFFICIENTS D'ENDOMMAGEMENT POTENTIEL
CRESP	: CENTRE DE RECHERCHE EN EPIDÉMIOLOGIE ET SANTÉ DES POPULATIONS
CNRTS	: CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE TECHNIQUE ET SCIENTIFIQUE
CREC	: CENTRE DE RECHERCHE SUR L'ÉPISTÉMOLOGIE DES CATASTROPHES
DSI	: DEMOGRAPHIC AND SOCIAL INDEX
FCN	: FONDS DES CALAMITÉS NATURELLES
FLECN	: FONDS DE LUTTE CONTRE LES EFFETS DES CATASTROPHES NATURELLES
FSPSPC	: FOND SPÉCIAL POUR LA PROMOTION ET LE SOUTIEN DE LA PROTECTION CIVILE
HCEFLCD	: HAUT-COMMISSARIAT AUX EAUX ET FORÊTS ET À LA LUTTE CONTRE LA DÉSSERTIFICATION
HCP	: HAUT COMMISSARIAT AU PLAN
IGN	: INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL
INSAR	: INTERFEROMETRIC SYNTHETIC APERTURE RADAR
GPS	: GLOBAL POSITIONING SYSTEM
MNE	: MODÈLES NUMÉRIQUES D'ÉLÉVATION
MNT	: MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN
MSK	: MEDVEDEV-SPONHEUER-KARNIK
PA	: PLANS D'AMENAGEMENT
PDAR	: PLANS DE DEVELOPPEMENT DES AGGLOMERATIONS RURALES
PPRN	: PLANS DE PRÉVENTION DES RISQUES NATURELS
PRI	: PREPARATION AND RESPONSE INDEX
RGPH	: RECENSEMENT GÉNÉRAL DE LA POPULATION ET DE L'HABITAT 2014
RTK	: REAL TIME KINEMATIC
SAIF	: SPATIAL ARCHIVE AND INTERCHANGE FORMAT
SASW	: SPECTRAL ANALYSIS OF SURFACE WAVES
SDAU	: SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT URBAIN
SDTS	: SPATIAL DATA TRANSFERT STANDARD
SGBD	: SYSTÈME DE GESTION DE BASE DE DONNÉES
SIG	: SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE
SNAT	: SCHEMA NATIONAL D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
SRAT	: SCHEMA REGIONAL D'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE
SRTM	: SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION
STI	: SECONDARY-DAMAGE-TRIGGERING INDEX
TIN	: TRIANGULATED IRREGULAR NETWORK
USGS	: UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Situation de la zone d'étude sur le fond satellitaire gratuit (OSM) selon les fonds de base SIG d'ESRI et le découpage national du Maroc officiel. (a) : Selon le découpage officiel des régions du Maroc (b) : découpage des provinces (c) : découpage des communes (limite communale d'Al Hoceima, chef-lieu de la province et ses communes limitrophes).....	23
Figure 2: Domaine Ibéro-Maghrébin - Cadre tectonique (Ousadou, F., et al., 2014)	24
Figure 3: Carte de la chaîne du Rif (modifiée d'après Negro et al., 2008)	25
Figure 4: Carte structurale simplifiée de l'arc de Gibraltar (modifiée d'après Michard et al., 2002).	26
Figure 5: Répartition de la sismicité du Maroc de 1900 à 2001 (carte CEPRIS, 2002).....	28
Figure 6 : Sismicité instrumentale entre 1973 et 2007, dans la zone de frontières entre les plaques Afrique–Ibérie–Europe d'après le catalogue de sismicité USGS (2007). Les points de couleur rouge indiquent les événements de magnitude supérieure à 2. Les points de couleur verte indiquent les séismes de profondeur supérieure à 40 km.	30
Figure 7: Mécanismes au foyer dans la région Ibéro-Maghrébine d'après Stich et al. (2003).	30
Figure 8: Séquence sismique du tremblement de terre d'Al Hoceima 2004. Dorbath et al. (2005).....	31
Figure 9: Mécanismes au foyer du choc principal et des répliques du tremblement de terre d'Al Hoceima 2004 d'après les différents centres sismologiques (in Jabour et al. (2004)).	32
Figure 10: Principaux types de dommages des constructions en milieu rural dans la région d'Al Hoceima affectée par le séisme du 24 Février 2004. Murphy Corrella (2006).....	33
Figure 11: Principaux types de dommages des constructions en milieu urbain dans la région d'Al Hoceima affectée par le séisme du 24 Février 2004, d'après Murphy Corrella (2006).	33
Figure 12 - (a) : Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des failles. (b) : Tracé de quelques failles sur la carte géologique d'Al Hoceima au 50.000 ^e : faille de BOUJIBAR ; faille d'AJDIR, faille d'IMZOUREN	35
Figure 13: Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des bassins post-nappes. Modifiée d'après Suter (1980) et Jolivet et al. (2003)	36
Figure 14: Coupe de la chaîne rifaine à l'échelle crustale avec l'âge des contacts majeurs d'après les données bibliographiques, modifié d'après Michard et al. (2002)).	37
Figure 15: Cadre stratigraphique résumé du Rif oriental (NAKHCHA, 2002).	38
Figure 16: Série stratigraphique synthétique de la nappe de Quemado (Azzouz, 1992)	39
Figure 17: Série stratigraphique synthétique de la nappe de Beni Hozmar (Azzouz, 1992).....	40
Figure 18: Colonne litho-stratigraphique synthétique de la dorsale externe de la chaîne des Bokkoyas (Mouhcine, 1991)	41
Figure 19: Série stratigraphique de la nappe de Tisirène (Andrieux, 1971)	43
Figure 20: Carte de faciès simplifiée du bassin d'étude sous environnement SIG	45
Figure 21: SIG de l'étude, comportant l'ensemble des couches de données à référence spatiale de la zone, après structuration, intégration et harmonisation. Couches par ordre du haut au bas : Carte des pentes, cartes des élévations (MNT), carte d'exposition, carte des fractures, occupation urbaine avec l'âge des bâtiments – format vecteur, géologie simplifiée (représentée par index) – format vecteur, sondages – format vecteur, réseau hydrographique obtenu par extraction du MNT STRM – format vecteur.	48
Figure 22: Assemblage des feuilles topographiques de la zone à l'échelle provinciale	50
Figure 23: Imagerie satellitaire de la zone à l'échelle provinciale	51
Figure 24: Feuille de restitution de la ville d'Al Hoceima, produite par photogrammétrie à l'échelle 2000e	51
Figure 25: Modèle numérique de terrain de la ville d'Al Hoceima (mission STRM)	52
Figure 26: Réseau hydrographique de la province après extraction du MNT STRM au 10m de pas	52
Figure 27: Données de l'occupation du sol de la ville d'IMZOUREN en format SIG, obtenues par restitution des images aériennes ;	53
Figure 28: Données des événements sismiques du bassin de notre étude.....	53
Figure 29: Données des failles simplifiées de la province	54
Figure 30: Sondages collectés à l'échelle de la ville et communes limitrophes (source : KHALID MARGAA, CNRST, IMSRN, projets d'aménagement à la province)	54
Figure 31: Paramètres de mesure de l'aléa	57
Figure 32: Interactions entre les facteurs de vulnérabilité	58
Figure 33: l'interaction entre les notions d'aléa et de vulnérabilité, conduisant à la définition du risque	59
Figure 34: Les facteurs d'influence sur la perception du risque	59
Figure 35: Etapes nécessaires à la construction d'un système d'information pour la gestion et prévention des risques naturels	61

Figure 36: Modèle Numérique de Terrain de la ville d'Al Hoceima (connu au mètre près) modélisé sous ArcScene (les altitudes en mètre).....	62
Figure 37: Carte de pentes en 3D, extraite du MNT de la ville d'Al Hoceima (les pentes en degrés)	63
Figure 38: Carte d'occupation du sol de de la ville d'Al Hoceima (au 1/2000e) superposée sur le MNT	63
Figure 39: Quelques définitions de la résilience.....	64
Figure 40: Facteurs de perception de la vulnérabilité et rapport avec la qualité de la réponse des individus au moment de crise.....	67
Figure 41: Niveaux décisionnels de la théorie de décision	69
Figure 42: Données historiques de la vulnérabilité des structures après le séisme d'Al Hoceima du 24/02/2004 (a) : Dommages dans les coins des bâtiments dus aux forces horizontales, (b) : Dommages au niveau du RDC dus à une répartition non uniforme des efforts sur la hauteur du bâtiment (cisaillement des poteaux), (c) ; (e) : Poteaux courts, (f) ; (d) : dommages dus à la flexibilité du plancher et à la géométrie de la structure). Source : Séisme d'Al Hoceima (Maroc) du 24 février 2004 - Rapport de la mission AFPS	70
Figure 43: Schéma conceptuel des différentes composantes et facteurs de la vulnérabilité au sens technique	71
Figure 44: Typologies des mouvements de terrain (a : Phénomène de gonflement – retrait, b : Phénomène d'affaissement du sol, c : Phénomène de tassement du sol, d : Phénomène de reptation, e : Phénomène de solifluxion, f : Phénomène de glissements plans ou translationnels). Source ORRM - Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Observatoire Régional des Risques Majeurs de Provence - Alpes - Côte d'Azur (observatoire-regional-risques-paca.fr)	73
Figure 45: Typologies des mouvements de terrain rapides et discontinus.....	75
Figure 46: rupture d'un versant naturel instable suivant un plan (Glissement plan) et suivant un arc de cercle (Glissement rotationnel). Source ORRM - Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Observatoire Régional des Risques Majeurs de Provence - Alpes - Côte d'Azur (observatoire-regional-risques-paca.fr).....	77
Figure 47: Schéma des étapes de l'évaluation et de la gestion des mouvements de terrain (d'après Dai et al., 2002, modifié par Laugier, 2002)	78
Figure 48: Méthodes d'analyse de l'aléa mouvement de terrain.....	78
Figure 49: Instabilités de terrain au niveau de la zone. Situation extraite de la carte géologique d'Al Hoceima au 50.000°	80
Figure 50: Glissement à TAOUSSART (fissuration du sol).....	81
Figure 51: Agglomération menacée par le glissement de terrains et éboulement de rochers, sis quartier Sidi Mansour, Al Hoceima.....	81
Figure 52: Affaissement et destruction de la chaussée de la route liant Al Hoceima à IZEMMOUREN.....	81
Figure 53: L'érosion continue au Quartier Mirador Haut, Al Hoceima, menace la stabilité des constructions (à gauche), Chantier clandestin en cours en dépit des dangers menaçant la stabilité du sol (à droite).	82
Figure 54: Données cartographiques de base collectés, intégrés et exploités dans le SIG de la zone d'étude (a) : données d'occupation du sol en format vectoriel, (b) : données de la géologie de la zone, (c) : données rasters relatifs à l'élévation du terrain, (d) : données vecteur du réseau hydrographique, (e): carte topographique de la zone à l'échelle 1/25000, (f) : données raster relatives aux pentes de terrain).....	83
Figure 55: Les principaux phénomènes de mouvements de terrain et les sollicitations associées ; 1 : à l'aplomb de la surface de rupture, 2 : pour la zone aval (de réception).....	87
Figure 56: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des affaissements effondrements.....	91
Figure 57: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des éboulements et chutes de blocs	91
Figure 58: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des glissements de terrain.....	92
Figure 59: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des ravinelements	92
Figure 60: Lithologie pondérée pour l'aléa affaissement effondrement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa affaissement effondrement)	95
Figure 61: Lithologie pondérée pour l'aléa éboulement chute de blocs (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa éboulement chute de blocs).....	96
Figure 62: Lithologie pondérée pour l'aléa glissement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa glissement).....	96
Figure 63: Lithologie pondérée pour l'aléa ravinement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa ravinement).....	97
Figure 64: Carte des élévations hiérarchisées (MNT) provenant des données STRM mondiales au pas de 15m.....	97
Figure 65: Carte des pentes hiérarchisées obtenue par traitement du MNT.	98
Figure 66: Carte hiérarchisée de fracturation avec les zones d'influence (exemple = zone 1 représentée en vert : influence très élevée entre 50 et 200 m de distance à partir de l'axe de faille ; zone 6 : influence négligeable représentée en jaune = pour les territoires éloignés de l'axe de faille par plus de 300 m).	98
Figure 67: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude	99

Figure 68: Carte hiérarchisée du réseau hydrographique.....	99
Figure 69: Carte des expositions.....	100
Figure 70: Carte d'occupation du sol obtenue par exploitation de la base de données OSM	100
Figure 71: Carte du zonage géotechnique du sol. Voir les critères de classification des zones géotechniques au Tableau 10.	101
Figure 72: Carte quantitative de la susceptibilité aux glissements de terrain	103
Figure 73: Carte quantitative de la susceptibilité aux éboulements chute de blocs	104
Figure 74: Carte quantitative de la susceptibilité aux ravinements.....	105
Figure 75: Carte quantitative de la susceptibilité aux affaissements effondrements.....	106
Figure 76: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux glissements.....	108
Figure 77. Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux éboulements chutes de blocs	109
Figure 78: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux affaissements effondrements.....	109
Figure 79: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux ravinements.....	110
Figure 80: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux glissements de terrain à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA.....	111
Figure 81: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux éboulements chute de blocs à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA.....	112
Figure 82: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux affaissements effondrements à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA.....	113
Figure 83: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux ravinements à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA	114
Figure 84: Situation de la zone étudiée (a: Carte du Maroc avec le découpage administratif des régions, b: localisation de la zone - carte géologique d'Al Hoceima)	117
Figure 85: Méthodologie et cartes des paramètres utilisées dans le cadre de l'étude	117
Figure 86: Lithologie simplifiée de la zone d'étude	119
Figure 87: Caractéristiques pédologiques de la zone d'étude	120
Figure 88: Carte des pentes de la zone d'étude.....	120
Figure 89: Carte des élévations de la zone d'étude.....	121
Figure 90: Carte d'exposition de la zone d'étude	121
Figure 91: Carte du zonage géotechnique de la zone d'étude.....	122
Figure 92: Valeurs cumulées des pourcentages des instabilités (inventoriées) comparées aux valeurs de classes de susceptibilité au mouvement de terrain.....	124
Figure 93: Carte de susceptibilité au mouvement de terrain obtenue par analyse bivariée.....	125
Figure 94: Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité socioéconomique de la zone	126
Figure 95: Carte de la vulnérabilité socioéconomique de la ville d'Al Hoceima	127
Figure 96: Carte géologique et structurale montrant la structuration en damier du horst d'Al-Hoceima (d'après Azzouz et al. (2002) [6].....	129
Figure 97: (a) Surface de glissement ; (b) rejets des eaux dans le milieu naturel ; (c) et (d) : Photos des ravinements dans les marnes	130
Figure 98 : Emplacement des sondages, principaux relevés topographiques, désordres identifiés et coupes géologiques réalisées	131
Figure 99: Sondages carottés (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 et S10). Voir la carte d'implantation des sondages (Figure 98 ci-dessus).....	136
Figure 100: Coupes géologiques réalisées au niveau du la zone de BOUJIBAR (A : Coupe AA', B : Coupe BB', C : Coupe CC')	137
Figure 101: série marno-gréseuse d'âge Tertiaire déformée.....	139
Figure 102: Carte de l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs	140
Figure 103: Carte des élévations (MNT) de BOUJIBAR (en m).....	141
Figure 104: Carte des gradients de pente de BOUJIBAR (en degrés)	141
Figure 105: Carte des formations superficielles de la zone d'étude	142
Figure 106: Combinaison des paramètres de prédispositions au risque et résultats du modèle retrouvés	144
Figure 107: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain	145
Figure 108 : Carte de conséquences aux glissements de terrain	146
Figure 109 : Carte du risque global des glissements de terrain.....	146
Figure 110: Cadre géologique régional d'Al Hoceima.....	148
Figure 111: Carte de situation de la zone d'étude sur fond de la carte topographique d'Al Hoceima au 50 000e.....	149
Figure 112: Cadre morphologique du secteur d'étude	150

Figure 113: Structures et zones à risques existantes le long de la coupe (AA).....	151
Figure 114: Démarche préliminaire d'expertise du risque	152
Figure 115: Relevé cartographié des désordres de la zone QUEMADO	153
Figure 116: Relevé image des désordres de la zone QUEMADO	154
Figure 117: Suite du relevé image des désordres de la zone QUEMADO	154
Figure 118: Carte de susceptibilité qualitative aux mouvements de terrain.....	158
Figure 119: Carte des enjeux qualitatifs exposés aux mouvements de terrain.....	159
Figure 120: Carte du risque global qualitatif des mouvements de terrain.....	159
Figure 121: Carte de susceptibilité quantitative aux mouvements de terrain.....	160
Figure 122: Carte des enjeux quantitatifs exposés aux mouvements de terrain.....	161
Figure 123: Carte du risque global quantitatif des mouvements de terrain.....	161
Figure 124: Constatations et catégories spatiales de risque par investigations terrain.....	163
Figure 125: Indexes de la démarche développée par (Safeland, 2012) pour l'évaluation de la vulnérabilité	166
Figure 126: Carte des index de vulnérabilité sismique de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017) ..	167
Figure 127: Carte des dommages physiques au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)	167
Figure 128: Carte des habitants sans abri au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)	168
Figure 129: Carte des pertes financières au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017).....	168
Figure 130: Classes des zones de vulnérabilité au sens physique et socioéconomique au niveau de la ville d'AL HOCEIMA, en appliquant la démarche développée par (Safeland, 2012)	169
Figure 131: Zone d'étude des instabilités de terrain objet de la publication d'EL FAHCHOUCHE et al. (2015)	170
Figure 132: Cartes de susceptibilité classifiées par méthode de quantile selon la première combinaison (WOF M1) et la deuxième combinaison (WOF M2) ; élaborées par EL FAHCHOUCHE et al. (2015)	171
Figure 133: Cartes de susceptibilité classifiées par méthode de quantile selon la troisième combinaison (WOF M3) et la quatrième combinaison (WOF M4) ; élaborées par EL FAHCHOUCHE et al. (2015)	172

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Historique des séismes	28
Tableau 2: Récapitulatif des données disponibles au niveau de la BD SIG, de leur utilisation pour la cartographie des instabilités (au niveau de l'aléa, la susceptibilité et le risque associé), de leur importance et précautions à prendre	49
Tableau 3: Types de dommages, d'après l'échelle EMS 92.....	58
Tableau 4: Exemples d'application des SIG dans la gestion des risques naturels à une échelle locale	63
Tableau 5: Facteurs permettant la perception et l'évaluation de la vulnérabilité d'une zone menacée	68
Tableau 6: Typologies des mouvements de terrain lents et continus avec leurs caractéristiques	72
Tableau 7: Typologies des mouvements de terrain rapides et discontinus avec leurs caractéristiques	74
Tableau 8: Indices caractéristiques des glissements actifs et inactifs (CROZIER M.J., 1984).....	85
Tableau 9 : Facteurs déclenchants, sites et types d'instabilités (Talhaoui et al., 2005). Modifié	89
Tableau 10: Critère de classification des formations de la zone	101
Tableau 11: Résultats de calcul des paramètres de la courbe ROC pour le choix entre les 4 méthodes de classification	107
Tableau 12: Statistiques des glissements de terrain par continent entre la période 1903 - 2004	116
Tableau 13: Poids d'influence des facteurs de prédisposition calculés par la méthode d'analyse bivariée	123
Tableau 14: Classes de susceptibilité au mouvement de terrain	125
Tableau 15: Synthèse des résultats de la prédiction de susceptibilité	126
Tableau 16 : Variables retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité socioéconomique et ordre d'importance des classes	126
Tableau 17 : Données analysées pour l'évaluation de la susceptibilité	140
Tableau 18: Enjeux identifiés au niveau de la zone et valeurs du coefficient d'endommagement (CEP) attribuées	143
Tableau 19: Croisement de la carte de susceptibilité et la carte de dommages.....	144
Tableau 20: Paramètres de prédisposition au risque et pondérations attribuées	156
Tableau 21: Valeurs d'endommagement humaines, fonctionnelles et économiques attribuées	157
Tableau 22: Croisement des cartes de susceptibilité et d'enjeux.....	157
Tableau 23: Valeurs attribuées des enjeux.....	158
Tableau 24: Calcul des poids des paramètres de prédisposition	160
Tableau 25: Calcul des valeurs de validation de la classification	160
Tableau 26: Coefficients de pondération retrouvés par les deux approches	162
Tableau 27: Valeurs V_i pour le calcul de l'index de vulnérabilité pour des types de structures selon le projet RISK-UE	165
Tableau 28: Valeurs V_m pour le calcul de l'index de vulnérabilité pour chaque bâtiment selon le projet RISK-UE.....	165
Tableau 29: Combinaisons des paramètres de susceptibilité testées par El FAHCHOUCHE et al. (2015)	170

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS	11
LISTE DES FIGURES	12
LISTE DES TABLEAUX	16
INTRODUCTION GENERALE	20
STRUCTURE DE LA THESE	21
PREMIERE PARTIE : CADRES ET DONNEES DE L'ETUDE	22
I. CADRE SOCIOGEOGRAPHIQUE	22
II. CADRES GEOLOGIQUE ET GEODYNAMIQUE GENERAL DU DOMAINE IBERO-MAGHREBIN.....	24
1. Cadre géologique.....	25
2. Principaux domaines structuraux de la chaine du Rif.....	26
3. Cadre sismique	27
1. Séisme du 24 Février 2004	31
2. Dommages co-sismiques et observations après séisme	32
3. Structures sismogéniques repérées à l'échelle du bassin d'étude	33
III. Cadre stratigraphique – Carte des faciès	36
1. Unités internes et externes du Rif	38
2. Terrains Néogènes post-nappes	43
3. L'avant pays oriental de la chaine rifaine	44
4. CARTE DES FACIES – GEOLOGIE SIMPLIFIEE	44
IV. Mise en place d'une base de données géographique de l'étude.....	45
1. Introduction	45
2. Généralités sur les bases de données et SIG	46
V. Conclusion.....	55
DEUXIEME PARTIE : NOTIONS ET CONCEPTS DE BASE	56
I. Préambule.....	56
II. Lexique général.....	56
1. Combinaison aléa – vulnérabilité	56
2. Aléa.....	57
3. Vulnérabilité.....	57
4. Risque	59
5. Perception des risques.....	59
6. Informations géographiques	60
7. Données de risque.....	60
8. Cartographie du risque.....	61
9. Modélisation d'un phénomène (du risque)	62
10. RESILIENCE TERRITORIALE	64
11. URBANISME ET GESTION DES RISQUES.....	65
III. Mesure de la vulnérabilité	66
1. Mesure au sens traditionnel : approche qualitative	66
2. Mesure de la vulnérabilité au sens technique : approche quantitative et semi- quantitative.....	68

IV.	Généralités sur le risque mouvement de terrain.....	71
1.	Présentation du risque mouvements de terrain	71
2.	Revue de la typologie des mouvements de terrain.....	72
TROISIEME PARTIE : PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE DES INSTABILITES DE TERRAIN.....		76
I.	Introduction	76
II.	Eléments de l'étude et l'évaluation des Glissements de terrain.....	76
III.	Méthode d'analyse des mouvements de terrain.....	77
IV.	Dégâts causés par les glissements de terrain	81
V.	Cartographie de l'aléa.....	82
1.	Méthode d'analyse qualitative de l'aléa	84
2.	Méthode d'analyse quantitative de l'aléa	85
3.	Quantification de la vulnérabilité	86
4.	Synthèse.....	87
QUATRIEME PARTIE : ETUDE DE CAS, ANALYSE, RESULTATS ET CONCLUSIONS.....		89
INTRODUCTION		89
CHAPITRE I : ETUDE MULTI-ECHELLE QUALITATIVE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN DE LA PROVINCE D'AL HOCEIMA.....		90
I.	Introduction	90
II.	Typologie des instabilités recensées dans la région.....	90
III.	METHODOLOGIE PROPOSEE	93
IV.	RECONNAISSANCES DES CAS D'INSTABILITE PAR ANALYSE TERRAIN DIRECTE	93
V.	CARACTERISATION DE LA ZONE A UNE ECHELLE DE CARTOGRAPHIE ADAPTEE VIS-A-VIS L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN	93
1.	Collecte des données existantes.....	94
2.	Analyse et exploitation des données existantes	94
VI.	Conclusion.....	115
CHAPITRE II : MODELE D'EXPERTISE POUR L'ANALYSE DE LA VULNERABILITE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA VILLE D'AL HOCEIMA – A MOYENNE ECHELLE.....		116
1.	Introduction	116
2.	Objectif et méthodologie générale.....	117
3.	Topographie et contexte géologique.....	118
4.	Collecte des données et analyses	118
5.	Résultats et discussion	123
6.	Conclusion	127
CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE GLISSEMENTS DE TERRAIN AU QUARTIER BOUJIBAR – A GRANDE ECHELLE – ECHELLE LOCALE		129
1.	Introduction	129
2.	Site d'étude.....	129
3.	Description du phénomène d'instabilité et dommages reconnus	130
4.	Etude géotechnique.....	131
5.	Hydrologie et hydrogéologie du secteur de BOUJIBAR.....	138
6.	Inventaire géomorphologique des glissements	138
7.	Données de base	140
8.	Approche d'analyse du risque employée	142
9.	Résultats et interprétation	144

10. Conclusion	147
CHAPITRE IX : CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN AU VERSANT QUEMADO – A GRANDE ECHELLE – ECHELLE LOCALE –	148
1. Introduction	148
2. Terrain d'étude	148
3. Problématique.....	151
4. Objectifs de l'étude.....	151
5. Hypothèses de déclenchement des mouvements de terrain	152
6. Démarche de l'étude.....	152
7. Extraction des paramètres.....	156
8. Résultats	158
9. Discussion.....	162
10. Conclusion.....	163
CHAPITRE X : ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS	165
I. RESULTATS COMPARES AUX ETUDES SIMILAIRES EN MATIERE DE VULNERABILITE	165
II. RESULTATS EN MATIERE DE SUSCEPTIBILITE	170
OBJECTIF DU TRAVAIL	174
SYNTHESE GENERALE.....	174
RESULTATS	175
RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES	177
ANNEXES	178
REFERENCES	183

INTRODUCTION GENERALE

L'objectif de ce travail de thèse est d'adopter dans la zone d'Al Hoceima, des approches de cartographie et d'évaluation des récentes instabilités de terrain et la vulnérabilité associée, par l'utilisation de données multi-sources faisant la combinaison entre imagerie aérienne et satellitaire, modèles numériques de terrain (MNT), réseau hydrographiques, données et structures géologiques, failles actives, données géotechniques, occupation du sol, statistiques et données démographiques et socioéconomiques, reconnaissance et investigation terrain, etc. Dans un premier temps toutes les données (images, cartes, données terrain, etc.) ont été intégrées dans une base de données SIG (sous environnement ARC/INFO et QGIS), par intégration directe et par traitement approprié. Ensuite, Chaque cas d'instabilité a fait l'objet d'un travail séquentiel et méthodique.

L'étude des zones à risque de glissement et mouvement de terrain fait appel aux techniques et méthodes de cartographie numérique, traitement et analyse des données géomatiques, connaissance suffisante et interdisciplinaire des contextes de la zone étudiée (géologique, géotechnique, faille active, hydrogéologique, géomorphologique et topographique). La cartographie des instabilités de terrain et leur intégration dans les études spécialisées en matière d'urbanisme et aménagement du territoire devient très indispensable et primordial, ce qui nécessite le développement des modèles d'évaluation appropriés, qui prennent en considération la problématique d'échelle, qualité des données employées, et nature des enjeux existants.

L'accumulation des données géographiques se rapportant à la province d'Al Hoceima, justifie actuellement le recours aux technologies SIG pour évaluer et cartographier les instabilités de terrain. La présente étude apporte une contribution en matière d'évaluation des instabilités, cartographie de leur susceptibilité et vulnérabilité associée. La recherche propose des méthodologies d'étude des instabilités de terrain récentes, recensées à l'échelle de la région d'Al Hoceima, et particulièrement prédisposées à un risque important. Le travail de recherche vise à étudier avec précision les points suivants :

- Caractérisation de la province sur les plans géographique, géomorphologique, climatique, hydrologique et géologique ;
- Synthèse actualisée de l'information géographique se rapportant au territoire de l'étude, basée essentiellement sur la bibliographie et les travaux antérieurs. Les données sont intégrées dans le SIG de l'étude ;
- Identification de l'ensemble des sites d'instabilité de terrain et caractérisation des principaux facteurs de déclenchement et/ou de prédisposition ;
- Etude bibliographique des démarches d'étude et de cartographie des aléas glissements et mouvements de terrain ;
- Etude des zones d'instabilité et modélisation par l'adaptation des modèles et la cartographie de la susceptibilité et la vulnérabilité des enjeux existants. L'étude fait appel à l'ensemble des données du SIG établi (MNT, géologie, occupation du sol, géotechnique, hydrographie, hydrogéologie, faille)
- Caractérisation des facteurs primordiaux qui dominent le déclenchement des instabilités et la synthèse des résultats obtenus.

STRUCTURE DE LA THESE

La première partie de la thèse cadre l'étude, on parle du cadre sociogéographique, du cadre géologique, du cadre géomorphologique, du cadre stratigraphique, etc. Elle caractérise également la province d'Al Hoceima, les zones concernées par l'étude détaillée, expose les données utilisées et la base de données SIG mise en place.

La deuxième partie de la thèse expose les principales notions abordées dans le cadre de la thèse et nécessaires à la compréhension des objectifs de la recherche. Elle introduit le lecteur aux concepts de vulnérabilité appliqués aux risques naturels en milieu urbain et périurbain. Il présente également les démarches d'appréhension de la vulnérabilité, au sens traditionnel et technique, au sens qualitatif et quantitatif. Comme nous étudions les risques naturels, une partie introduite des généralités sur les le risque des mouvements de terrain et les effets dommageables engendrés.

La troisième partie de la thèse se focalise principalement sur les problématiques liées aux instabilités de terrain. Nous présentons dans un premier temps les problèmes posés par les instabilités, les facteurs de prédisposition/de déclenchement, les méthodes générales d'analyse et les étapes à suivre pour cartographier les intensités correspondantes.

La quatrième partie concerne la problématique et les méthodologies de l'étude de l'aléa mouvement de terrain, employées dans le cadre de notre étude. Chaque étude expose un cas particulier pour la cartographie de l'aléa mouvement de terrain, la vulnérabilité et le risque associé. Le premier cas se rapporte à la province par application d'une méthode de cartographie à grande échelle, le deuxième couvre le ressort de la ville d'Al Hoceima à une échelle communale, le troisième et le quatrième cas présentent des études locales à petite échelle sur le quartier BOUJIBAR et versant QUEMADO. Les démarches d'études proposées peuvent être adaptées et reproduites en d'autres zones à risque.

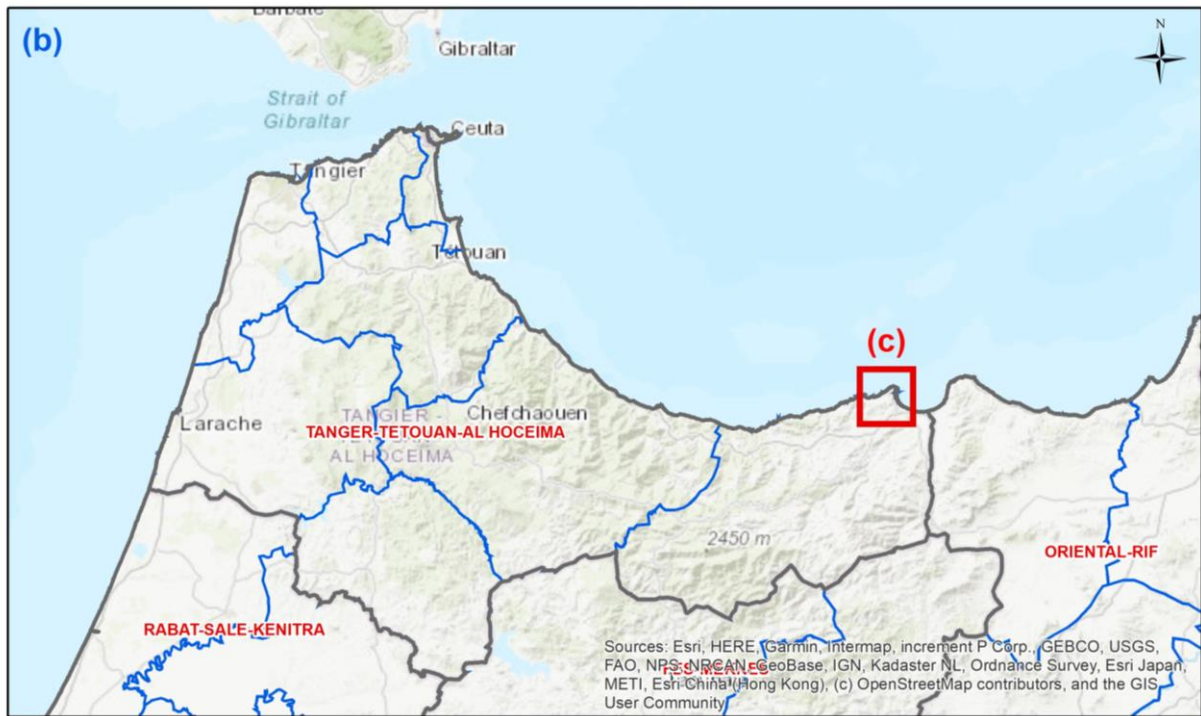
Nous terminons notre présentation par une conclusion et donnerons perspectives à ce travail de thèse. Nous décrivons également des applications de notre travail et présentons quelques axes d'améliorations futures.

PREMIERE PARTIE : CADRES ET DONNEES DE L'ETUDE

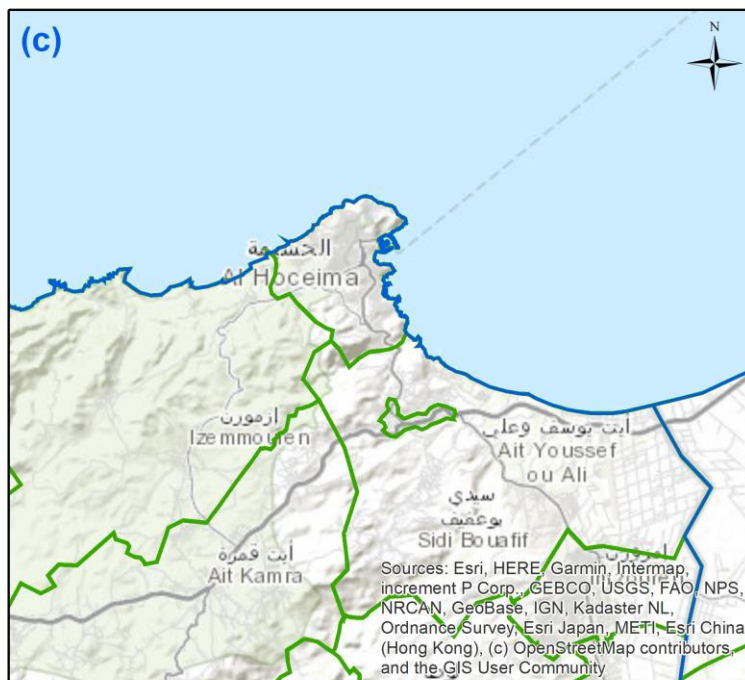
I. CADRE SOCIOGEOGRAPHIQUE

La zone concernée par l'étude se situe au nord du Maroc sur sa bordure méditerranéenne, intégrant l'agglomération principale d'Al Hoceima (chef-lieu de province) qui compte 55 357 habitants. Elle se situe dans la partie centrale et septentrionale de la région du Rif sur un plan géographique. Elle appartient à la région Tanger – Tétouan - Al Hoceima d'un point de vue administratif. Au sein de cette dernière, c'est la province d'Al Hoceima qui est la plus menacée par les risques naturels ayant causés le plus de dommages, (population dense et vulnérabilité sur plusieurs niveaux) **(Figure 1 : (a), (b), (c))**.





Légende



Légende



Figure 1: Situation de la zone d'étude sur le fond satellitaire gratuit (OSM) selon les fonds de base SIG d'ESRI et le découpage national du Maroc officiel. (a) : Selon le découpage officiel des régions du Maroc (b) : découpage des provinces (c) : découpage des communes (limite communale d'Al Hoceima, chef-lieu de la province et ses communes limitrophes).

Le secteur d'étude appartient à la province d'Al Hoceima, zone couverte de façon majoritaire par des secteurs appartenant à la dorsale calcaire et les nappes de flyschs. La province est délimitée à l'Est par la vallée de l'Oued Nekkour. Elle compte 36 communes dont cinq municipalités (Al Hoceima, Ajdir, Imzouren, Bni Bouayach et Targuist). L'arrière-pays d'Al Hoceima constitue une zone de concentration récente de

population dans des petits centres urbains dans la vallée du Nekor (Ajdir, Imzouren et BniBouayach) et autour de la baie ; la densité dépassant ici 131 hab./km² alors qu'elle est de 112 hab./km² pour l'ensemble de la province (399 654 habitants, dont 34.4 % d'urbains et 65.6 % de ruraux, sur 3 550 km²).

Le Rif est un espace qui souffre d'un certain isolement dû à des raisons physiques et historiques. C'est un pays de moyennes et hautes montagnes tombant brutalement sur la Méditerranée, un espace où la vie maritime est peu développée ; cette région a été longtemps isolée par la frontière des deux Protectorats espagnol et français et a conservé de cette période une organisation longiligne de ses relations (E-W). Cette enclave est néanmoins assez fortement peuplée de montagnards sédentaires, à la recherche de ressources d'appoint.

L'étude bibliographique entreprise dans le cadre de cette thèse se rapporte au Rif septentrional et au territoire provincial d'Al Hoceima, cependant, les zones à risque, étudiées de façon précise et ayant fait l'objet des publications, communications et travaux de recherche, appartiennent à la ville d'Al Hoceima, chef-lieu de la province et certaines zones limitrophes. [Mastere et al. 2015 ; El Hamdouni et al. (2018) ; Elmoulat et Ait Brahim (2018) ; Ait Brahim et al. (2018) ; Bousta et Ait Brahim (2018) ; Jemmah et Ait Brahim (2018) ; El Fahchouch et al. (2018) ; El Hamdouni et Aitbrahim (2018) ; Elmoulat et al. (2021) ; El Hamdouni et al. (2022)].

II. CADRES GEOLOGIQUE ET GEODYNAMIQUE GENERAL DU DOMAINE IBERO-MAGHREBIN

Cette première partie vise à comprendre les mécanismes liant l'environnement tectonique à l'apparition des séismes, ceci par la caractérisation de la structure géologique régionale, du cadre géodynamique et de la sismicité (**Figure 2**). Cette analyse s'appuie sur de nombreuses publications consultées, consacrées à l'histoire géologique et géodynamique des chaînes récentes d'Afrique du Nord et du Sud de l'Espagne.

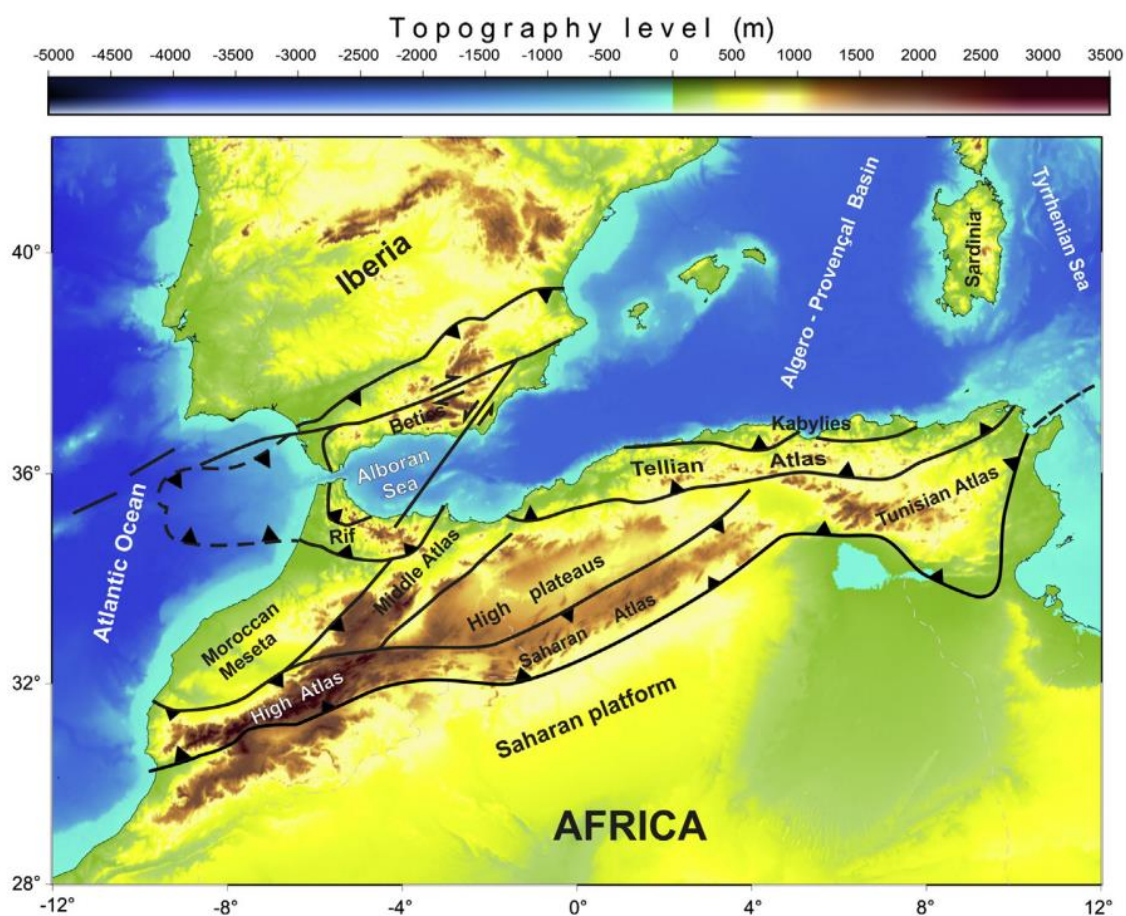


Figure 2: Domaine Ibéro-Maghrébin - Cadre tectonique (Ousadou, F., et al., 2014)

1. Cadre géologique

D'un point de vue géologique, le domaine Ibéro-Maghrebien appartient à l'orogène alpin périméditerranéen. Dans sa partie la plus occidentale, cet orogène est représenté par les Cordillères Bétiques en Espagne et les Maghrébides (chaînes Tello-Rifaine) qui forment une chaîne littorale allongée sur plus de 2000 km, allant du Rif au Maroc jusqu'au Tell en Algérie et en Tunisie. Il se poursuit plus à l'Est jusqu'aux Apennins, formant l'Arc Calabro- Sicilien. La **figure 3** montre la carte de la chaîne du Rif Marocain.

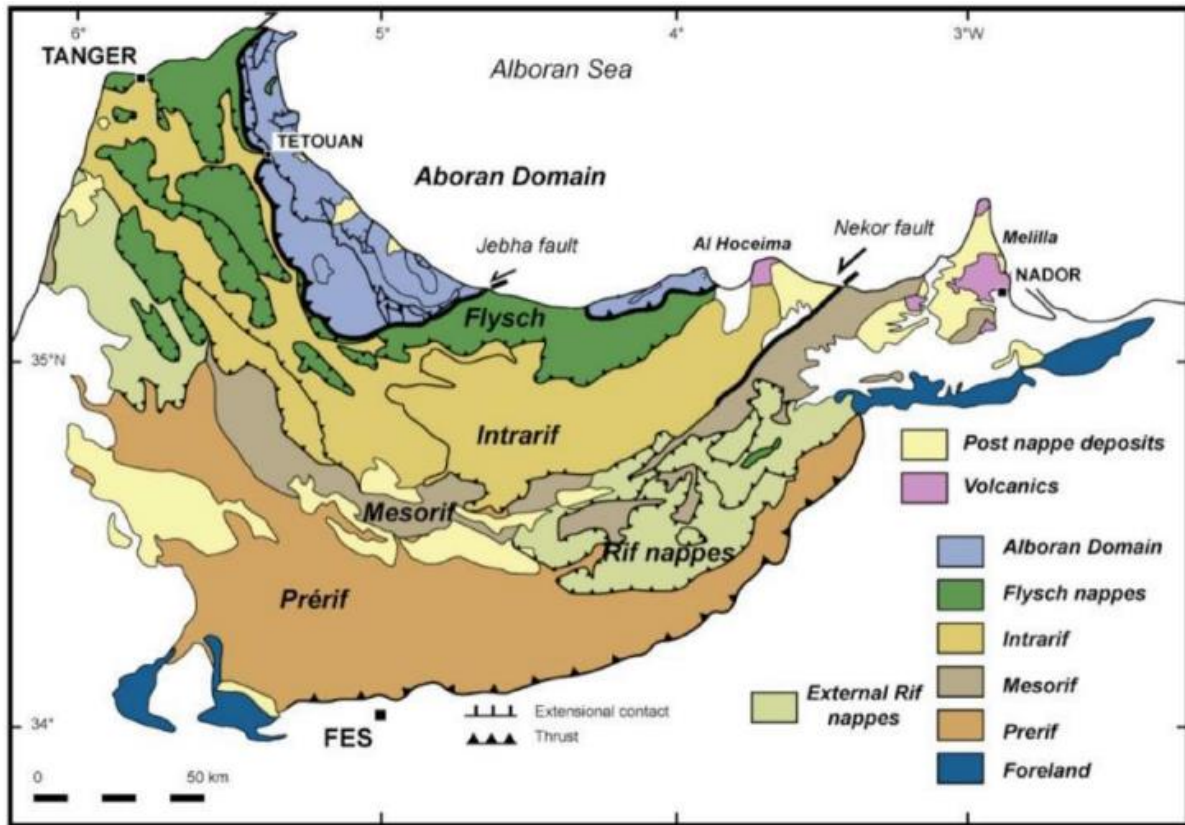


Figure 3: Carte de la chaîne du Rif (modifiée d'après Negro et al., 2008)

Les chaînes Bético-Rifaines et du Tell, se présentent comme un empilement de nappes (prisme tectonique) à vergence générale vers les avant-pays au Sud (Chalouan et al., 2001). Ces nappes se sont mises en place à partir de l'Oligocène pour les unités les plus internes et pendant une grande partie du Néogène pour les autres.

Dans les chaînes Tello-Rifaines, une fois l'océan mésozoïque absorbé (par subduction), les nappes sont charriées sur l'ancienne marge passive africaine mésozoïque qui se situe aujourd'hui sous la semelle des nappes. La présence d'éléments crustaux et mantelliques comme les péridotites des Beni Bousera (Rif), de Ronda (Bétiques), et les kinzigites et socles kabyles (Tell) impliqués dans les unités les plus internes attestent de l'ampleur des déformations à l'échelle de la lithosphère (Chalouan et Michard, 2004).

Dans ce contexte, la mise en place des nappes se fait à la faveur de grands plans de décollement horizontaux se propageant vers les avant-pays à la faveur des bassins d'avant chaîne tel que celui du Gharb-Saïss ou du Guadalquivir.

Dès le Miocène inférieur, dans le Tell (bassin du Chélif, Mitidja) et la zone d'Alboran se sont initiés des bassins sédimentaires en extension qui se forment en arrière des fronts de nappe actifs. Cette tectonique extensive, reconnue également sur le continent dans les Bétiques internes (Bousquet et Philip, 1976).

Ce dispositif structural suggérerait que ces bassins correspondent à des bassins marginaux miocènes. Aujourd'hui ils sont soumis à une tectonique compressive dominante.

De nombreux cas d'inversion, qui confirment cette chronologie, sont mis en évidence par les profils sismiques (Comas et al., 1992 ; Campos et al.1992). La tectonique actuelle est la continuation de ce dernier épisode.

La présence de deux épisodes tectoniques en mer d'Alboran est en accord avec l'histoire tectonique récente sur le continent, dans les Bétiques et les Chaînes d'Afrique du Nord (Philip, 1987 ; Armijo et al 1977) avec cependant pour la période récente des secteurs bien localisés, caractérisés par de l'extension plus ou moins E-W associée à un raccourcissement N-S comme dans la région de Grenade ou celle d'Al Hoceima.

Ce schéma général est aussi en accord avec les modèles cinématiques qui intègrent les déformations en extension dans un contexte général de convergence de plaque (Frizon de Lamotte et al., 1991).

2. Principaux domaines structuraux de la chaîne du Rif

Le Rif est composé de trois domaines principaux depuis le Nord vers le Sud, soit de l'intérieur à l'extérieur de l'arc, et en remontant la série stratigraphique : les zones internes, les nappes de flyschs et les zones externes. Chaque domaine consiste en un complexe tectonique de nappes et d'écaillés formé de la même lithologie (Chalouan et al., 2008) (**Figure 4**).

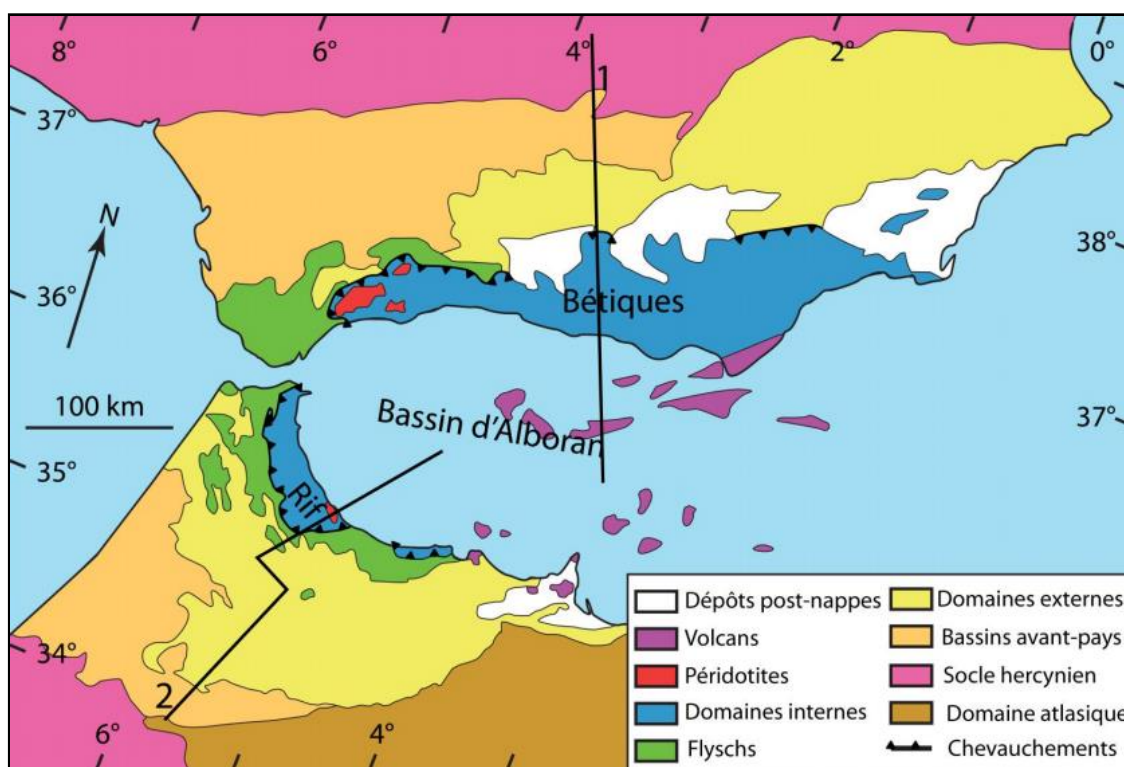


Figure 4: Carte structurale simplifiée de l'arc de Gibraltar (modifiée d'après Michard et al., 2002).

2.1. Les zones internes et le domaine d'Alboran

Les zones internes sont des formations du socle hercynien appartenant au domaine d'Alboran qui ont été déplacées vers l'Ouest et charriées sur la marge africaine (Andrieux et al., 1971) lors des différents épisodes géodynamiques. Elles sont communes au Rif et aux Bétiques et sont constituées principalement de terrains plissés et métamorphiques. Trois unités continentales, résultant du remaniement de la sous-plaque Alboran entre le Jurassique et le Miocène, composent les zones internes :

- Les Sebtides : ces unités inférieures sont affectées par un métamorphisme de type Schiste bleu/Éclogite à Schiste vert. Elles sont composées de micaschistes, de gneiss et de kinzigites et entourent le massif péridotitique de Beni Bousera (Kornprobst, 1974) ;
- Les Ghomarides : ces unités supérieures sont composées de schistes affectés par un faible métamorphisme alpin (Michard et al., 2006) ;

- Dorsale calcaire : cette unité comprend des carbonates triaso-liasiques non-métamorphisés et correspond aux reliques de la marge passive Sud de la Téthys (Michard et al., 2002). Cette unité forme les reliefs majeurs du Rif.

2.2. Les nappes de Flyschs

Les nappes de Flyschs, considérées par Durand-Delga et al. (2000) comme des dépôts turbiditiques, sont constituées, à la base de la série, de marnes à litage calcaires d'âge Crétacé supérieur et, au sommet, de grès à faciès nummidien Oligocène. Elles se sont formées dans l'océan Cénozoïque Liguro-Maghrébin, alors qu'il était connecté à l'Atlantique et aux océans alpins, et correspond à la couverture sédimentaire d'un plancher océanique situé à l'origine au Sud et à l'Est de la sous-plaque d'Alboran. Lors de la convergence à l'Oligocène-Miocène, ces nappes de Flyschs, enracinées sous les zones internes, se sont empilées vers le Sud sur les zones externes. Elles sont limitées dans leur partie Orientale par la faille majeure du Nékor, et sont séparées du domaine interne à l'Ouest par la faille de Jebha. Leur continuité au NE et au SW reste malconnue. Ces nappes de Flyschs apparaissent dans la morphologie du Rif sous forme de klipps au sommet des hauts reliefs (Michard et al., 2006).

2.3. Les zones externes

Les zones externes sont des terrains parautochtones issus de la marge passive nord-africaine, décollés de la croûte et charriés sur un niveau évaporitique Triasique. Ils sont peu ou pas métamorphiques et s'organisent selon un système de plis et de nappes de chevauchements à vergence S à SW (Tejera De Leon, 1997). On distingue trois unités structurales du haut vers le bas de la série stratigraphique (du Nord au Sud) c'est-à-dire du bassin océanique au plateau continental de la paléo-marge : l'Intrarif, le Mésorif et le Prérif. L'Intrarif est constitué des unités de Kétama, qui affleurent dans la région d'Al-Hoceima et du Nékor sous forme de schistes Mésozoïques métamorphisés (faciès Schiste Vert), des unités de Tanger et de Loukkos (Crespo-Blanc and de Lamotte, 2006). Le Mésorif correspond à un ensemble de nappes empilées constituées essentiellement de matériel daté du Jurassique au Crétacé inférieur. Il est imbriqué entre l'Intrarif et le Prérif. La séquence de nappes imbriquées est scellée par une épaisse pile de sédiments Oligocène à Miocène moyen constituée de marnes et de grès (Andrieux et al., 1971 ; Crespo-Blanc and de Lamotte, 2006 ; De Lamotte, 1985). Le Prérif correspond aux terrains les plus vieux et il vient donc s'enraciner sous le Mésorif. Il est subdivisé en Prérif interne, qui est formé d'écailles de roches carbonatées Jurassique, et Prérif externe, qui se présente sous forme d'une structure gravitaire chaotique marno-sableuse résultant du démantèlement des fronts de nappes pendant ou juste après la mise en place des nappes au Miocène (Chalouan et al., 2008). Le domaine externe est recoupé par l'accident majeur sénestre de Nékor orienté NE-SW et par les failles ~N-S qui découpent la région d'Al Hoceima.

3. Cadre sismique

3.1. Introduction

La zone d'Al Hoceima a été le siège de plusieurs séismes destructeurs aussi bien historiques que récents. Cette sismicité dans la région est souvent associée à la convergence entre la plaque africaine et eurasiennne. Pendant que cette sismicité s'aligne parfaitement sur la limite Afrique Ibérie dans sa partie Ouest, elle devient plus complexe dans la région dite, dans la littérature, Ibéro-Maghrébine en général. A part quelques zones de concentration exceptionnelle de grandes magnitudes, la sismicité dans cette région est qualifiée de diffuse par la majorité des auteurs. Cette complexité rend difficile la localisation précise de la limite entre la plaque Africaine et Ibérienne.

3.2. Sismicité du RIF et de la mer D'ALBORAN

Les catalogues de sismicité comprennent à la fois des informations macrosismiques relatives aux séismes historiques (i.e antérieurs à 1900 et pour lesquels un complément d'investigations est parfois nécessaire) et des données plus précises de la période instrumentale.

Pour prendre en compte toutes les sources sismiques, proches et lointaines, capables de produire sur le territoire de la Province d'Al Hoceima des niveaux d'accélération maximale du sol de quelques centièmes de g (ou induire une intensité macrosismique supérieure à V sur l'échelle de Mercalli modifiée) nous avons

considéré dans un rayon d'environ 100 à 300 km autour des limites du territoire d'Al Hoceima. L'analyse de cette sismicité montre comment les mouvements actuels se distribuent dans le temps et dans l'espace

Les plus importants de ces séismes sont représentés dans le **tableau 1** ci-dessous.

Tableau 1: Historique des séismes

Année	Séisme	Magnitude (selon l'échelle de Richter)
1755	Lisbonne	8.5 - 9
1960	Agadir (Maroc)	5.7
1969	Lisbonne	7.8
1989	Chenoua (Algérie)	6.0
1994	Al Hoceima (Maroc)	6.0 (Kariche et al., 2017)
2003	Boumerdes (Algérie)	6.8
2004	Al Hoceima (Maroc)	6.4 (Kariche et al., 2017)
2016	Al Hoceima (Maroc)	6.3 (Kariche et al., 2017)

Les séismes de la région d'Al Hoceima, définis par leur épicentre ont été reportés sur une carte de la Méditerranée occidentale (**Figure 5**). Ce document montre qu'il existe une bonne corrélation entre la sismicité historique et instrumentale d'une part et entre les traits structuraux majeurs et la répartition de la sismicité d'autre part.

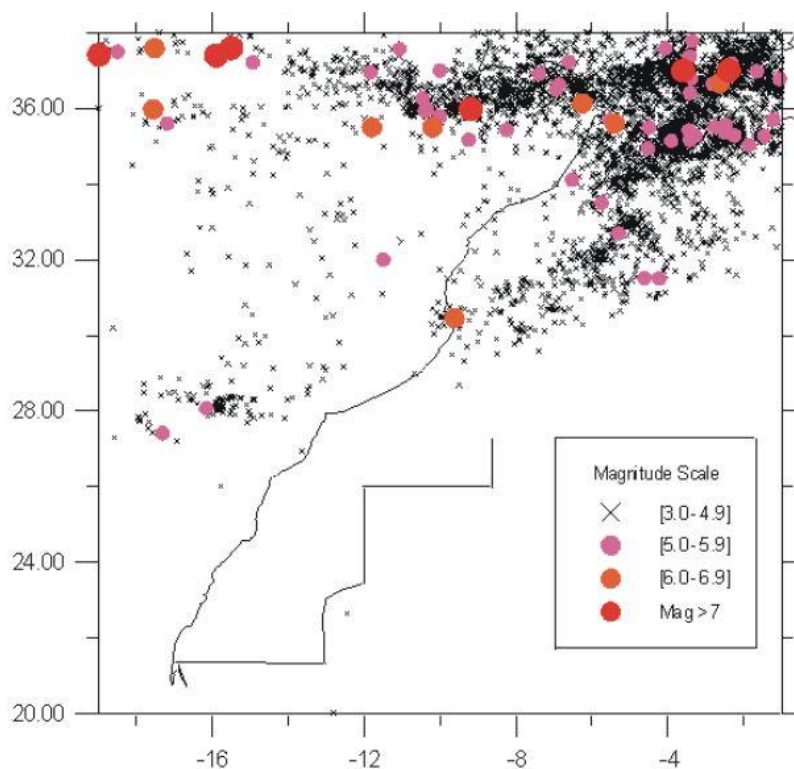


Figure 5: Répartition de la sismicité du Maroc de 1900 à 2001 (carte CEPRIS, 2002)

Ainsi, pour la région Ibéro-Maghrébine, en domaine continental la sismicité est diffuse et s'étend sur une vaste zone (plus de 400 km), qui va depuis les côtes Nord de l'Espagne jusqu'à l'Atlas Saharien au Sud. Néanmoins, cette sismicité reste toujours corrélable avec les structures tectoniques actives majeures. En effet, on remarque qu'une grande partie de l'activité sismique qui est majoritairement superficielle se localise principalement dans les zones côtières ibériques, en mer d'AlBoran et sur la marge Nord des pays maghrébins (Afrique du Nord). La sismicité du Maroc continental, est clairement associée aux zones qui correspondent aux chaînes de montagne récentes (Haut et Moyen Atlas, Rif) alors que le plateau central marocain (Meseta) à l'Ouest et le Bassin de Missour à l'Est restent relativement épargnés.

L'activité sismique dans l'Ouest de l'aire Ibéro-Maghrebine (Rif, mer d'Alboran) présente des magnitudes relativement modérée ($M < 5$) et avec des temps de récurrence relativement longs alors qu'à l'Est dans le Tell algérien les magnitudes peuvent dépasser 7 avec des récurrences plus courtes (Bezzegoud and Buforn, 1999).

D'autre part la région Ouest de la mer d'Alboran se caractérise par la présence de séismes intermédiaires ($30 < h < 150$ km) et profonds ($h = 650$ km) (Buforn et al., 1991) vraisemblablement associés à une subduction ancienne.

Dans le Rif oriental les séismes sont superficiels avec des magnitudes généralement inférieures à 5 et dans la région d'Al Hoceima, l'intensité maximale était atteinte par le séisme du 8/07/1848 ($I_0 = VIII$) (Ramdani et al., 1989) jusqu'à ce que se produisent les séismes de 1994 et de 2004.

Parmi les grands séismes qui ont été largement ressentis dans la région et bien documentés on cite celui de "Lisbonne 1755" d'intensité XI et une magnitude estimée de 8.5 à 9.4. Accompagné d'un tsunami, le séisme a causé des dégâts sur presque tout le littoral atlantique entre la péninsule ibérique et le Maroc ; Thiebot et Gutscher, 2006; Gutscher et al., 2006).

En Andalousie (Bétiques), l'histoire sismologique jusqu'au 19ème siècle présentent de nombreuses événements violents dépassant l'intensité X IAG (2005). Au Maroc, comme en Algérie, la documentation des séismes est moins précise sur l'évaluation d'intensité. Par contre, plusieurs séismes et essaims, affectant les grandes villes historiques, ont été signalés dans des notes historiques regroupés par El Mrabet (2005).

3.3. Sismicité instrumentale

Loin de part et d'autre de la zone soupçonnée d'être frontières de plaques (Rif-Alboran- Bétiques), la sismicité est peu fréquente et très diffuse avec des magnitudes qui dépassent rarement $M_w = 3$. Dans les Atlas marocains, les tremblements de terre s'alignent légèrement NE-SW (El Alami et al., 2004). On y distingue deux séismes, suivis de répliques, qui ont considérablement affecté la ville de Rissani située dans l'Anti Atlas. Il s'agit des événements du 23 et 30 Octobre 1992 qui avaient des magnitudes de $M_d = 5.2$ et $M_d = 5.3$, respectivement (Hahou, 2005). En Ibérie et à part les Pyrénées, les séismes se répartissent surtout sur les zones littorales. A l'intérieur de la péninsule (massif stable), on remarque une absence presque totale de toute activité sismique (Figure 6).

L'alignement de la sismicité le long du système Acores-Gibraltar est perturbé à partir du Golfe de Cadix où la répartition commence à être plus dense et peu profonde (de 0 à 30 km) si on compte les magnitudes faibles ($M_w < 4$). Dans la région bético-rifaine, la sismicité modérée à forte s'avère se concentrer dans quatre régions différentes : Malaga-Grenade (au centre) et Almeria (à l'extrémité Est) dans les Bétiques et Al Hoceima et Melilla dans le Rif oriental, les trois premières zones étant potentiellement les plus sismiques de la région. La région Malaga-Grenade est caractérisée par l'occurrence des tremblements de terre les plus profonds (de 40 à 150 km) de la région avec une prolongation N-S dans la mer d'Alboran (Buforn et al., 1997, 2004). Des événements plus profonds ($M_w > 3.5$), sont également présents dans la péninsule tangitaine au niveau du Rif ainsi que dans le golfe de Cadix. La sismicité générale de la région d'Alboran est caractérisée par un alignement d'décrochant dit "Trans-Alboran Shear Zone" (Stich et al., 2006) qui semble faire la liaison entre la région d'Almeria dans les Bétiques et la région d'Al Hoceima dans le Rif (Figure 6).

Les mécanismes au foyer (Figure 7) dans le golfe de Cadix, pour les événements de magnitude supérieure à 4, montrent que cette partie de la frontière est grossièrement dominée par des jeux de failles inverses indiquant une compression NNW-SSE (Buforn et al., 2004). Dans le domaine marin du bassin d'Alboran les mécanismes sont en majorité des décrochement accompagnés souvent par une composante normale indiquant une compression N-S et une extension E-W (Stich et al., 2003). Dans les Bétiques, les deux régions de potentialité sismique sont distinguées selon les mécanismes au foyer. Ces derniers sont totalement hétérogènes dans l'Ouest (Malaga-Grenade) et décrochant dans l'Est (Almeria) avec une compression NNW-SSE à N-S (Buforn et al., 2004; Stichel et al., 2003). Dans le Rif, les mécanismes décrochant dominant plus dans la région d'Al Hoceima que dans la région de Melilla (Calvert et al., 1997 ; Bezzeghoud et Buforn, 1999).

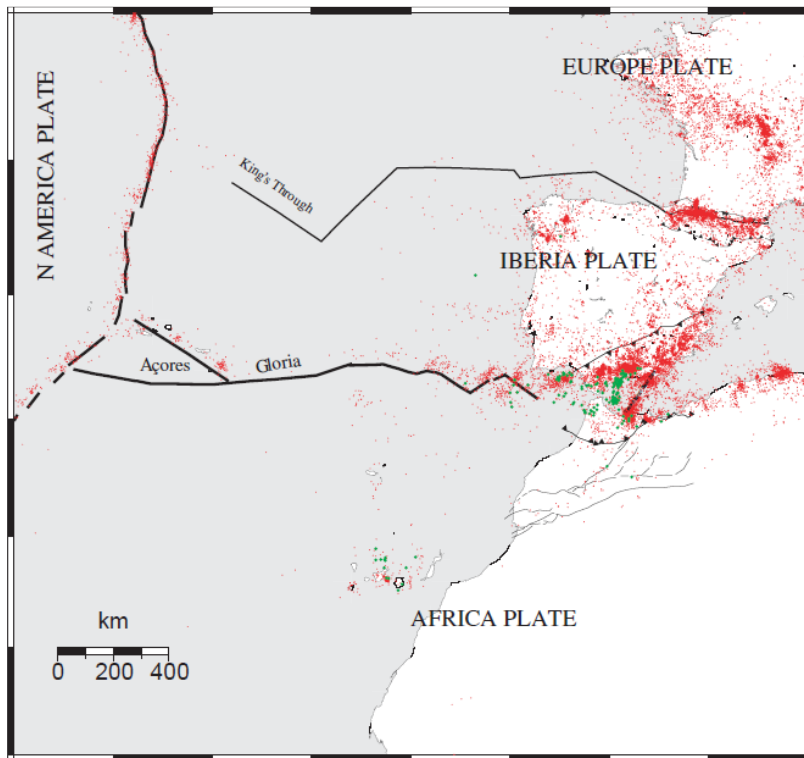


Figure 6 : Sismicité instrumentale entre 1973 et 2007, dans la zone de frontières entre les plaques Afrique–Ibérie–Europe d’après le catalogue de sismicité USGS (2007). Les points de couleur rouge indiquent les événements de magnitude supérieure à 2. Les points de couleur verte indiquent les s’séismes de profondeur supérieure à 40 km.

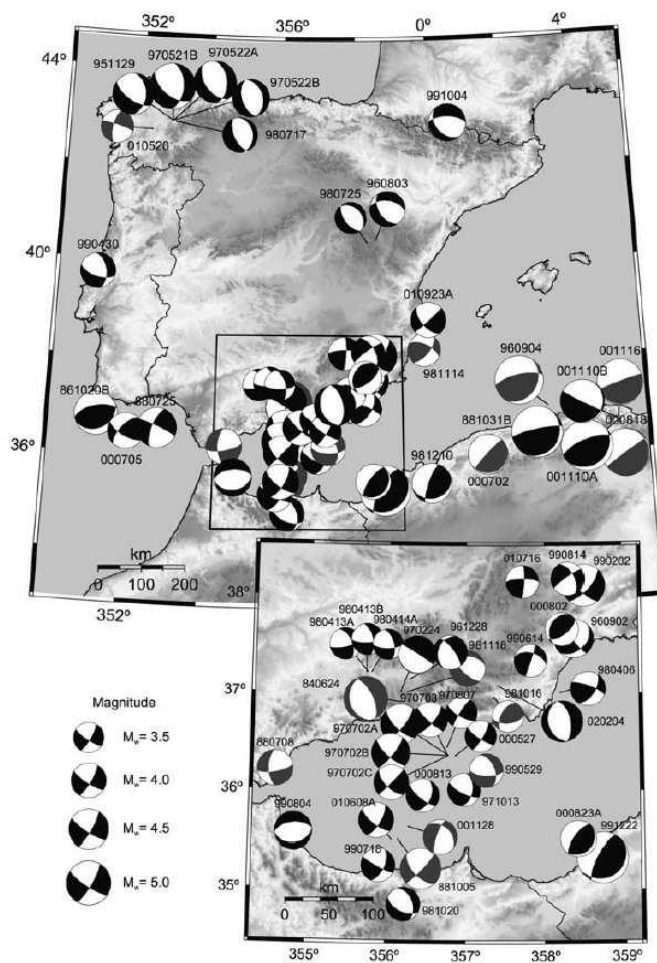


Figure 7: Mécanismes au foyer dans la région Ibéro-Maghrébine d’après Stich et al. (2003).

1. Séisme du 24 Février 2004

On ne peut pas parler de la sismicité contemporaine de la région sans citer le séisme du 24 Février 2004. Cela est justifié par l'ampleur des dommages qu'il a provoqués. Un bilan de 629 morts, 966 blessés et 2539 constructions détruites ou endommagées faisant plus de 15600 sans-abris. Ce bilan aurait été amplifié par des effets particuliers du milieu physique (effets de site) et socio-économique (vulnérabilité des constructions, conscience).

La nuit du 24 Février 2004 à 02h 27 (GMT), le choc principal secoua la région d'Al Hoceima. L'accélération du sol a atteint un pic de 2.3 m/s² à côté de la digue du barrage Abdelkarim El Khattabi. La magnitude a été évaluée de $M_w = 6.3$ à 6.5 selon les centres sismologiques. Les localisations de l'épicentre ainsi que de l'hypocentre à partir des ondes sismiques ont été très différentes (**Figure 8**).

Les mécanismes au foyer montrent tous un glissement en décrochement sur des plans nodaux subverticaux orientés NNE-SSW et WNW-ESE. Les répliques de magnitudes supérieures à $M_w = 4$ confirment en majorité le style décrochant de la zone de rupture (**Figure 7**). La répartition spatiale de ces répliques montre un alignement étonnant selon les deux directions orthogonales coïncidant plus ou moins avec celles définies par les plans nodaux des mécanismes au foyer (**Figure 9**). Aucune rupture tectonique de surface n'a été reconnue comme la principale source du séisme. Il s'agissait d'une rupture aveugle.

La sismicité de la région, dominée par un régime décrochant senestre, ne s'aligne sur aucune des failles cartographiables sur la surface, souvent avec des jeux récents normaux (voir Système de fracturation plus haut). Il s'agit peut-être d'une faille ou zone de faille actuelle de direction générale NNE-SSW et n'affectant pas la surface. La faille ou la zone de faille de direction NNE-SSW au NE-SW suggérée par Calvert et al. (1997) pourrait bien être la source de la sismicité dans cette zone.

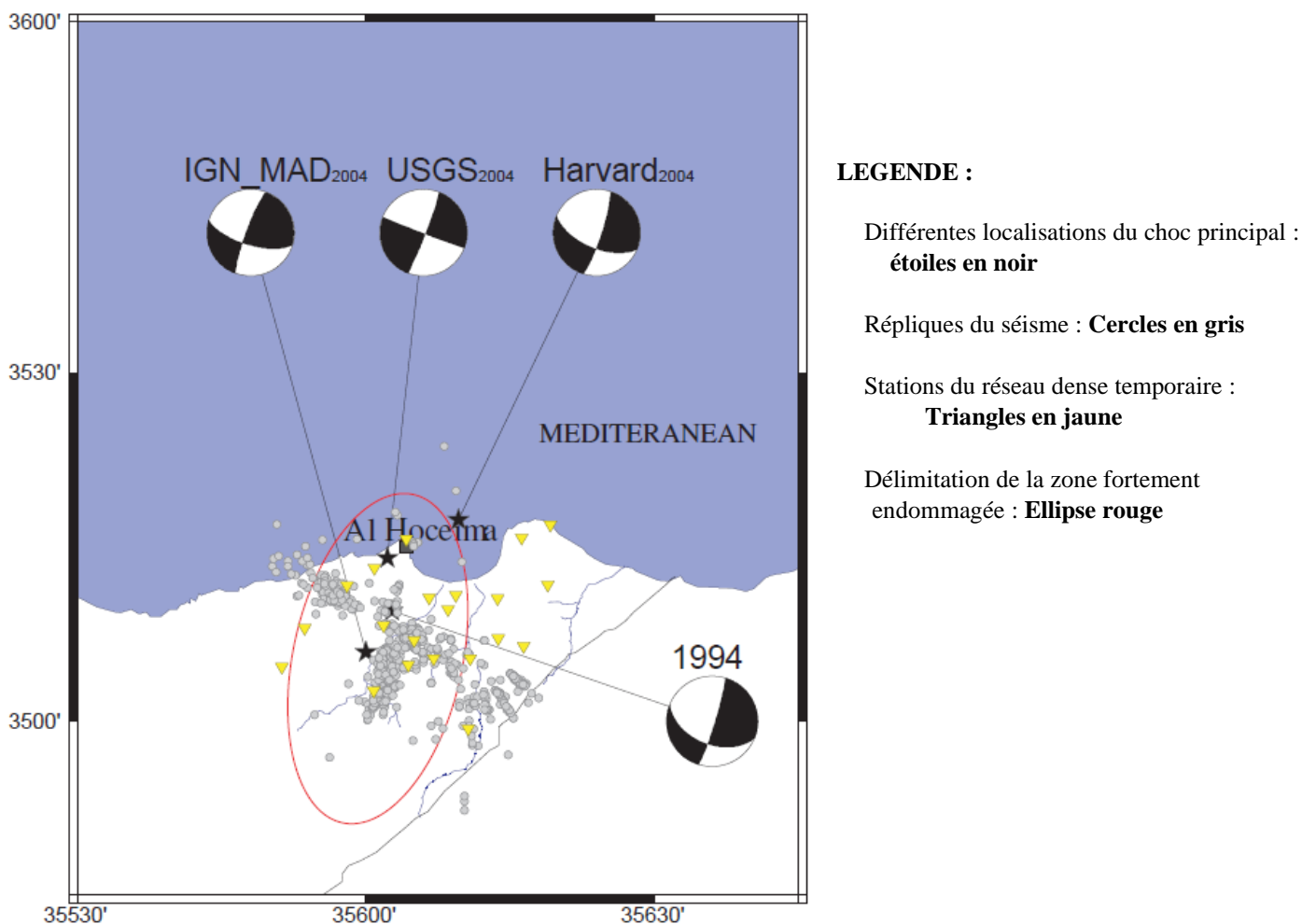


Figure 8: Séquence sismique du tremblement de terre d'Al Hoceima 2004. Dorbath et al. (2005)

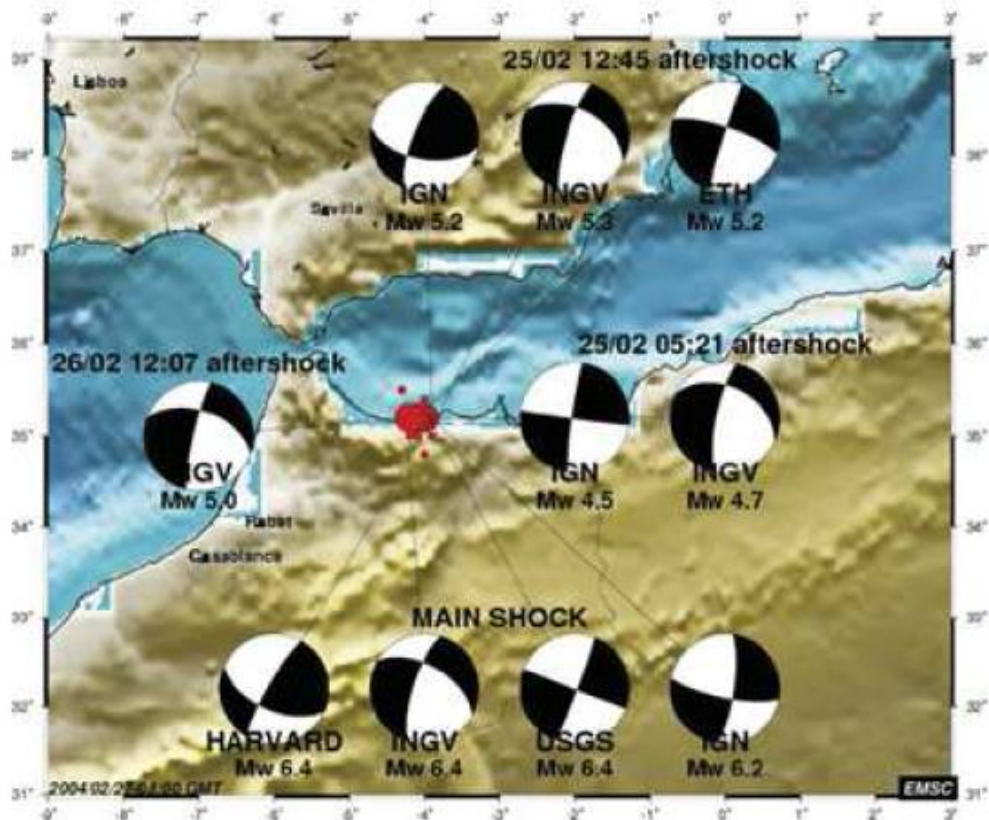


Figure 9: Mécanismes au foyer du choc principal et des répliques du tremblement de terre d’Al Hoceima 2004 d’après les différents centres sismologiques (in Jabour et al. (2004)).

2. Dommages co-sismiques et observations après séisme

Les dégâts dans les constructions et certains mouvements gravitaires (chute de blocs) sont liés essentiellement à la propagation et l’amplification des ondes secondaires. Un grand nombre des dégâts dans les constructions du point de vue architectural a été reporté par Murphy Corrella (2005). C’est dans le milieu rural, qu’il ya eu le plus grand nombre de pertes humaines. Les édifices qui étaient construits essentiellement par des méthodes traditionnelles (sans plan ni béton armée) ont été sévèrement endommagés. En milieu urbain, les dommages sont essentiellement dus au non-respect des normes géotechniques de constructions dans la zone, sans parler bien sur des normes parasismiques qui viennent d’être établies juste après le séisme (**Figure 10 et 11**).





Figure 10: Principaux types de dommages des constructions en milieu rural dans la région d'Al Hoceima affectée par le séisme du 24 Février 2004. Murphy Corrella (2006).



Figure 11: Principaux types de dommages des constructions en milieu urbain dans la région d'Al Hoceima affectée par le séisme du 24 Février 2004, d'après Murphy Corrella (2006).

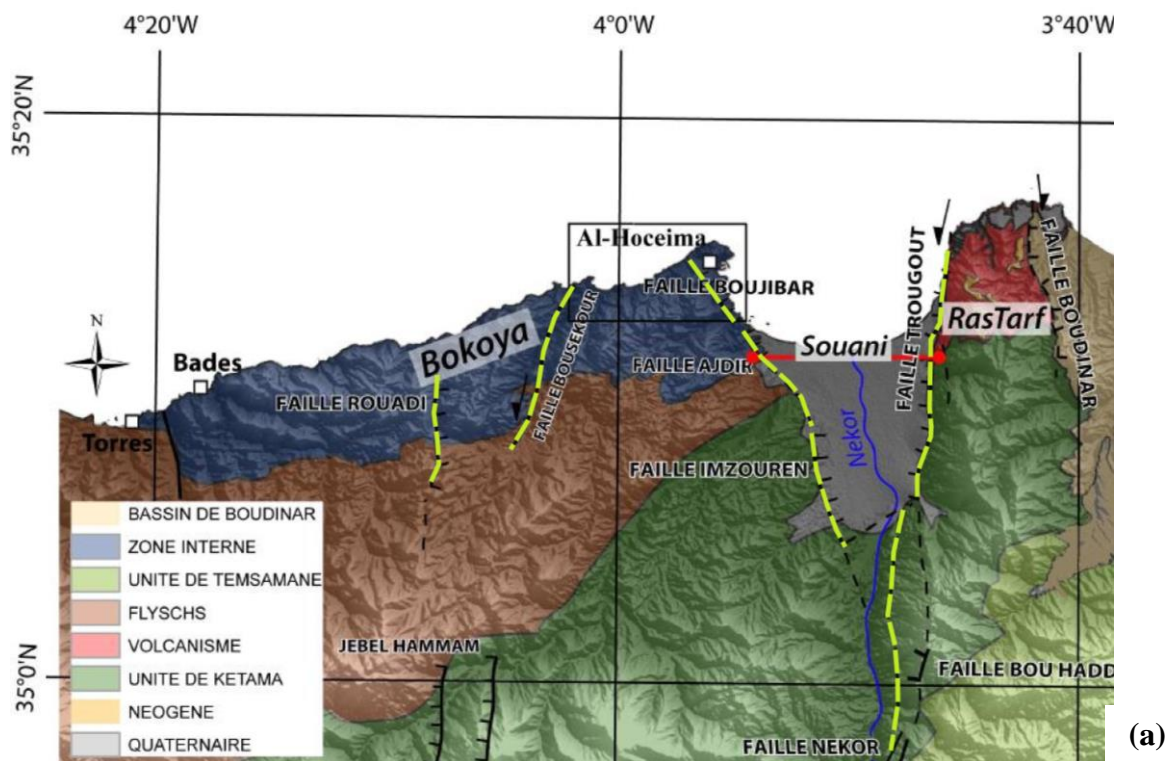
3. Structures sismogéniques repérées à l'échelle du bassin d'étude

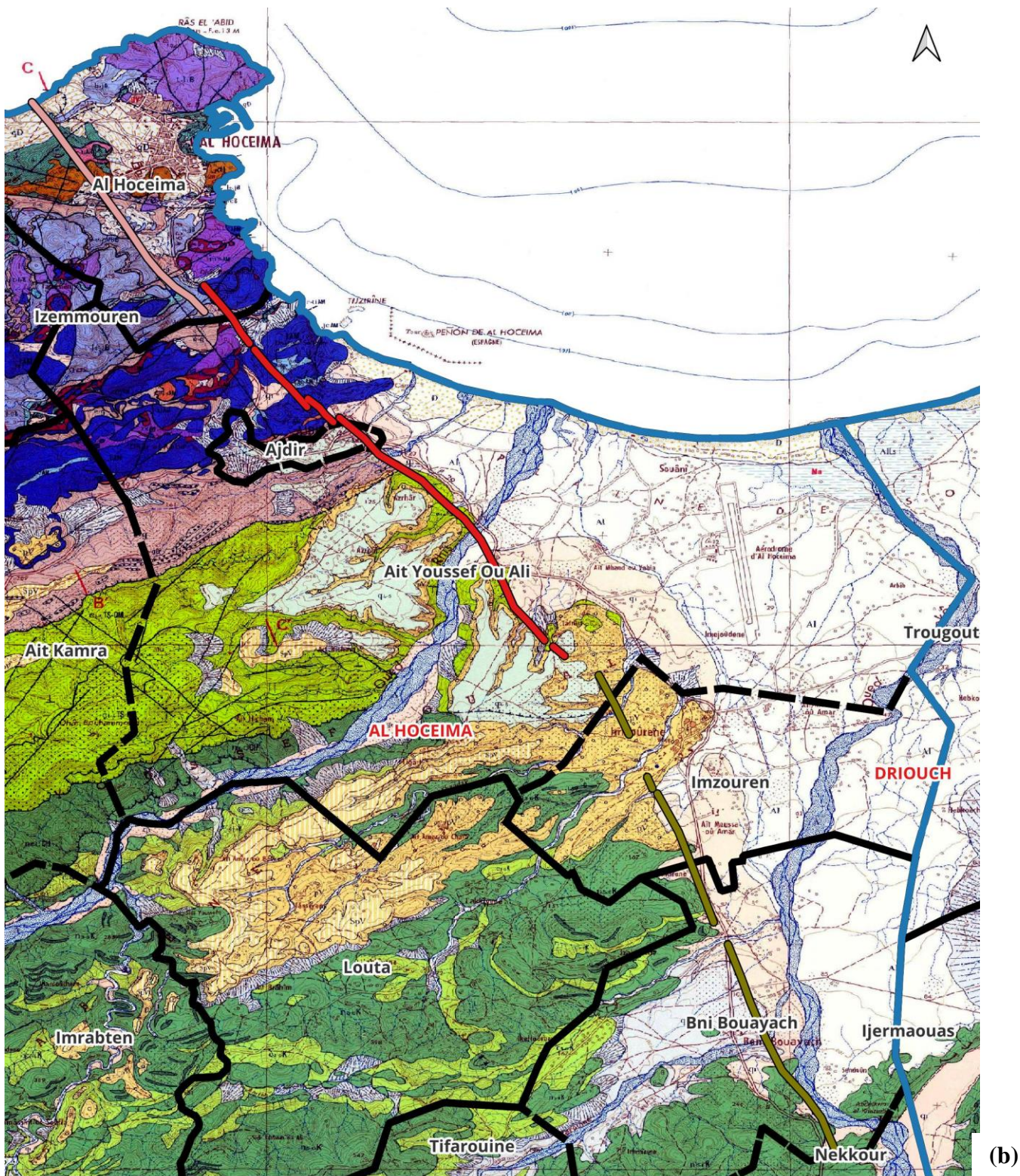
La nature et l'orientation des failles héritées et susceptibles d'être réactivées par les contraintes actuelles sont identifiées et servent de base structurale au report des différentes données de la tectonique récente et actuelle.

Cette caractérisation de la croûte terrestre permet de déterminer les mécanismes les plus plausibles des déformations actives. Nous pouvons identifier les failles suivantes à l'échelle du bassin de notre étude (**Figure 12 : (a)**) :

- Faille d'**Ajdir** : Faille normale de direction NW-SE, parallèle à la ligne de côte méditerranéenne la plus proche (celle d'Ajdir – Souani).
- Faille de **Trougout** : Faille normale de direction NS, relativement perpendiculaire à la ligne de côte méditerranéenne, bordant la plaine de Souani du côté Est. La région de Trougout reconnaît un soulèvement récent de l'extrémité Nord du massif volcanique de Ras Tarf grâce à l'étagement de terrasses marines étagées (**Poujol, A. et al., 2014**). Ce soulèvement est guidé par la faille NS du massif de Trougout (qui est responsable aussi de l'effondrement du bassin d'Al Hoceima).
- **Faille de Nekor qui borde** la plaine de Souani, qui est un bassin d'effondrement rempli d'alluvions quaternaires à actuelles.
- Faille de **Rouadi**, faille normale de direction méridienne, située à 20 km vers l'ouest.
- Faille de **Boujibar** : Faille normale de direction NW-SE, traversant en diagonal la ville d'Al Hoceima, représentant un véritable danger à des centaines d'enjeux existants.
- Faille d'**Imzouren** : Faille normale de direction NNW-SSE, relativement perpendiculaire à la ligne de côte méditerranéenne, bordant la plaine de Souani du côté Ouest
- Faille de **Boussekour** : Faille normale de direction NE-SW, responsable de l'évènement sismique du 26 Mai 1994, grâce à plusieurs déformations de surface sur plus de 20 kms le long de la faille de Boussekour (de la côte méditerranéenne jusqu'à Rouadi). Elles correspondent à des fractures de direction NE-SW à légère composante inverse avec localement des fentes de tensions en échelon qui indiquent un jeu décrochant senestre (Ait brahim, L. et al., 1994).

Les failles dont l'activité quaternaire est connue depuis longtemps, doivent être considérées comme actives, et sont donc susceptibles d'engendrer des séismes destructeurs et plusieurs cas d'instabilité de terrain. Leur activité se manifeste par le soulèvement de plages et de plates-formes d'abrasion marines fossilifères récentes le long des falaises rocheuses qui bordent la mer de part et d'autre du bassin du Nekor (Cadet et al., 1977). (**Figure 12 - (a)**) : Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des failles ; **Figure 12 - (b)** : tracé des failles).





LEGENDE

- Tracé de la faille BOUJIBAR
- Tracé de la faille AJDIR
- Tracé de la faille IMZOUREN

- Découpage provincial
- Découpage communal

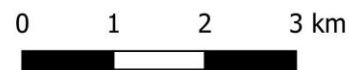


Figure 12 - (a) : Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des failles. (b) : Tracé de quelques failles sur la carte géologique d'Al Hoceima au 50.000^e : faille de BOUJIBAR ; faille d'AJDIR, faille d'IMZOUREN

III. Cadre stratigraphique – Carte des faciès

Ce cadrage vise principalement à décrire d'une manière brève la stratigraphie et la structure des grands ensembles constituant la chaîne du Rif oriental. La structure de la chaîne rifaine correspond à un empilement de nappes caractérisé par des déversements divergents vers l'extérieur du Rif (Andrieux, 1971). Classiquement, trois grands domaines (**Figure 13 et 14**) sont distingués, de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne :

- Les unités internes et externes du Rif : Ghomarides ; Dorsale calcaire de la chaîne des Bokkoyas ; Semelle tertiaire des Bokkoyas ; Nappes de flyshs ; Subrif et Péririf ;
- Les terrains Néogènes post-nappes : Bassins néogènes (Mellila et kert ; Nador – Kebdana ; Boudinar ; Bas – Nekor (bassin d'Al Hoceima) ; Volcanisme Néogène du Rif Oriental (Cap des trois fourches ; Gourougou ; Tortonien de Ras Tarf) ;
- L'avant pays oriental de la chaîne rifaine.

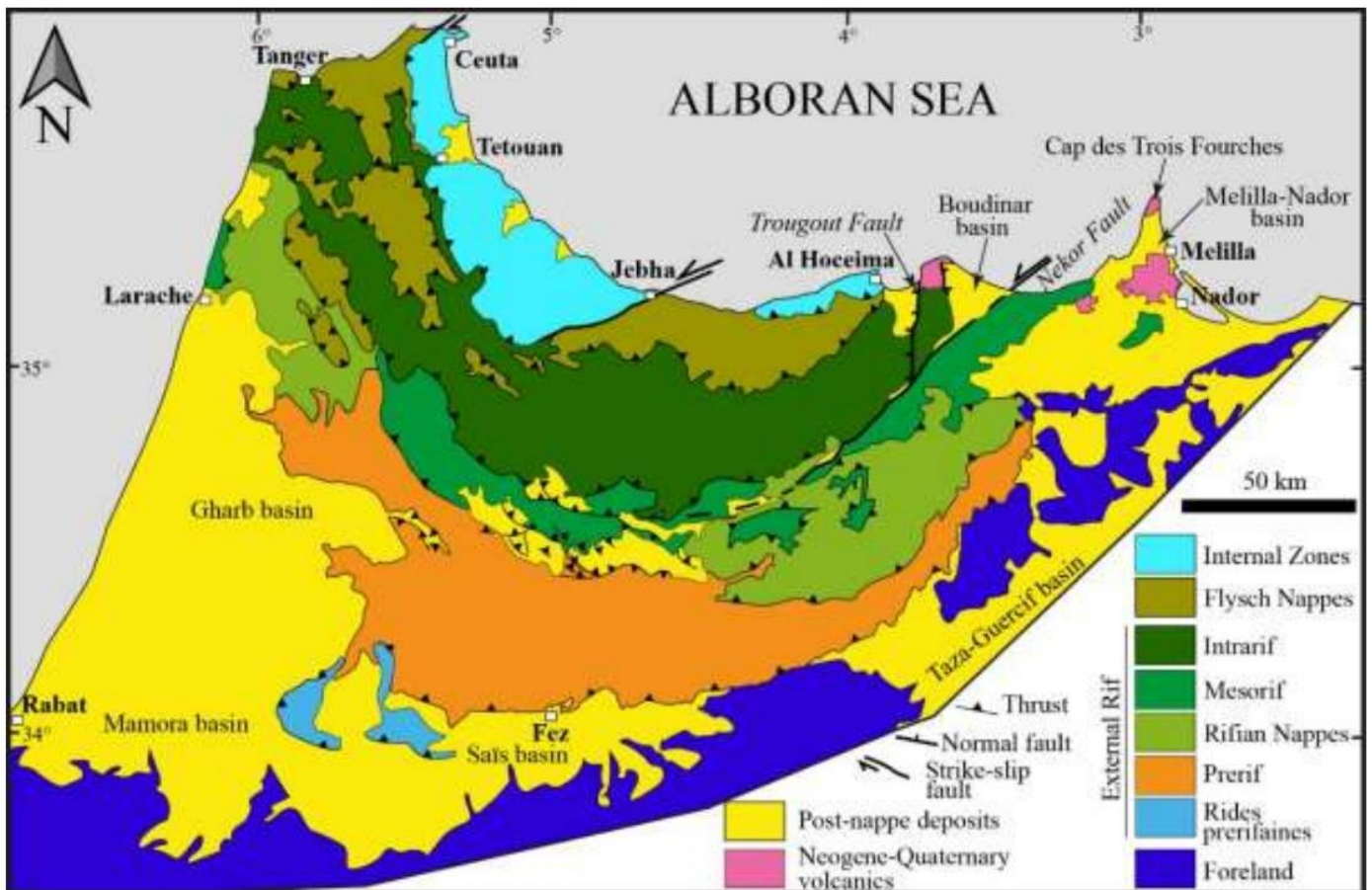


Figure 13: Carte structurale de la chaîne du Rif représentant les grands domaines structuraux et localisation des bassins post-nappes. Modifiée d'après Suter (1980) et Jolivet et al. (2003)

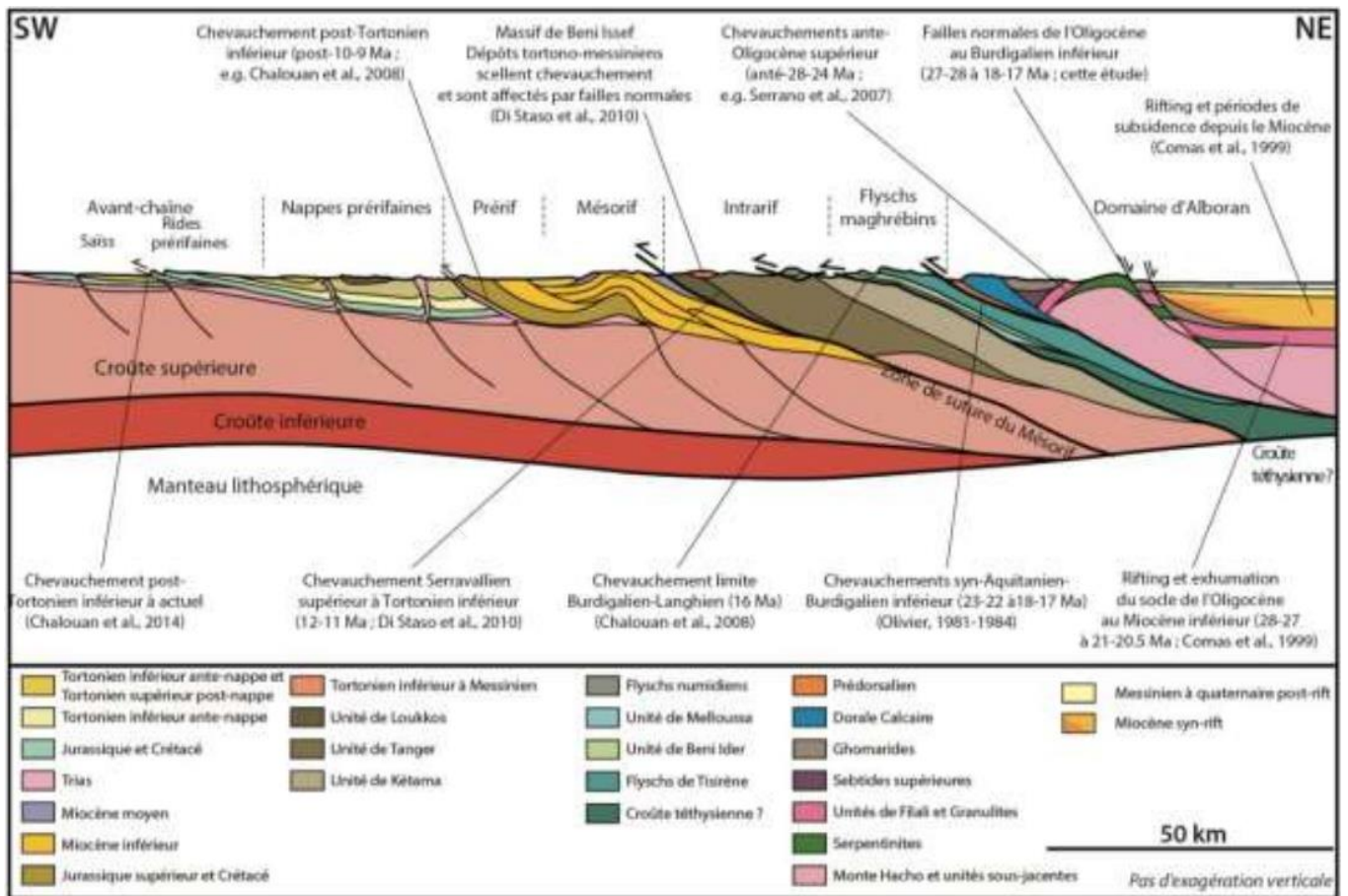


Figure 14: Coupe de la chaîne rifaine à l'échelle crustale avec l'âge des contacts majeurs d'après les données bibliographiques, modifié d'après Michard et al. (2002)).

La figure 15 résume le cadre stratigraphique du Rif oriental.

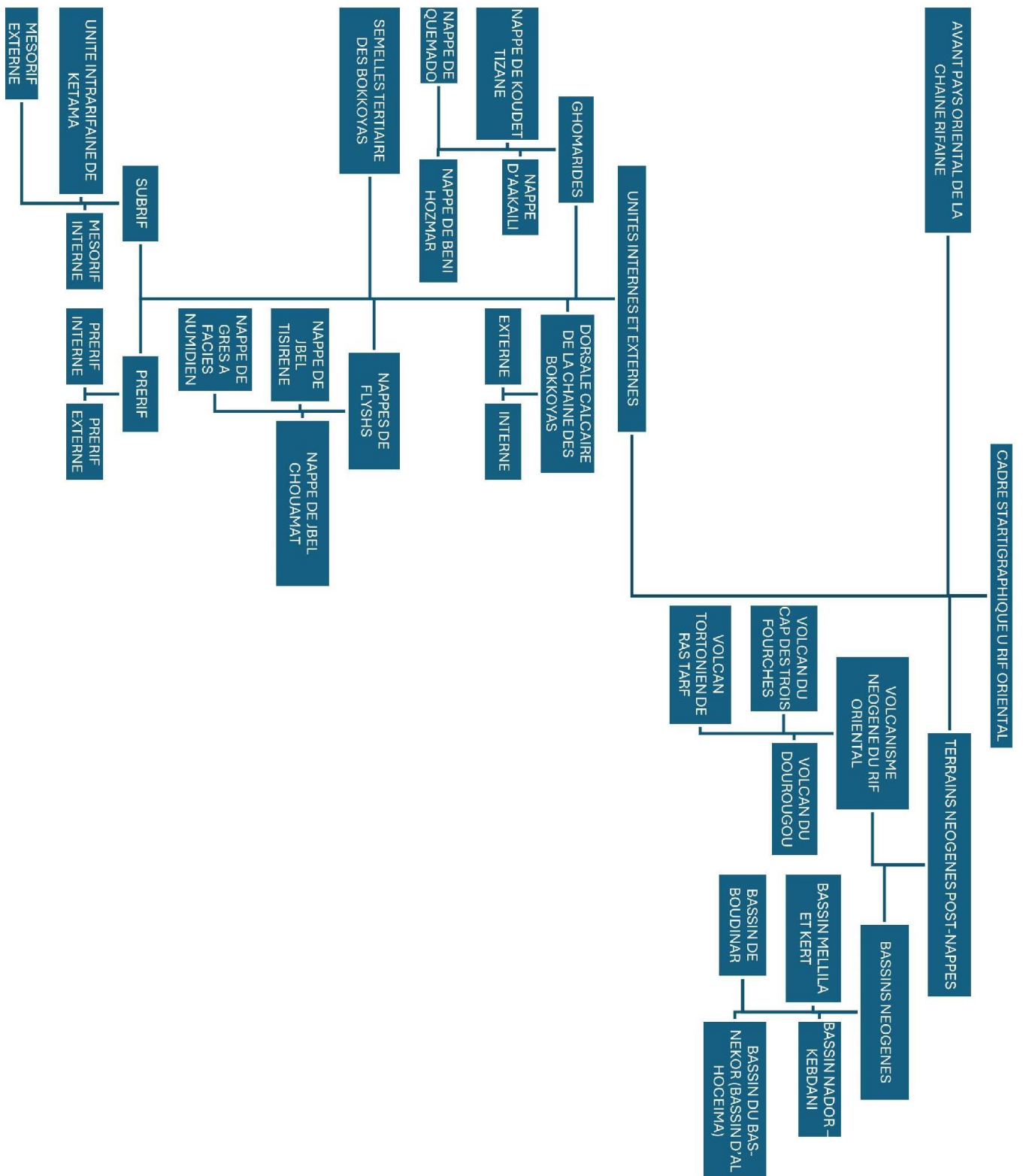


Figure 15: Cadre stratigraphique résumé du Rif oriental (NAKHCHA, 2002).

1. Unités internes et externes du Rif

Les **Ghomarides** constituent les terrains paléozoïques, non ou légèrement métamorphiques de la chaîne rifaine. Ils affleurent dans le massif des Bokkoyas sous forme de Klippes à surfaces réduites occupant le plus souvent des dépressions topographiques, subdivisés par Millard (in Durand-Delga et al., 1960-62) en trois nappes différentes (Aakaili ; Koudiet Tiziane ; Beni Hozmar) et une quatrième nappe (celle de Quemado) a été définie par (Chalouan, 1986) et (Azzouz, 1992).

Les figures 16 et 17 représentent respectivement les séries stratigraphiques synthétiques de la nappe de Quemado et la nappe de Beni Hozmar (Azzouz, 1992).

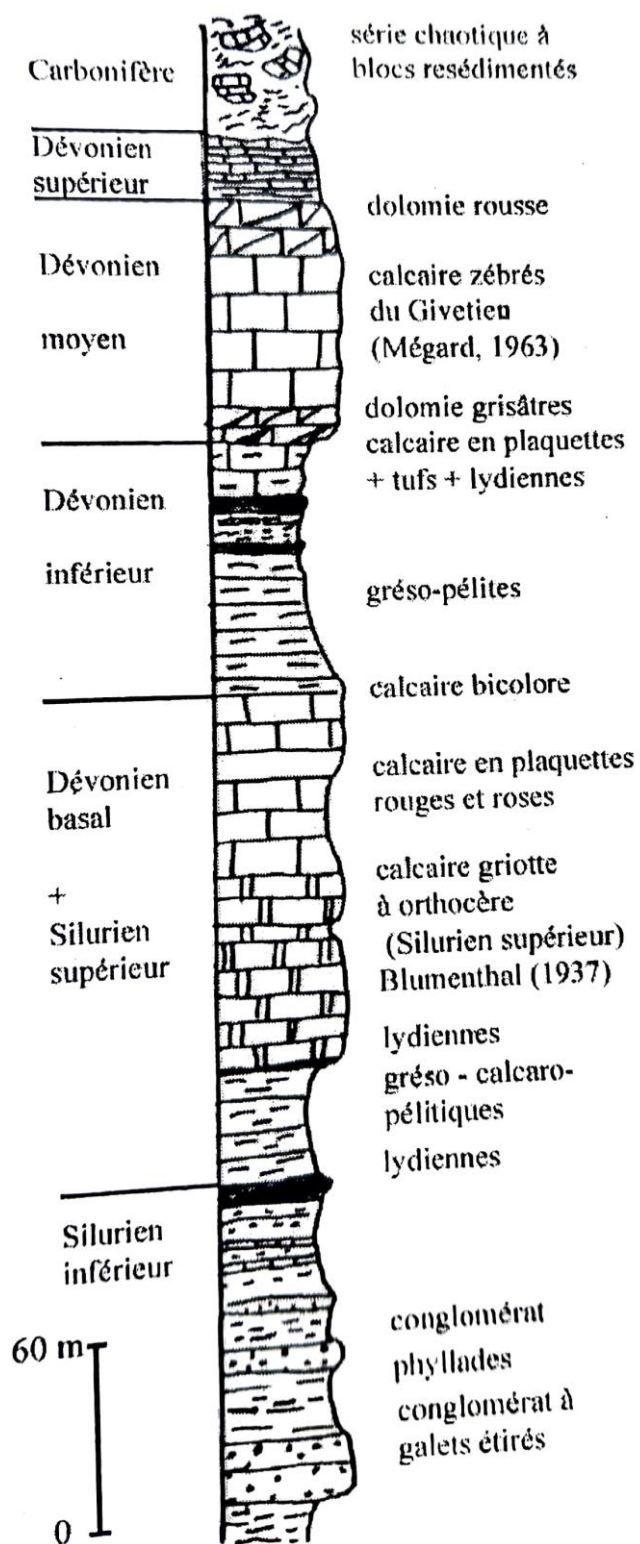


Figure 16: Série stratigraphique synthétique de la nappe de Quemado (Azzouz, 1992)

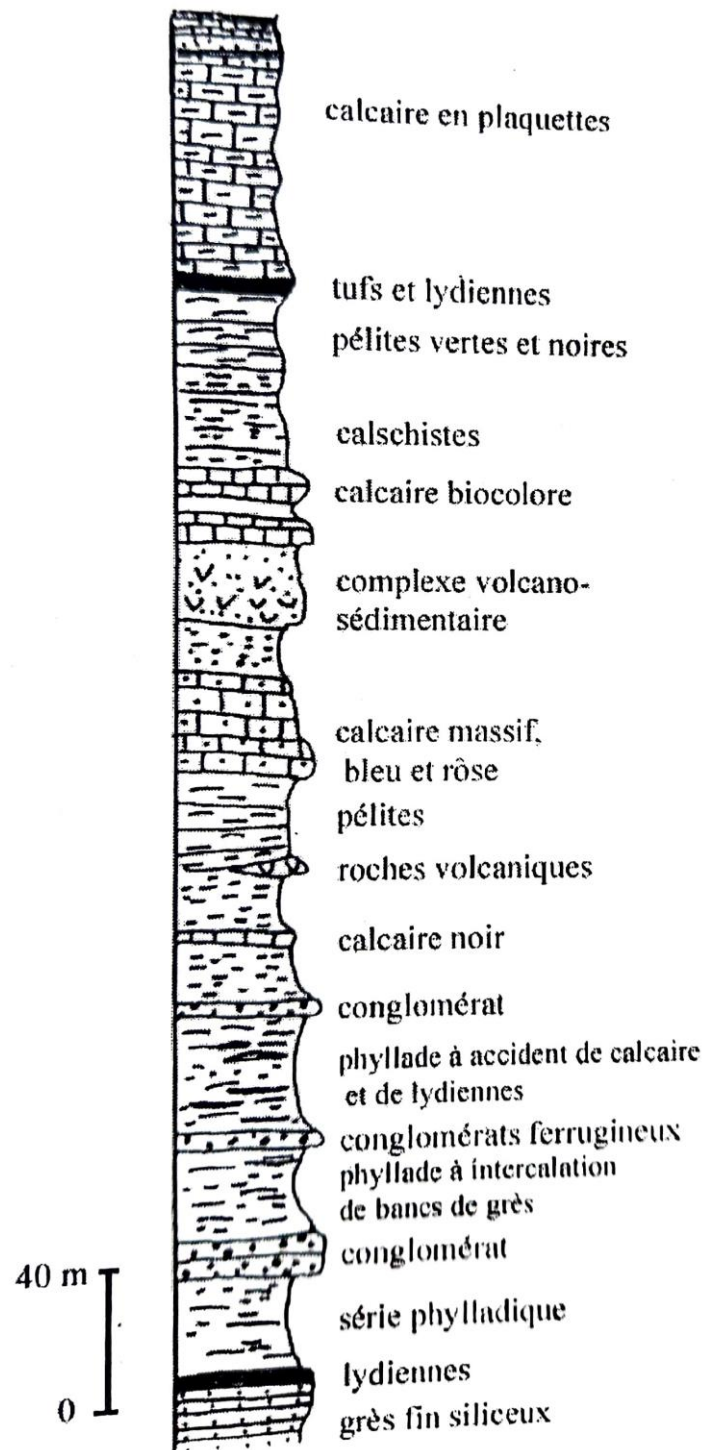


Figure 17: Série stratigraphique synthétique de la nappe de Beni Hozmar (Azzouz, 1992)

La **Dorsale calcaire de la chaîne des Bokkoyas** se présente sous forme d'un empilement de plusieurs unités et d'écailles carbonatées massives triastiques et liastiques. Elle forme les crêtes et les sommets les plus élevés. On distingue deux types de dorsales :

- La Dorsale externe, largement représentée dans le massif des Bokkoyas et correspondant aux unités les plus basses de la Dorsale calcaire. La **figure 18** représente la colonne litho-stratigraphique synthétique de la dorsale externe de la chaîne des **Bokkoyas** (Mouhcine, 1991).
- La Dorsale interne, nommée « unité à Lias blanc », du nom des calcaires blancs massifs liastiques qui la caractérisent. Elle est considérée comme la couverture normale des terrains paléozoïques des Ghomarides.

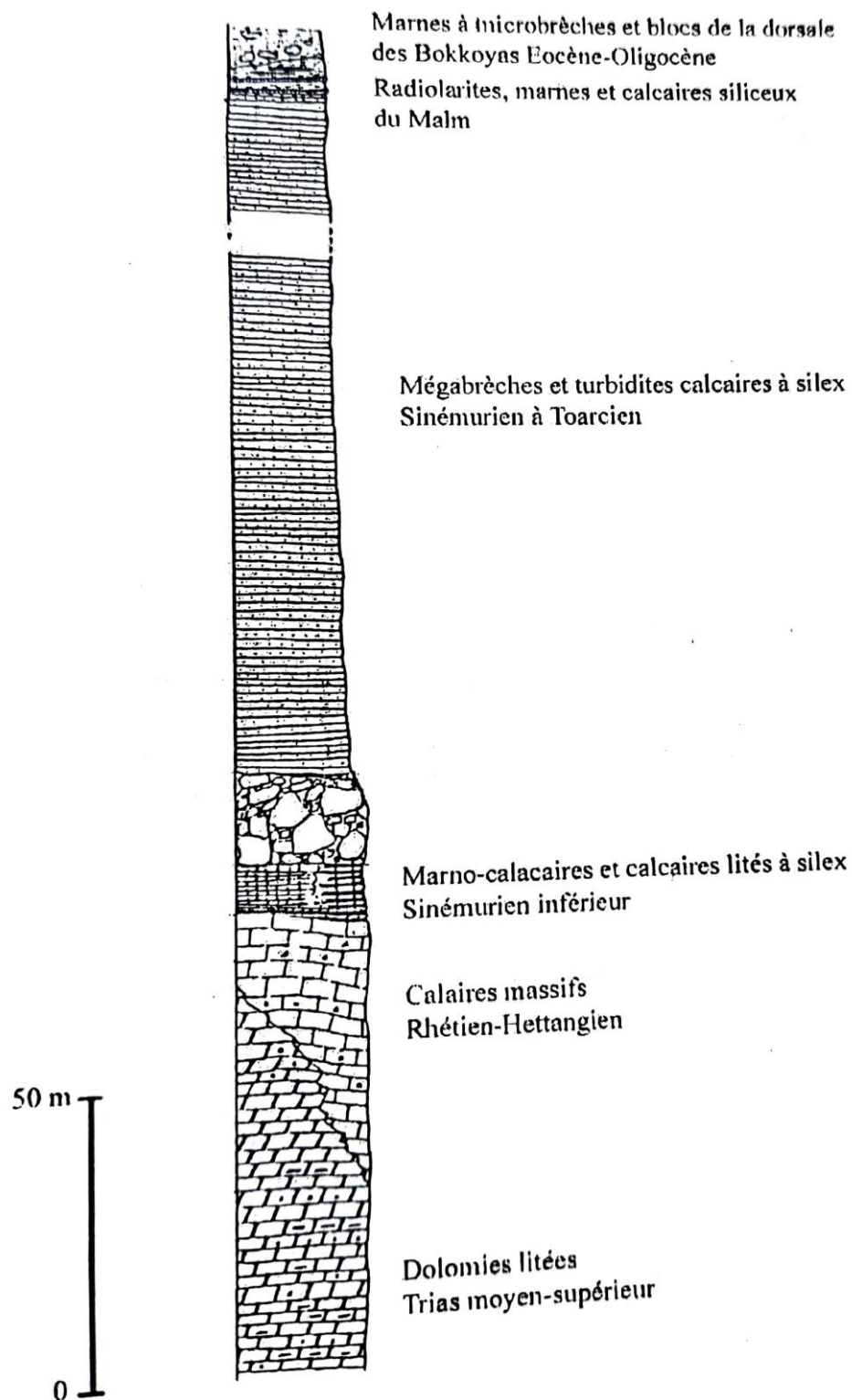


Figure 18: Colonne litho-stratigraphique synthétique de la dorsale externe de la chaîne des Bokkoyas (Mouhcine, 1991)

Les Klippes Paléozoïques **Ghomarides** de la chaîne des Bokkoyas sont constitués de terrains, non ou légèrement métamorphiques de la chaîne rifaine. Ils affleurent dans le massif des Bokkoyas sous formes de Klippes à surfaces réduites occupant le plus souvent des dépressions topographiques. Les Ghomarides sont constitués essentiellement par des terrains siluriens, dévoniens et carbonifères, recouverts localement par une mince couverture méso-cénozoïque. Ils ont été subdivisés dans des travaux antérieurs en 4 nappes différentes : Aâkaili, KoudietTiziane et Beni Hozmar, Quemado.

La **Dorsale calcaire de la chaîne des Bokkoyas** se présente sous forme d'un empilement de plusieurs unités et d'écailles carbonatées massives triasiques et liasiques. Elle forme les crêtes et les sommets les plus élevés. On distingue deux types de dorsales :

- Une dorsale externe, largement représentée dans le massif des Bokkoyas et correspondant aux unités les plus basses de la Dorsale calcaire. Elle a été nommée unité de Boussekour et unité à silex. Elle est constituée par une série de plateforme carbonatée d'âge Trias moyen à Lias inférieur et surmontée en légère discordance angulaire par des mégabrèches et des calciturbidites à silex liasiques dont la base est d'âge sinémurien inférieur à moyen. Le sommet est daté du Domérien à Toarcien ;
- Une Dorsale interne, nommée « unité à Lias blanc », du nom des calcaires blancs massifs liasiques qui la caractérisent. Elle est considérée comme la couverture normale des terrains paléozoïques des Ghomarides.

La **semelle tertiaire des Bokkoyas** (Andrieux, 1971) forme une nappe superposée à la nappe de flyschs de Tisirène et charriée par les unités du domaine interne. Sa série est constituée de bas en haut (Mourier, 1982) par un olistostrome I, des alternances de marnes et de grès à faciès numidien et un olistostrome II.

Les **nappes de flyschs** sont subdivisées d'après les travaux antérieurs en trois nappes : Nappe du Jbel Tisirène ; Nappe du Jbel Chouamat et la Nappe de grès à faciès numidien.

- La nappe du Jbel Tisirène est définie par Durand-Delga et Mattauer (1959), en tant qu'une bande légèrement arquée qui s'amincit vers le NE, et elle sépare la chaîne calcaire de Bokkoyas de l'unité de Ketama. Elle est considérée comme entièrement allochtone et représentée par un puissant flysch d'âge Néocomien à aptien qui comprend localement à sa base (région de Targuist) des turbidites calcaires et des radiolarites du Dogger au Berriasien. La **figure 19** représente la série stratigraphique de la nappe de Tisirène (Andrieux, 1971).
- La nappe du Jbel Chouamat est constituée par un flysch bleu épimétamorphique attribué à l'Albo-aptien (Andrieux, 1971) et par des turbidites calcaréo-radiolaritiques d'âge Crétacé supérieur. Dans le Rif central, le Numidien est mal représenté ; des séries à faciès numidien, en général réduites en volume, ont été rencontrées : dans les klippes de la nappe numidienne ; au sommet de la série du Jbel Chouamat ; emballées ou inter-stratifiées dans la semelle tertiaire des Bokkoyas ;
- La nappe de grès à faciès numidien s'étend le plus loin vers le sud en position allochtone sur le Subrif. Elle affleure au Jbel Berkane ou elle est constituée par une puissante masse gréseuse d'âge Aquitainien et qui occupe généralement une position structurale élevée.

Le **Subrif** représente une grande partie du Rif externe, il regroupe l'unité intra-rifaine de Ketama, le Mésorif interne et le Mésorif externe (Asebry et al., 1987). Le Subrif se prolonge vers la partie orientale de la chaîne rifaine, par le massif des Tamsamanes. Les séries, essentiellement crétacées, des massifs de Ketama et des Tamsamanes se sont déposées dans un même bassin paléogéographique (Asebry, 1994) dont l'histoire commence au Jurassique en association avec un amincissement crustal (Michard et al., 1992) associé à la mise à l'affleurement des péridotites de Beni Malek (Rif Oriental). Le bassin paléogéographique subrifain est représenté par une série litho-stratigraphique continue, assez complète, allant du Lias inférieur et moyen jusqu'au Tertiaire. La disposition actuelle de différentes séries du Subrif, résulte des phases tectoniques qui se sont succédées depuis le paroxysme miocène.

Le complexe tectono-sédimentaire du **Prérif** est un olistostrome d'âge Tortonien dont l'équivalent oriental est l'unité chaotique Gareb-Kebdana. Il s'agit d'un complexe tectono-sédimentaire à klippes sédimentaires dont l'âge va du Trias ou Tortonien supérieur. Ces klippes constituent un méga-olistostrome dont la matrice est essentiellement marneuse d'âge Tortonien supérieur. Ce bassin complexe a servi de réceptacle aux nappes et klippes qui provenaient des régions plus internes (Suter, 1980 a et b ; Leblanc, 1975 et 1980 ; Bourgeois, 1977). Le Prérif peut être subdivisé en deux sous-ensembles : Le Prérif interne, constitué par des écailles enracinées sous le Mésorif. Le Prérif externe est formé d'une épaisse série marneuse.

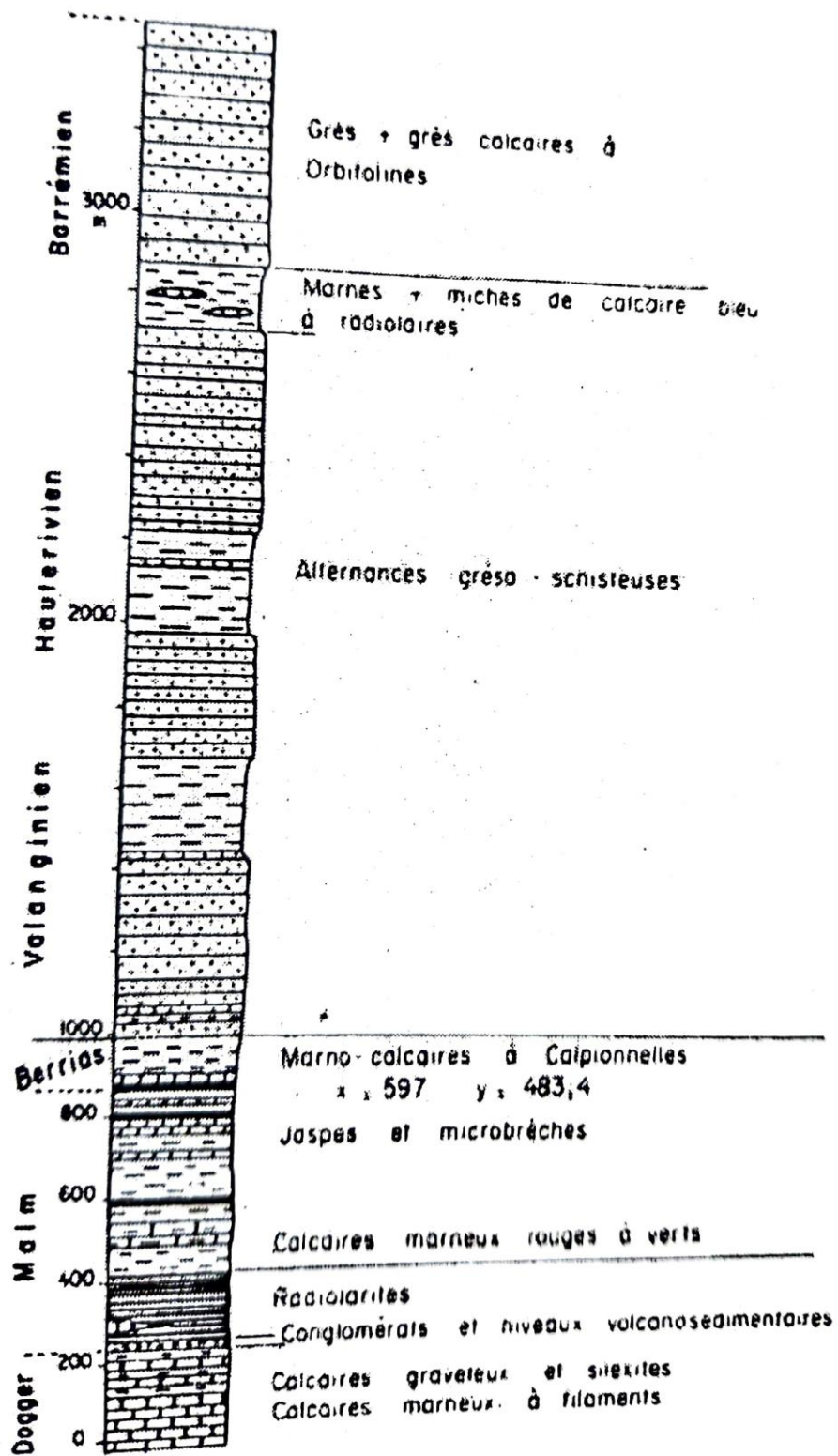


Figure 19: Série stratigraphique de la nappe de Tisirène (Andrieux, 1971)

2. Terrains Néogènes post-nappes

2.1. Bassins Néogènes

Le **bassin de Mellila et kert** est situé dans le Rif nord oriental, limité à l'Ouest par le massif des Beni-Said et des Tamsamanes, à l'Est par la chaîne des Beni-Bou Ifrou et de Tistounine, au sud par la chaîne du Gareb, et au nord, il est ouvert sur la Méditerranée. Il est subdivisé en deux bassins (Ait Brahim, 1991) : au NE le bassin Mellila, au SW le bassin du Kert. Des études concernant surtout la stratigraphie de ces bassins ont été

réalisées par, Arias et al., (1978), Guillemain et Houzay (1982), Ben Moussa (1982), El Hajaji (1982), Saint-Martin et Rouchy (1986), Ait Brahim (1991) ;

Le **bassin de Nador – Kibdana** est limité à l'ouest par les montagnes de Tistounine et des Beni-Bou Ifrou, au sud par la chaîne du Gareb-Kibdana et au NE il est ouvert sur la mer Méditerranée ;

Le **bassin de Boudinar** est limité à l'est par l'accident du Nekor qui longe les Temsamans, à l'ouest par le massif volcanique de Ras-Tarf et le mont Trougout, au nord il est bordé par, la Méditerranée ;

Le **bassin du Bas – Nekor (bassin d'Al Hoceima)** est limité à l'ouest par la chaîne des Bokkoyas, les nappes des flyschs et l'unité de Ketama ; à l'est par le volcan de Ras Tarf, au sud et SE par l'unité de Ketama, au nord par la mer Méditerranée. Il ne montre pas l'affleurement et formations néogènes. Il est entièrement couvert par des terrains alluviaux quaternaires. Les sondages hydrogéologiques et géophysiques électriques indiquent jusqu'à 400m de limons, sables galets et cailloutis alluviaux surmontant une formation à faible résistivité qui pourrait correspondre à des marnes argileuses peut être moi pliocènes. Sa puissance varie entre 200 et 400m (Thauvin, 1971) reposant sur le substratum plissé et métamorphique de Ketama.

2.2. Volcanisme Néogène du Rif Oriental

Volcan du Cap des trois fourches : Son activité date de 9.8 Ma, et a duré 0.5Ma. Elle débute dans un premier temps dans le couloir d'Ajelman par des tufs et de coulées inter-stratifiées dans le Tortonien. Dans un deuxième temps l'activité volcanique aboutit à l'édification du massif principal des trois fourches. Elle se manifeste par une activité explosive à cinérites, une brèche à bloc d'obsidienne et ciment cinéritique et des coulées qui vont s'étendre loin en mer. Enfin l'activité volcanique va se terminer par la mise en place d'intrusions, d'abord le dyke de Tibouda, ensuite le dôme de Tahrarat ;

Volcan de Gourougou : Comprend un strato-volcan et des satellites. Les laves se sont mis en place entre 9 et 4.6 Ma ; il s'agit d'une série shoshonitique allant des absarokites aux trachytes. Les premières manifestations explosives de pyroclastites (cinérites, tufs) sont masquées par les suivantes qui sont inter-stratifiées dans la série messinienne, ceci indique que les premières éruptions ont eu lieu au début du Tortonien supérieur. Au cours du Messinien le massif principal du Gourougou va finir par émerger au moment où dans son entourage plusieurs autres cônes de pyroclastites et de brèches grossières vont continuer à se sédimenter dans la mer messinienne ;

Volcan Tortonien de Ras Tarf : Constitué essentiellement de brèches pyroclastiques qui proviennent de la fragmentation de coulées sous-marines (Bourdier, 1987). Les coulées sont des andésites à caractère calco-alcalin, datées de 13 à 12 Ma (Hernandez et al., 1987). Les brèches sont traversées par des dykes de puissance métrique. Le long de la côte Nord du bassin de Boudinar affleure des tufs hyaloclastiques intercalés dans les brèches qui correspondent à des projections d'expositions sous-marines (Bourdier, 1987). Les formations de Ras-Tarf reposent directement sur le socle de trougout et sont séparées du bassin de Boudinar par un système de failles moi-pliocène. Elles sont recouvertes par des formations messiniennes et plio-quaternaires.

3. L'avant pays oriental de la chaîne rifaine

La chaîne rifaine est bordée à l'est par l'avant-pays oriental dont nous allons préciser la stratigraphie : il comporte plusieurs ensembles sédimentaires et structuraux :

- Un avant-pays tectonisé supportant localement l'unité chaotique tortonienne (Gareb nord, Kibdana) ;
- Un avant-pays plus ou moins déformé (Beni Bouyahi, Terni-Masgout) ;
- L'évolution sédimentaire est semblable à celle du domaine atlasique du Trias au Bathonien, c'est-à-dire de type plate-forme, et de type mer marginale à partir du Callovien (Cattaneo, 1987).

4. CARTE DES FACIES – GEOLOGIE SIMPLIFIEE

L'étude bibliographique du Rif oriental et notre base de données constituée de données variées sous environnement SIG, intègre une carte de faciès simplifiée du bassin d'étude (**Figure 20**). Elle est produite à la base des feuilles géologiques scannées, géoréférencées et vectorisées. Les données de type vecteur couplées aux données de reconnaissance terrain a permis de valider la carte finale, donnée élémentaire pour la cartographie de la susceptibilité à l'aléa mouvement de terrain.

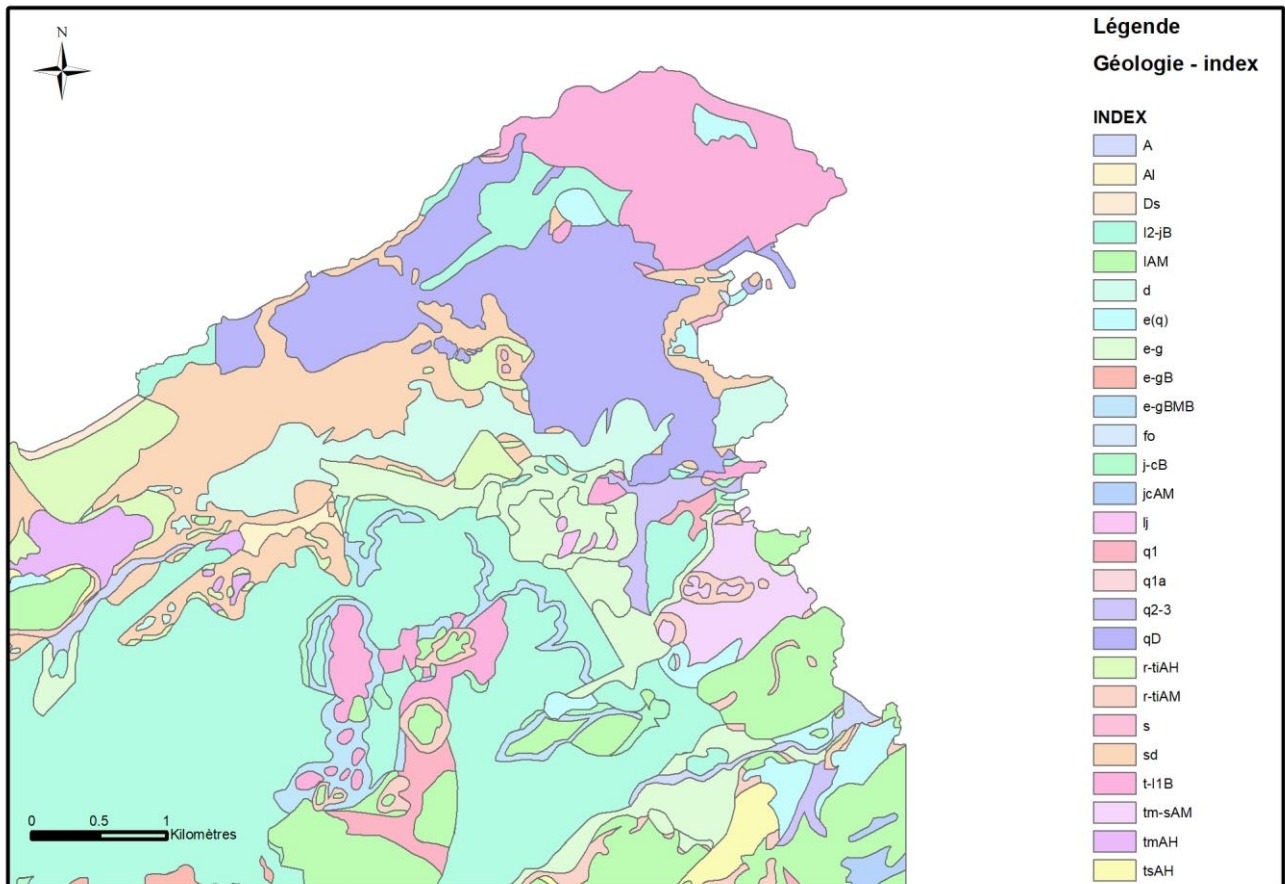


Figure 20: Carte de faciès simplifiée du bassin d'étude sous environnement SIG

IV. Mise en place d'une base de données géographique de l'étude

1. Introduction

Dans le cadre de ce travail de recherche, une base de données géographique (sous environnement SIG) est élaborée pour mettre en application les objectifs de l'étude. Le SIG intègre l'ensemble des données géographiques se rapportant à la région d'Al Hoceima. La zone s'étend sur environ 3550 km² et dispose d'une banque de données riche. Les informations spatiales, attributaire et/ou temporelles stockées portent sur les aspects suivants :

- La géologie et la carte des faciès simplifiés ;
- La topographie du terrain représentée par des modèles numériques (de terrains, de surfaces et d'élévations) : MNT ; MNS et MNE ;
- Les sites d'instabilités recensés par étude bibliographique et par reconnaissance terrain ;
- La géotechnique du sol sous forme de sondages réalisés dans le cadre des études d'aménagement et construction ;
- L'imagerie satellitaire, aérienne et drone pour dériver des détails supplémentaires sur les enjeux présents en occupation du sol ;
- Les feuilles de restitution à l'échelle 1/2000^e, issues des missions de photogrammétrie ;
- La sismicité et la carte des fractures ;
- Le réseau hydrographique de la zone produit par extraction automatique des MNT ;
- Les statistiques et données urbaines du territoire ;

Etc.

Une consultation des données disponibles, travaux antérieurs et synthèse actualisée de l'ensemble des données portant sur la zone d'étude a permis de constituer une base de données géoréférencées très riche, permettant le géo traitement de l'information et la cartographie des phénomènes étudiés. Un certain nombre de documents cartographiques a été élaboré, en vue d'une meilleure identification des aléas, vulnérabilités, risques naturels, etc. L'exploitation de ce SIG permettra également :

- La constitution d'une base de données riche et actualisée de façon périodique ;
- L'optimisation des traitements et analyses spatiales effectuées sur les données tout en respectant les règles de précisions et fiabilités ;
- La mise en place d'une source de données géoréférencées, consultable et répondant aux requêtes des différents utilisateurs ;
- La cartographie des instabilités en définissant l'échelle de production conforme aux échelles des données de base.

Un SIG peut se définir comme un système informatique d'acquisition, de stockage, de gestion, d'analyse, de représentation et de mise à jour des données géoréférencées. Au sens large, le SIG comprend aussi bien l'ensemble des données géographiques numérisées relatives à une région, que le logiciel qui les manipule. Au sens restreint du terme, le SIG désigne le seul outil informatique utilisé (Didon, 1990). Le SIG est une technologie apparue au début des années 1980 et a connu un développement rapide du fait de ses performances. Il constitue en fait un outil puissant d'aide à la prise de décision par la qualité et la rapidité des réponses qu'il fournit aux requêtes formulées par l'utilisateur. L'utilité du SIG dans le cadre de la gestion et prévention des risques naturels est un choix pertinent. Les logiciels de SIG sont relativement nombreux (Arc Gis, MapInfo, QGIS, Idrisi,..). Les logiciels Arc Gis et QGIS ont été choisis en raison des performances démontrées, facilité d'utilisation et pour le fait qu'il soit très utilisé par la communauté scientifique.

2. Généralités sur les bases de données et SIG

2.1. Composantes d'un SIG

Le cœur d'un Système d'Information Géographique est constitué par la base de données géographique (BDG), composée de deux éléments (Collet, 1992) : Une base de données décrivant les objets spatiaux (sous forme de couches) et une base de données alphanumérique (attributaire) définissant les caractéristiques thématiques (noms des localités, sites d'études, données démographiques, données de sondage et enquête, etc.) des objets spatiaux. Autour de cette base de données gravite un ensemble de systèmes informatiques avec lesquels elle est en interaction. Chaque système a une fonction précise au sein du SIG (Didon, 1990) :

- Le système de saisie numérique : permet de saisir les documents à caractère spatial (telles que les cartes topographiques, géologiques...) et de convertir l'information analogique en une information numérique. Les bases de données alphanumériques (attributs) peuvent être directement saisies dans de nouvelles tables du SIG ou importées à partir d'autres logiciels ou base de données relationnelles (Excel, Access, Power AMC...) ;
- Le système de traitement d'images : les images qui ne peuvent être digitalisées (photos aériennes, satellitaires, etc.) peuvent être scannées et géoréférencées : attribution de coordonnées (x, y, z) à chaque point de l'image dans le type de projection correspondant à la zone étudiée.
- Le système de gestion de la base de données : un SIG contient non seulement un SGBD traditionnel (gestion des données thématiques), mais aussi une variété d'outils capables de gérer à la fois les dimensions thématiques et spatiales de l'information. Par exemple, le SGBD permet de répondre à des requêtes formulées par les gestionnaires des risques naturels (sélection des zones à risque relatives à un secteur donné, combinaisons mathématiques plus ou moins compliquées (pente de terrain, faciès, exposition, profondeur de la nappe, présence de faille, etc.) et de mettre les résultats dans des tableaux, graphiques ou supports cartographiques directement exploitables par l'utilisateur.
- Le système d'analyse spatiale : l'analyse spatiale de l'information représente l'outil le plus puissant d'un SIG. Elle constitue une extension des capacités d'interrogation des bases de données traditionnelles, en tenant en compte de la localisation des observations et paramètres. Ce système permet par exemple de fusionner plusieurs objets selon des critères et des conditions fixés par l'utilisateur, et de créer ainsi de nouvelles tables plus renseignées. Un deuxième exemple consiste à

sélectionner les zones les mieux exposées et les moins vulnérables et à mettre les résultats de cette combinaison dans une nouvelle carte. Le système d'analyse spatiale a une liaison bidirectionnelle avec la base de données géographique. Ainsi, il prélève à la fois de l'information de la BDG et la complète à l'aide des résultats des analyses effectuées.

- Le système de représentation cartographique : Ce système permet de sélectionner des éléments de la BD géographique et de les cartographier à l'écran de l'ordinateur ou à l'imprimante.

2.2. Représentation des données géographiques dans le SIG de l'étude

Les données géographiques du SIG, existent suivant deux modes principaux de représentation spatiale : le mode raster et le mode vecteur (Collet, 1992). Le mode vecteur permet la représentation des objets dans un espace continu (non discrétisé) : les objets et leurs limites sont digitalisés et leur représentation se fait sous trois formes de base : les points (ex : point de sondage ou reconnaissance, site d'instabilité, etc.), les polygones (ex : ligne de faille, réseau hydrographique, réseau routier, etc.) et les polygones (ex : limite d'une formation géologique, d'un glissement, etc.). Ce mode permet une représentation plus conforme au monde réel. La sortie des documents est d'une grande qualité. Il ne permet pas cependant de faire des calculs entre les différentes couches cartographiques du SIG.

Le mode raster correspond à une division régulière de l'espace étudié en cellules rectangulaires ou carrées (pixel). Il est fortement lié à la notion d'image. Les images satellitaires, aériennes, MNT (modèles numériques de terrain) et cartes topographiques scannées sont des exemples. Chaque pixel est référencé en ligne et en colonne et contient une valeur correspondant à une grandeur numérique. Ce mode de représentation est par contre très adapté pour effectuer des calculs entre les différentes couches du SIG et analyser les données spatiales, constituées de pixels de même dimension. Les opérations sont effectuées entre chaque pixel de mêmes coordonnées. Loin de s'opposer, les deux modes de représentation (vecteur et raster) se complètent dans leur utilité pour représenter et modéliser le monde réel.

Dans le SIG de l'étude (**Figure 21**), les données de la région sont modélisées sous forme de couches d'information séparées, relatives à différents thèmes (ex : réseau hydrographique, nature des sols, faciès géologiques, altitudes, failles, etc.). Ces couches (ou couvertures) peuvent être recombinaisonnées pour analyse, pour la création d'un nouveau dossier (contenant l'ensemble des couches combinées) ou simplement superposées pour visualisation ou pour impression. Toutes les couches d'information spatiale sont géoréférencées (définition du lien existant avec la position à la surface de la terre).

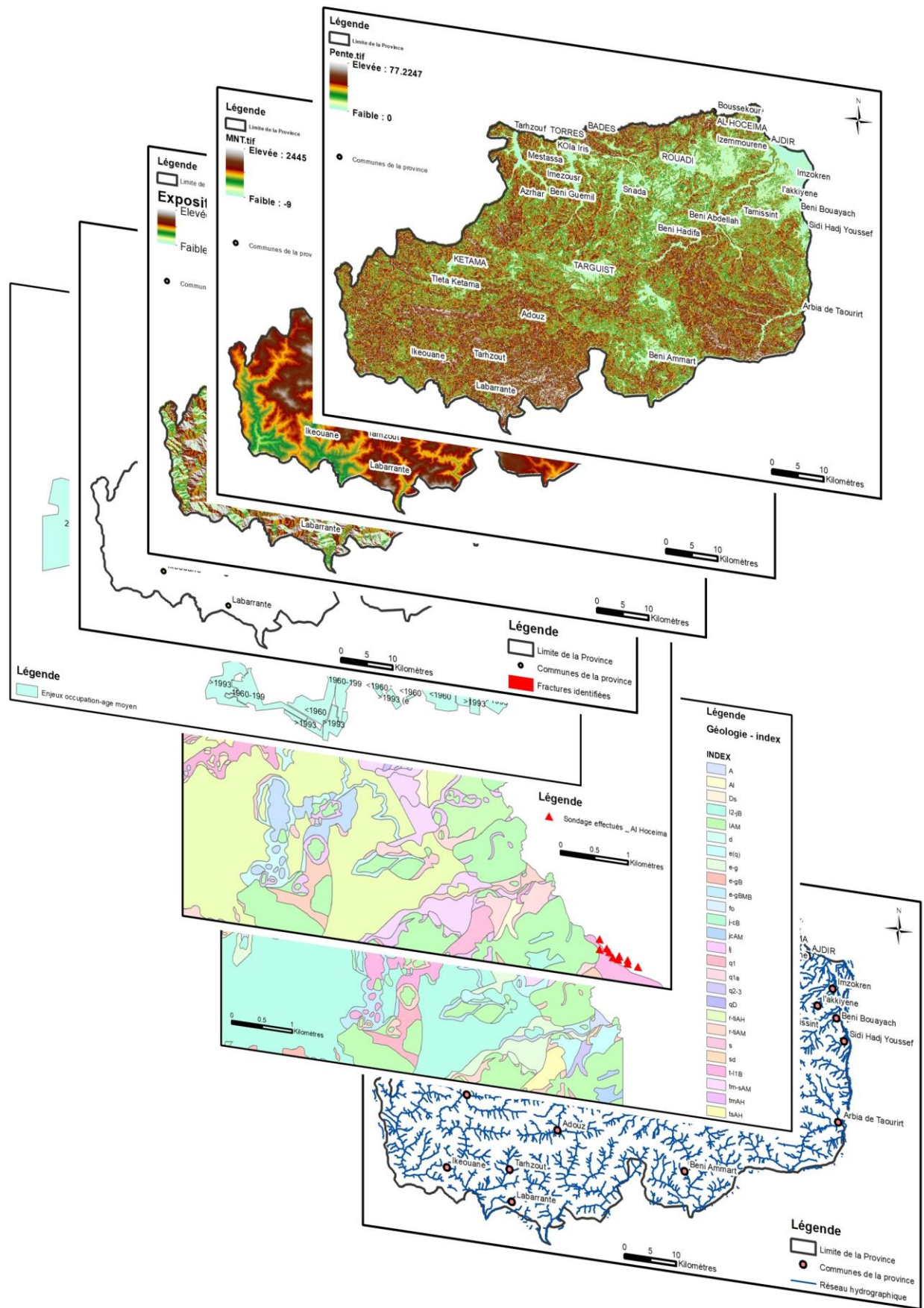


Figure 21: SIG de l'étude, comportant l'ensemble des couches de données à référence spatiale de la zone, après structuration, intégration et harmonisation. Couches par ordre du haut au bas : Carte des pentes, cartes des élévations (MNT), carte d'exposition, carte des fractures, occupation urbaine avec l'âge des bâtiments – format vecteur, géologie simplifiée (représentée par index) – format vecteur, sondages – format vecteur, réseau hydrographique obtenu par extraction du MNT STRM – format vecteur.

2.3. Synthèse des données de notre SIG élaboré

Le tableau suivant indique de manière précise les données intégrées dans notre SIG, le thème appliqué, l'organisme chargé de la donnée, l'importance, l'échelle et le niveau de précision pour des cas d'études différents (Tableau 2).

Tableau 2: Récapitulatif des données disponibles au niveau de la BD SIG, de leur utilisation pour la cartographie des instabilités (au niveau de l'aléa, la susceptibilité et le risque associé), de leur importance et précautions à prendre.

Thème	Donnée à utiliser		Disponibilité	Organisme (s) chargé (s) de la donnée	Domaine d'utilisation	Applicabilité pour la cartographie des instabilités	
	Type	Echelle/Résolution				Importance	Précaution
Inventaire des sites d'instabilité	Carte des études antérieures en format image	10.000° et plus	Limitée	Auteur privé et public	Etude de la susceptibilité + aléa	++++	Donnée vérifiée par reconnaissance terrain
Géomorphologie du terrain	Feuille topographique (Figure 22)	25.000° ; 50.000° en format image et vecteur	Disponible	ANCFCC	Etude de la susceptibilité + aléa + vulnérabilité	++	Donnée validée par l'auteur
	Imagerie satellitaire (Figure 23)	Echelle limitée : 10m pour le panchromatique et 15m pour les bandes colorées	Disponible	USGS		++	Donnée à précision réduite + nécessite un modèle de correction et rectification poussé (en radiométrie et géométrie)
	Orthophotos	Echelle très bonne : 5 à 8 cm	Limitée (aux zones urbanisées ; villes)	AU ANCFCC		++++	Donnée très précise
	Restitution photogrammétrique (Figure 24)	Echelle très bonne : 5 à 8 cm ; 2.000° au 5.000°					
Topographie et dérivées	MNT STRM (Figure 25)	Echelle limitée : 10m	Disponible	USGS	Etude de la susceptibilité + aléa	++	Donnée à précision et fréquence de mise à jour réduite
Géologie et sol	Carte de géologie simplifiée (Figure 20)	Echelle 50.000°		Département Ministériel		+++	Donnée à précision limitée, nécessite un travail terrain pour rectification et validation
	Carte des sols					+++	
Hydrologie	Carte du réseau hydrographique (Figure 26)	Carte provinciale : 10m ; Carte locale à l'échelle communale : 5 à 8 cm		USGS AU ANCFCC		++	Donnée nécessite un traitement spécifique pour l'extraction à partir des MNT
Occupation du sol	Carte de l'occupation du sol (Figure 27)	Occupation provinciale : 10m – 15 m ; Carte locale à l'échelle communale : 5 à 8 cm			Etude de la susceptibilité + vulnérabilité	+++	Donnée très précise pour le cas des cartes à échelle communale ; Donnée à échelle provinciale, à précision réduite + nécessite un modèle de correction et

								rectification poussé (en radiométrie et géométrie)
Sismicité et fractures	Données sismiques, bibliographiques et sondages (Figure 28, 29 et 30)	Echelle 25.000 ^e ; 50.000 ^e	Limitée	Auteur privé et public	Etude de la susceptibilité + aléa	++		Donnée à précision limitée, nécessite une étude ponctuelle pour des cas à précision voulue
Fond d'image open source sur le Web	API de Google EARTH ENGINE	Echelle limitée	Disponible	Donnée open source	Etude de la susceptibilité + aléa + vulnérabilité	++		Donnée à échelle provinciale, à précision réduite + nécessite un algorithme approprié pour la classification + correction et rectification poussé (en radiométrie et géométrie)

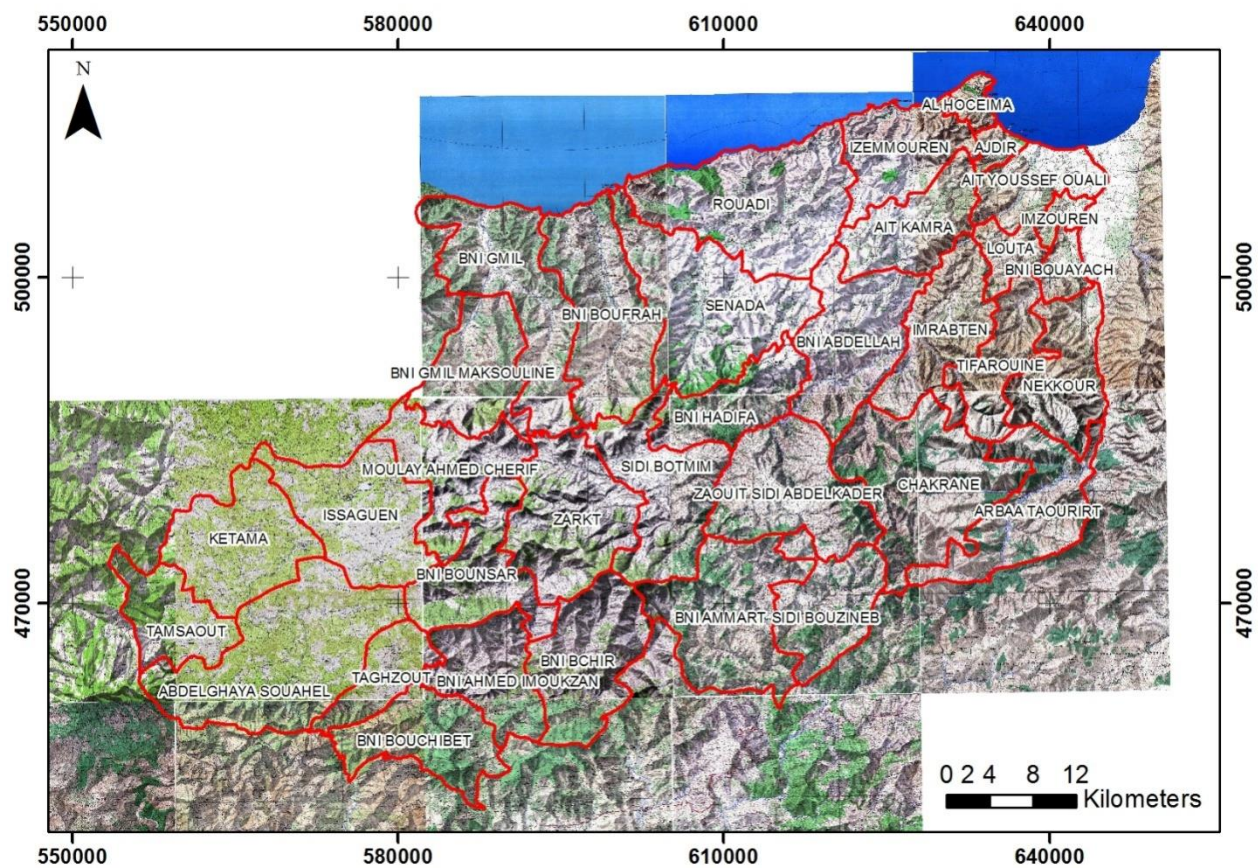


Figure 22: Assemblage des feuilles topographiques de la zone à l'échelle provinciale

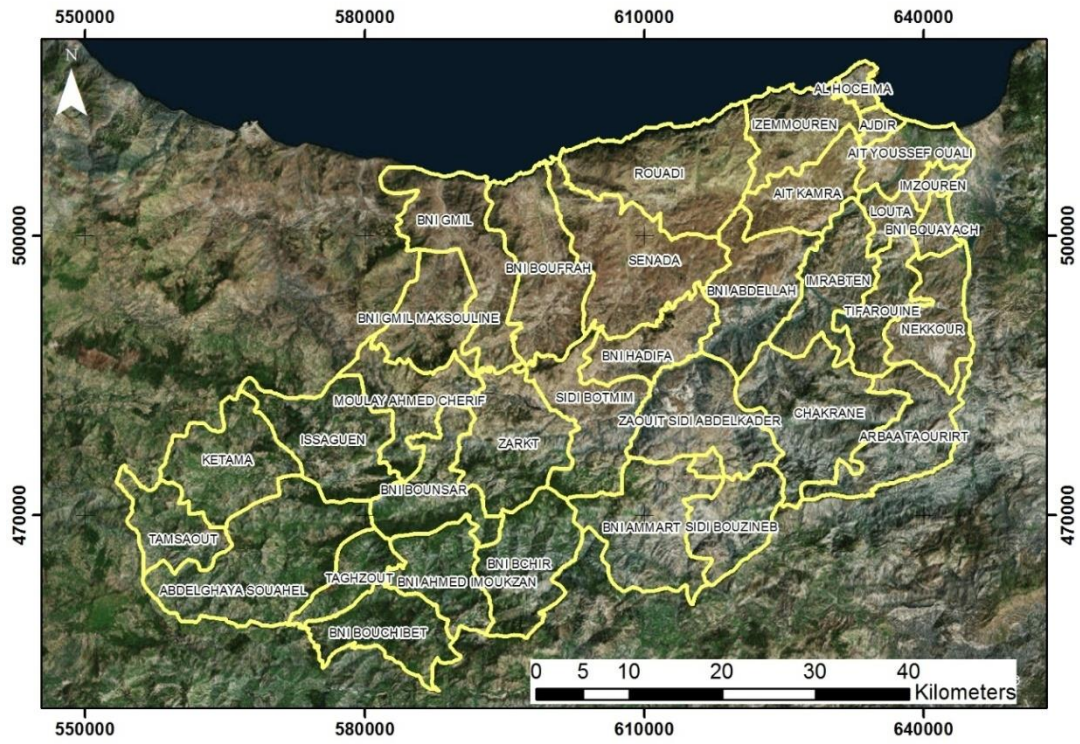


Figure 23: Imagerie satellitaire de la zone à l'échelle provinciale

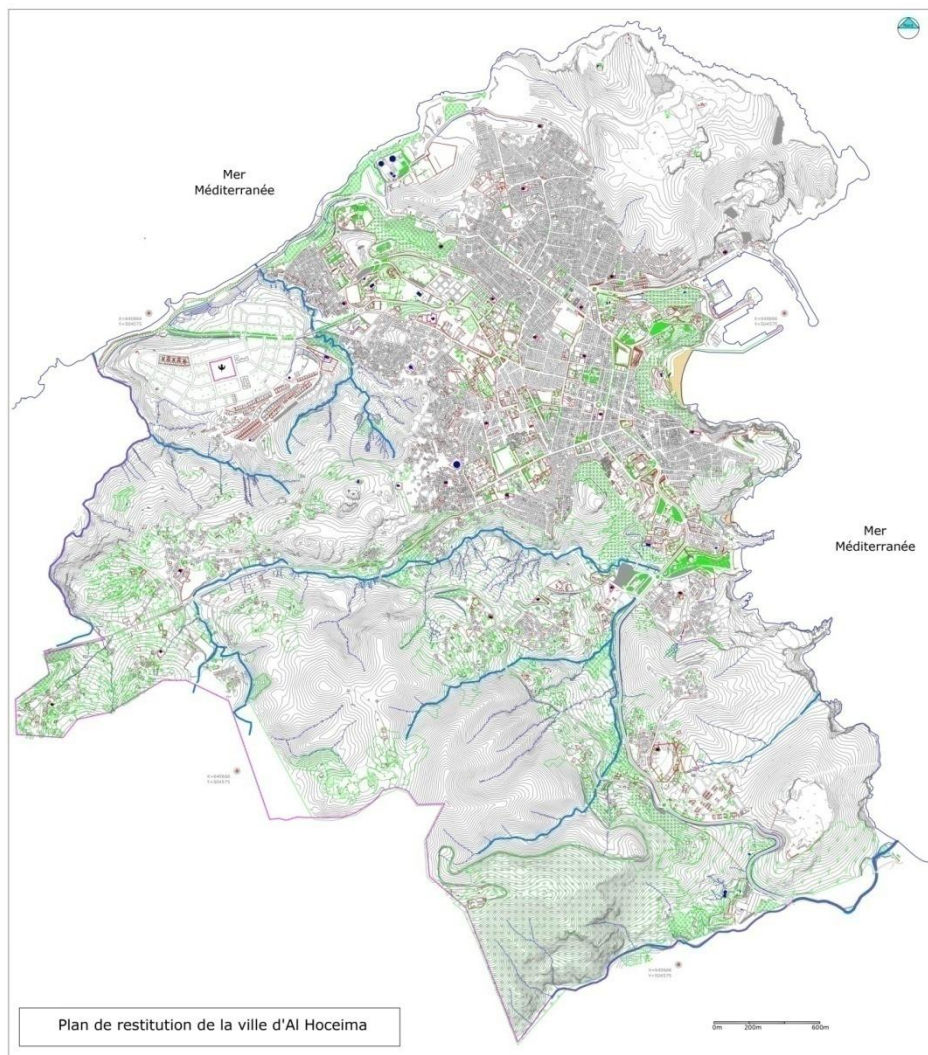


Figure 24: Feuille de restitution de la ville d'Al Hoceima, produite par photogrammétrie à l'échelle 2000e

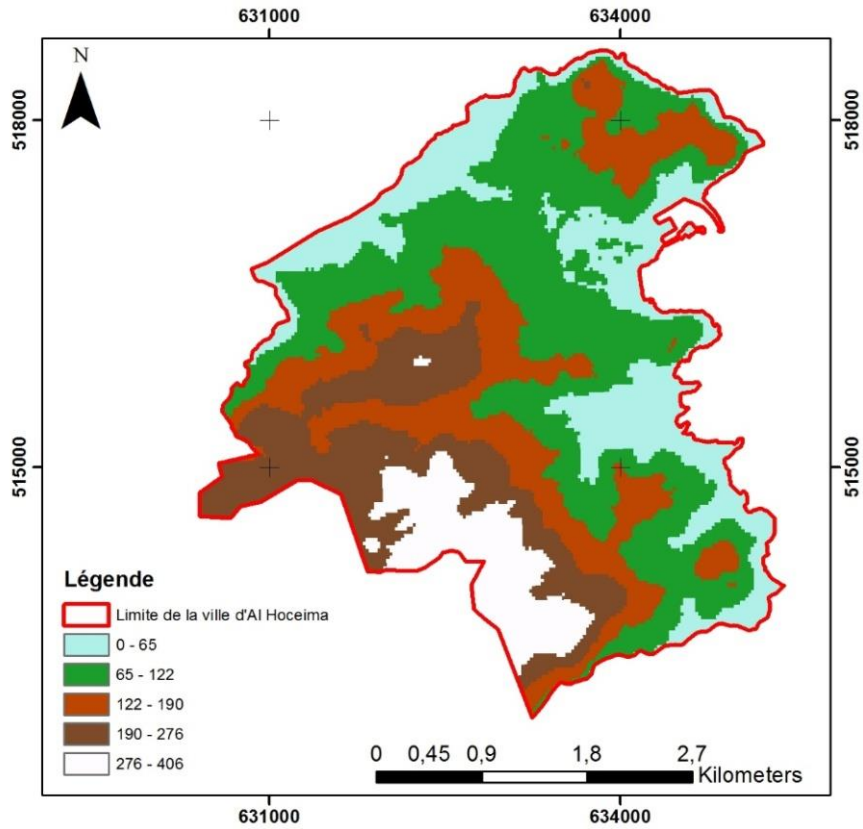


Figure 25: Modèle numérique de terrain de la ville d'Al Hoceima (mission STRM)

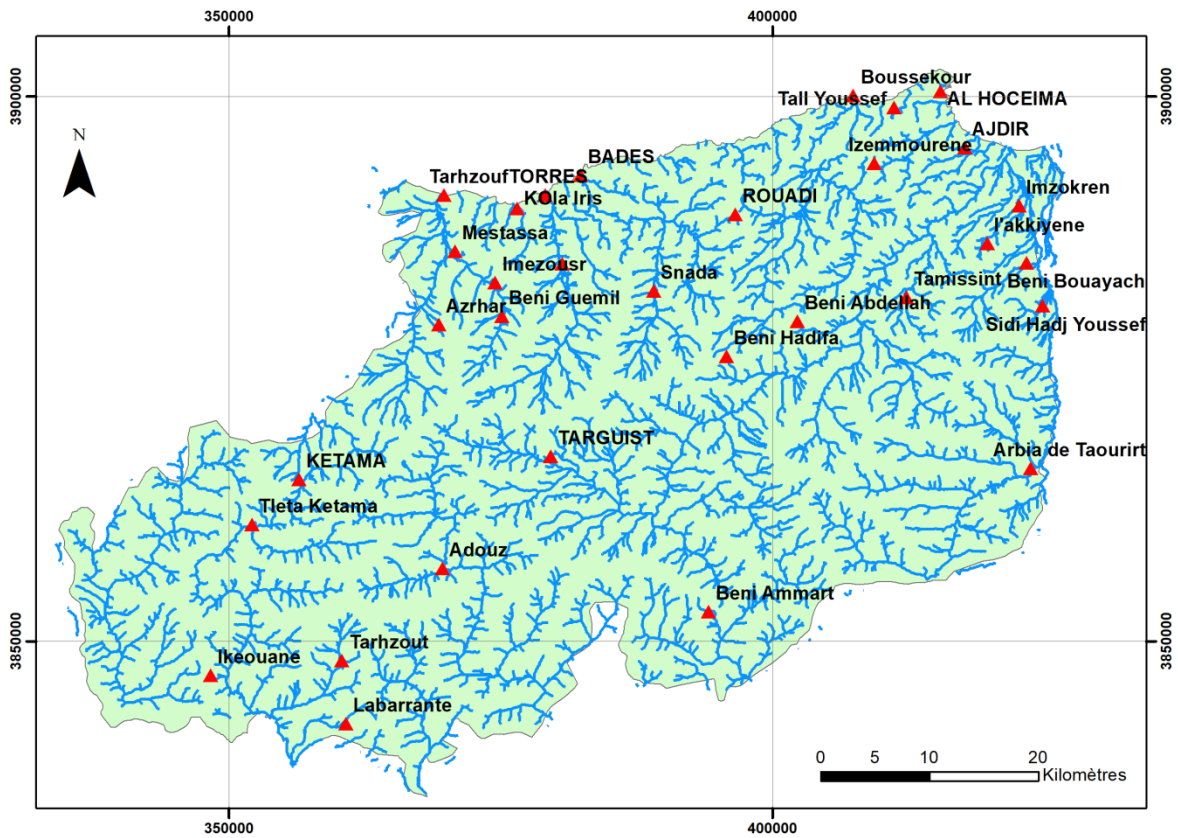


Figure 26: Réseau hydrographique de la province après extraction du MNT STRM au 10m de pas

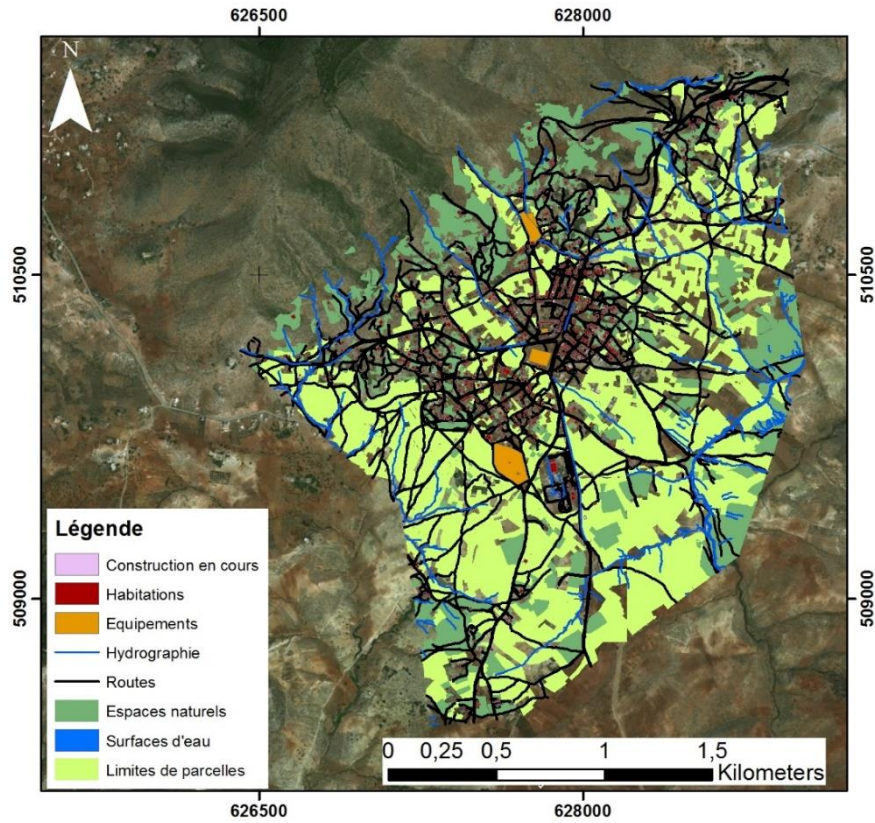


Figure 27: Données de l'occupation du sol de la ville d'IMZOUREN en format SIG, obtenues par restitution des images aériennes ;

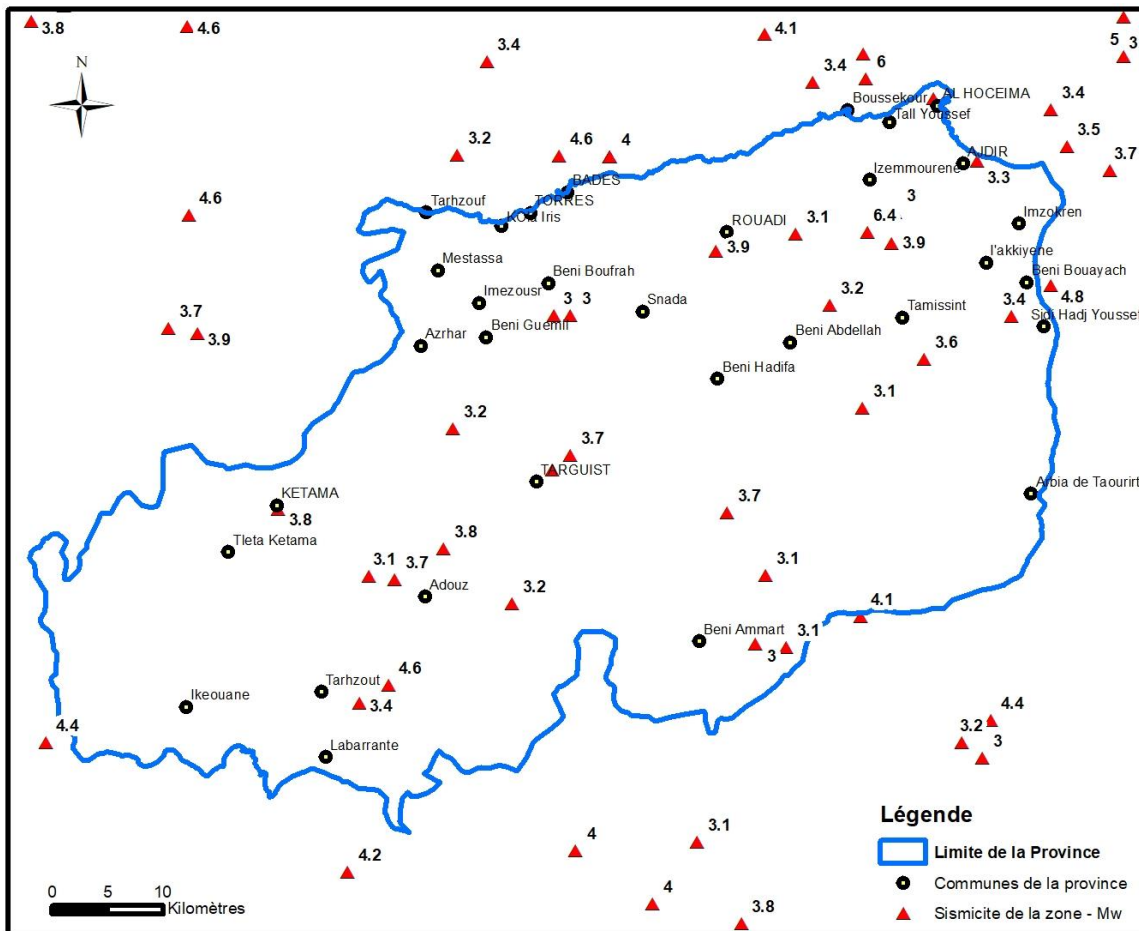


Figure 28: Données des événements sismiques du bassin de notre étude

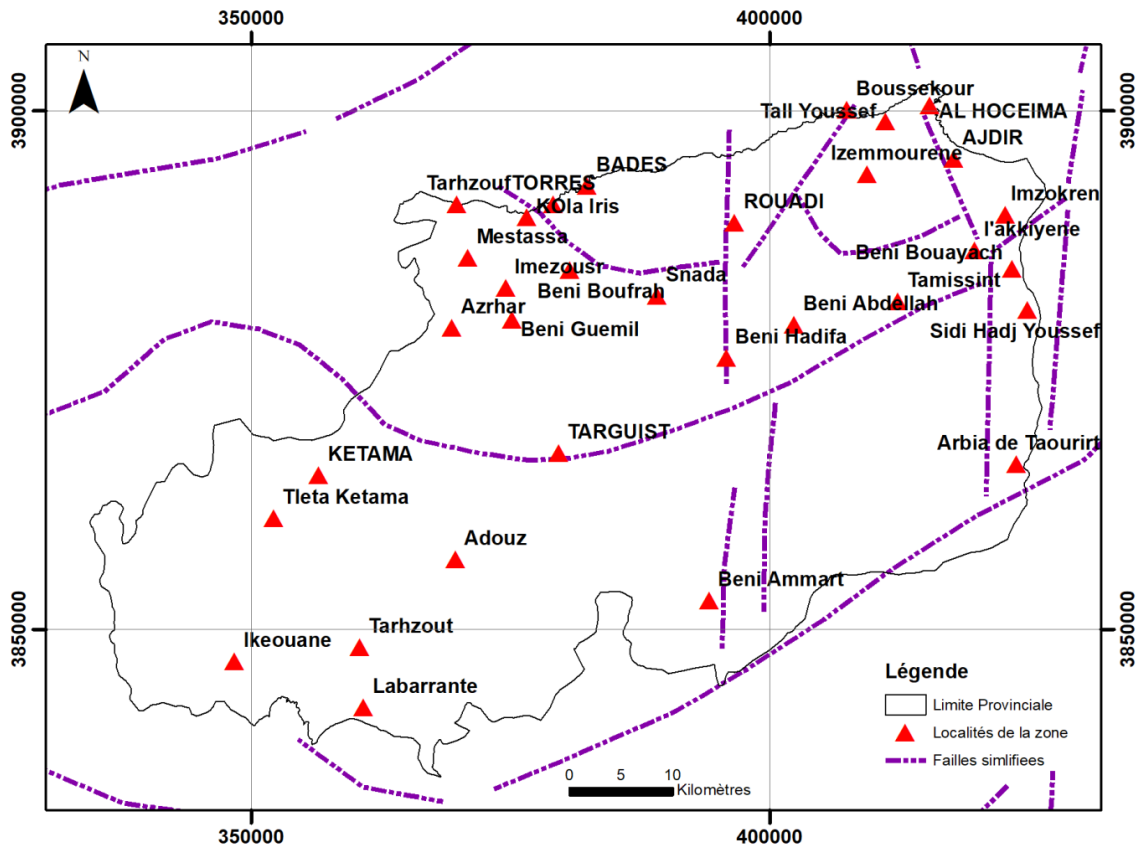


Figure 29: Données des failles simplifiées de la province

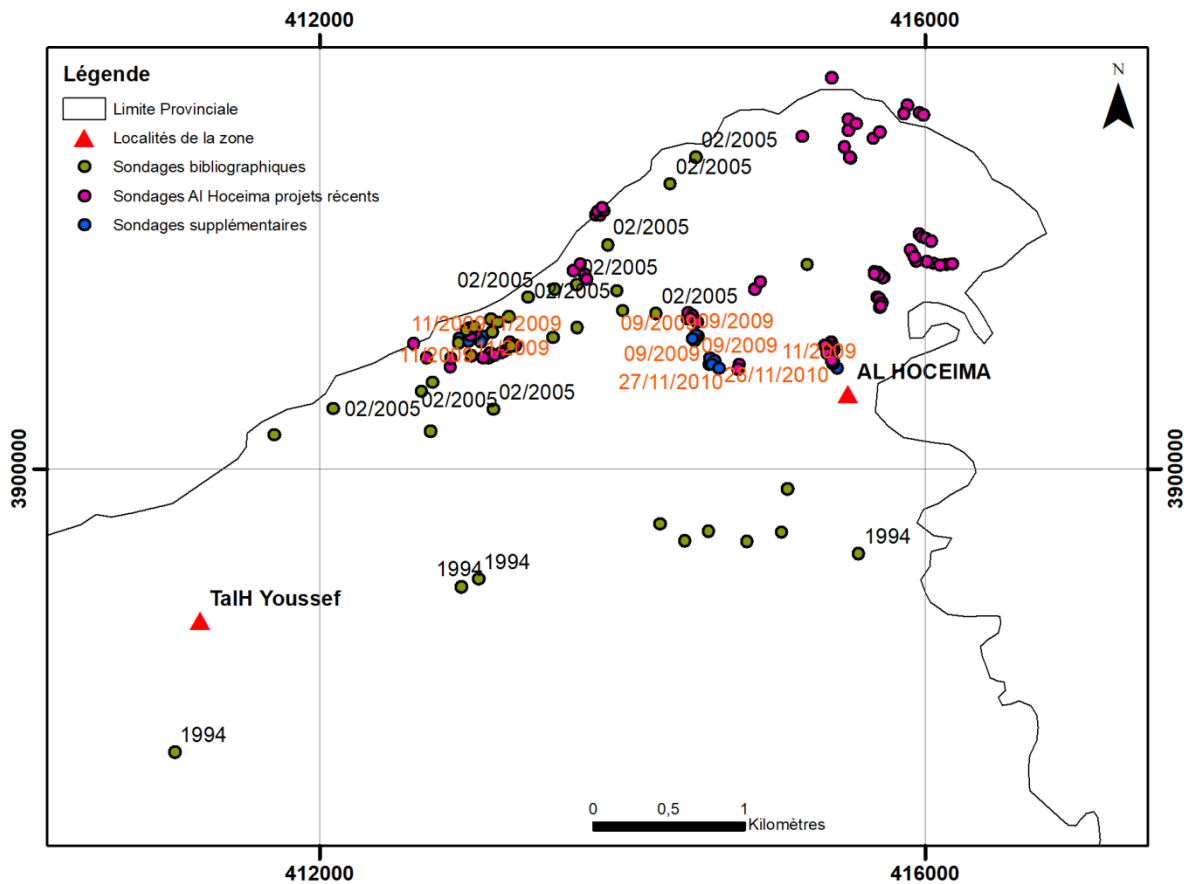


Figure 30: Sondages collectés à l'échelle de la ville et communes limitrophes (source : KHALID MARGAA, CNRST, IMSRN, projets d'aménagement à la province)

V. Conclusion

La sismicité témoigne des zones d'accommodation qui sont le lieu des tremblements de terre destructeurs avec d'autres accommodations qui peuvent se faire dans des régions loin de la limite présumée entre les plaques. L'activité sismique de la zone engendre également des fissures et des instabilités au niveau des formations superficielles (fentes de tension, escarpements, mouvements de masses, glissements, etc.).

Dans parties qui suivent, j'ai essayé de répondre aux questions qui peuvent se poser :

Quels sont les concepts de base indispensables dans le cadre de l'étude des risques naturels et les instabilités de terrain particulièrement ?

Quels sont les approches utilisées pour évaluer l'intensité des instabilités de terrain dans des zones d'enjeux humains et matériels ?

Peut-on adopté un seul modèle d'évaluation du risque instabilité de terrain ? Quelle sont les données indispensables pour chaque cas d'étude/échelle de cartographie ?

Quels sont les démarches d'évaluation de la vulnérabilité ?

Au fur et à mesure on va montrer : quel est l'apport des fonctionnalités SIG et des données multi-sources à la cartographie des aléas d'instabilité, vulnérabilité associée et risque total ?

A la fin de cette thèse d'autres questions et perspectives vont être dégagées.

DEUXIEME PARTIE : NOTIONS ET CONCEPTS DE BASE

I. Préambule

La gestion des risques naturels est un axe primordial dans les politiques nationales, visant principalement la mise en place d'un cadre global d'identification, de compréhension, d'évaluation, de mesure, d'atténuation et de communication sur les enjeux existants et les aléas du territoire en question.

Chaque politique de gestion des risques s'associe aux éléments et outils nécessaires de sa mise en place, on parle d'une démarche de gestion des risques, qui se compose de :

- La définition des risques majeurs du territoire
- La définition de l'ampleur des risques et la synthèse des événements majeurs survenus ;
- La détermination des acteurs de la politique et les outils mis en place ;
- L'élaboration des études spécifiques aux risques étudiés ;
- La communication autour de leur contenu ;
- L'intégration du contenu des études dans les politiques publiques d'aménagement et d'urbanisme ;
- La mise en place du cadre réglementaire et juridique associé.

II. Lexique général

1. Combinaison aléa – vulnérabilité

Le concept de risque en sécurité civile implique que l'on soit en présence de deux éléments fondamentaux. D'une part, la possibilité que se produise en un endroit donné, un phénomène ou un événement pouvant causer une atteinte à la vie humaine ou des dommages structuraux et fonctionnels, tel qu'un glissement de terrain, une inondation, un séisme, etc. Il s'agit ici de la composante de l'aléa. D'autre part, on doit trouver dans ce milieu des éléments tels que des populations, des bâtiments ou des activités exposés à la manifestation de cet aléa et vulnérables à celui-ci. On fait référence dans ce cas à la vulnérabilité.

Ainsi, le risque résulte de l'interaction entre un aléa potentiel et la vulnérabilité du milieu exposé à son égard. Cette combinaison d'éléments met donc en évidence le fait qu'un aléa jugé comme étant probable est susceptible d'entraîner des conséquences néfastes sur le milieu touché.

Le cas concret du séisme d'Al Hoceima (Maroc), survenu le 24 Mars 2004, présente des exemples des notions citées précédemment.

Nombre de communes affectées et étendu spatial du risque : 13 communes (4 urbaines et 9 rurales)

Caractéristiques de l'aléa sismique survenu : Le séisme d'Al Hoceima est enregistré le 24 Mars 2004 à 2h27min 45s UTC à moins de 5km au SE d'Al Hoceima (distance épacentrale selon le CNRST-Rabat). Il est considéré le plus important sur le territoire marocain, depuis plusieurs décennies. D'après l'IGN de Madrid, le moment sismique est de $2,66.10^{25}$ dyne/cm pour une magnitude de $M_w=6,2$

Nombre de logements détruits: Plus de 2500 en rural et 50 en urbain

Dommages corporels/humains : 628 morts ; 929 blessés ; 15320 sans-abri.

Dommages fonctionnels (perturbation des activités socio-économiques de la zone) :

- La majorité de la population passent des nuits sous des tentes par crainte des répliques ;
- 5000 écoliers n'ont pas repris les cours après 30 jours du séisme ;
- Pertes agricoles de 1800000 dollars :

Dommages structuraux : Fissures retrouvés sur le quai du port d'Al Hoceima ;

- Fissure amont-aval retrouvée sur le couronnement du barrage hydraulique Mohamed Ben Abdelkrim Al Khatabi ;
- Tassement centimétrique du barrage.

2. Aléa

L'aléa constitue un phénomène, une manifestation physique ou une activité humaine susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement.

Les aléas peuvent avoir des origines naturelles ou anthropiques selon l'agent en cause. De plus, ils peuvent être soudains, comme un séisme ou une avalanche, ou progressifs, comme une sécheresse ou l'érosion littorale. Ils peuvent aussi prendre la forme de conditions latentes ou qui évoluent lentement, pouvant causer ultérieurement des préjudices ou des dommages dans le milieu concerné, par exemple la pollution ou la hausse du niveau de la mer. L'aléa se caractérise par des paramètres permettant une meilleure connaissance de son importance (**Figure 31**).

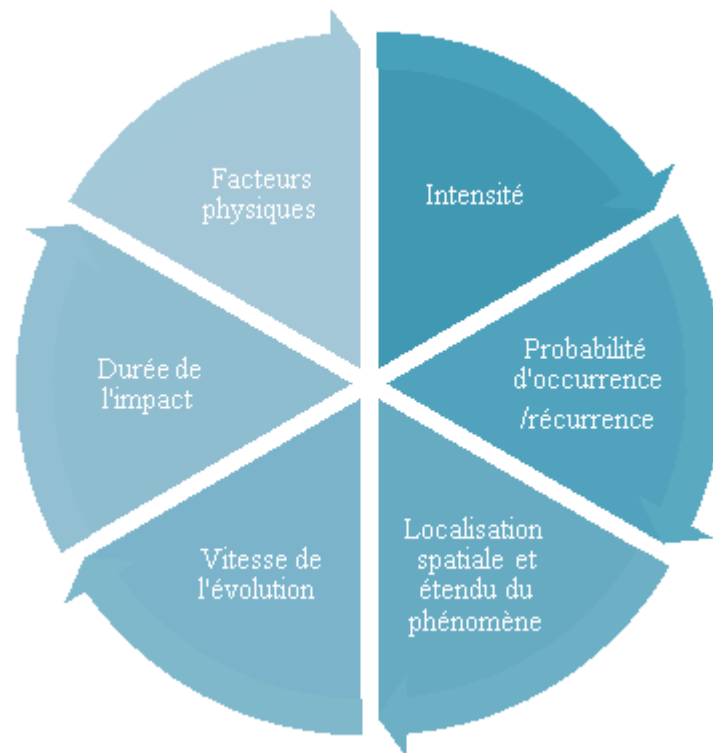


Figure 31: Paramètres de mesure de l'aléa

3. Vulnérabilité

La vulnérabilité représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages. Elle fait ainsi référence aux situations et aux caractéristiques intrinsèques d'un milieu ou d'éléments de celui-ci, qui conduisent à anticiper des conséquences néfastes pouvant résulter de la manifestation d'un ou de plusieurs aléas. La vulnérabilité met donc en évidence l'incapacité ou l'inaptitude d'un milieu et de ses composantes à résister à un aléa ou à répondre à sa manifestation.

De nombreuses études ont porté sur la caractérisation des dommages causés par les aléas naturels pour déterminer le niveau de vulnérabilité du milieu endommagé. Le **tableau 3** ci-dessous est un modèle d'enquête élaboré pour évaluer la vulnérabilité du bâti en cas de séisme, conforme à la classification de l'échelle EMS 92.

Tableau 3: Types de dommages, d'après l'échelle EMS 92

Type de dommages	Nature des dommages	Répartition	Pertes en vies humaines
Légers	Dégâts mineurs aux éléments non structuraux : <ul style="list-style-type: none"> • Fissures dans cloisons de distribution ; • Chutes de plâtres ; • Chute d'éléments légers suspendus. 	Réparation sans évacuation des occupants	Rares
Modérés	<ul style="list-style-type: none"> • Dégâts importants aux éléments non structuraux, chute de cheminées. • Dégâts possibles aux éléments non structuraux, fissurés ou plastifiés mais non détruits. 	Réparation pouvant nécessiter l'évacuation des occupants	Peu nombreuses
Graves	Dégâts très importants aux éléments non structuraux, rupture ou effondrement localisés d'éléments structuraux	Expertise pour décision de réparer ou non	Possibilité de pertes nombreuses
Effondrement	Effondrement partiel ou total du bâtiment	Réparation lourde ou non envisageable	Possibilité de pertes très nombreuses

Le niveau de vulnérabilité d'un milieu à un ou plusieurs aléas est fonction principalement du :

- Le degré d'exposition des éléments du territoire (importance de l'exposition) ;
- Le nombre des éléments vulnérables exposés (niveau de densité) ;
- La valeur ou de l'importance stratégique ;
- La sensibilité des éléments exposés ;
- La proximité du point origine de l'aléa ;
- La durée de l'exposition.

La **figure 32** illustre l'interaction entre les quatre facteurs de la vulnérabilité qui remplacent les paramètres ci-dessus.

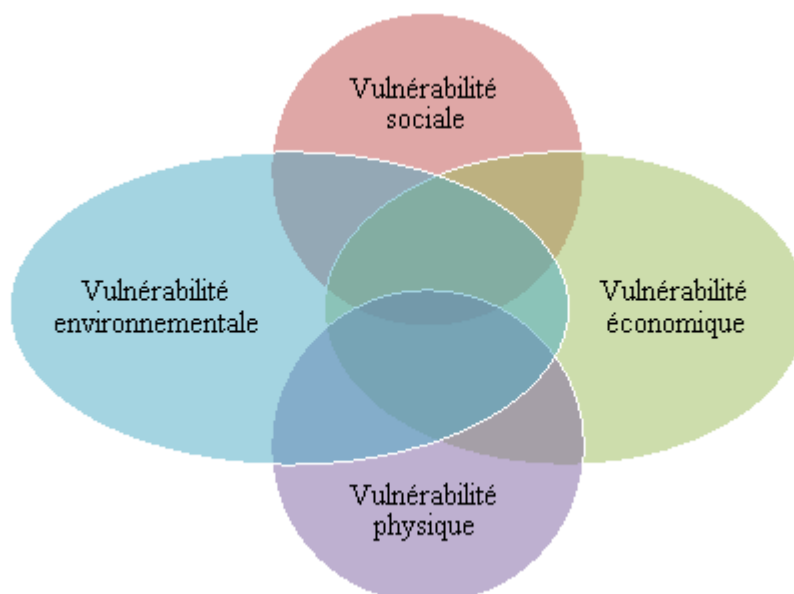


Figure 32: Interactions entre les facteurs de vulnérabilité

4. Risque

Le risque constitue le résultat de l'interaction des notions d'aléa et de vulnérabilité. Cela conduit à définir le risque comme étant la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné. Comme l'exprime la **figure 33**, le concept de risque traduit ainsi la relation entre les probabilités que l'aléa redouté survienne et les conséquences potentielles sur les personnes, les biens et autres éléments soumis à sa manifestation.

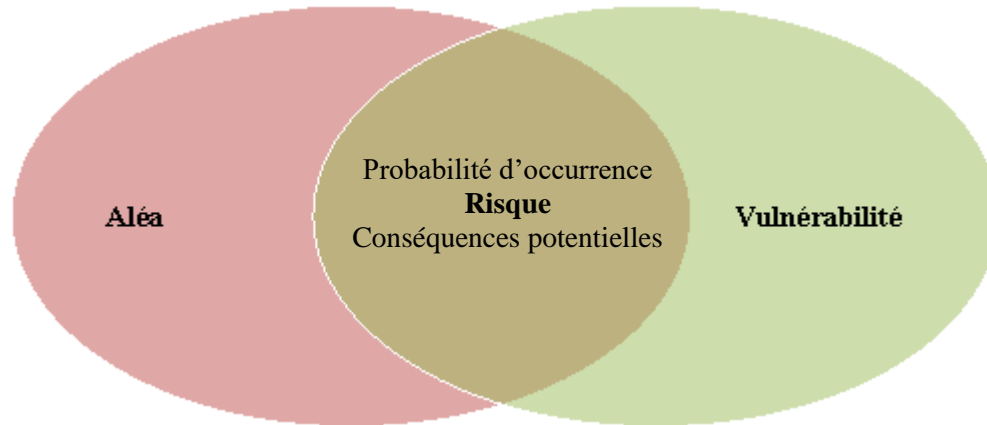


Figure 33: l'interaction entre les notions d'aléa et de vulnérabilité, conduisant à la définition du risque

La définition du risque se déroule en quatre phases indispensables, à savoir :

- Inventaire des données concernant l'aléa, les enjeux, les acteurs et la réglementation ;
- Synthèse des données recueillies, mise en place d'une structuration des données (développement d'une base de données SIG) ;
- Identification des zones d'actions prioritaires et réalisation des scénarios de risque ;
- Communication des données de risque et exploitation des prescriptions.

5. Perception des risques

La perception des risques est tributaire de différents facteurs qui conditionnent la façon dont les personnes et les groupes exposés à l'aléa le perçoivent. Elle doit permettre particulièrement d'apprécier leur sentiment d'insécurité à l'égard du ou des risques en cause. La **figure 34** rassemble la plupart des facteurs exerçant une influence directe et/ou indirecte sur la perception du risque.

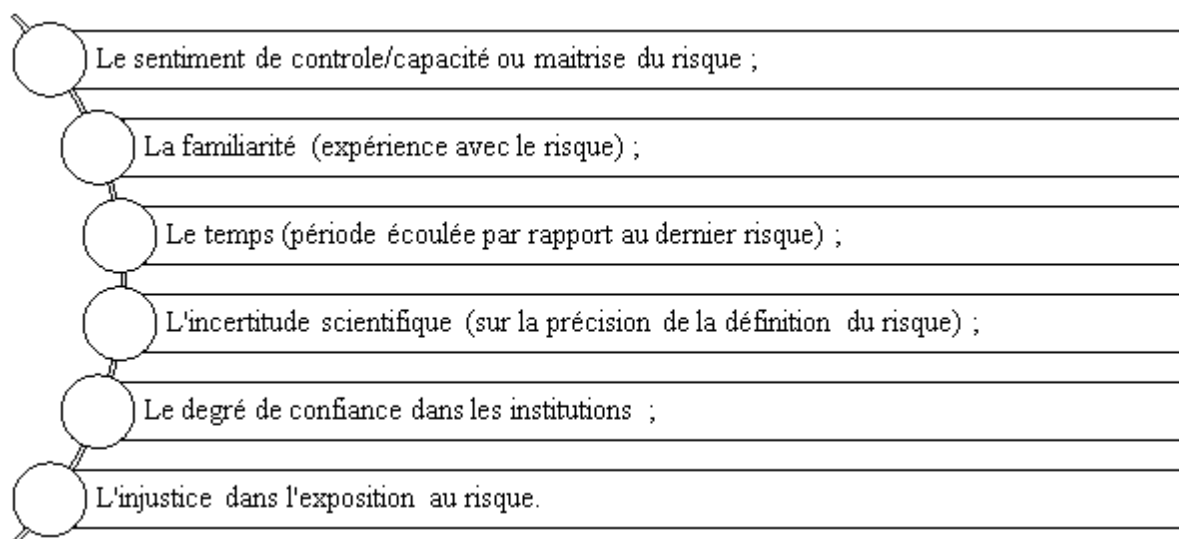


Figure 34: Les facteurs d'influence sur la perception du risque

6. Informations géographiques

L'information géographique peut être définie comme :

Les aspects qualitatifs déterminent l'essentiel des possibilités d'un système d'information, la quantité des informations se définit au travers de trois critères. L'information géographique peut se formaliser aisément dans un référentiel géographique. Une information géographique renvoie à un objet localisé sur la surface terrestre et qui comporte plusieurs attributs. On le localise à l'aide d'un système de références dans l'espace ; par la localisation relative, on peut comparer cet objet par rapport à d'autres objets pour décrire un phénomène.

Les données géographiques peuvent être classifiées en :

- Les informations dites « topographiques », comme les cartes de base, les plans cadastraux, ...etc. ;
- Les informations dites « thématiques », comme les plans de secteur, les plans d'aménagement, les cartes pédologiques, géologiques, ...etc. ;
- Les informations dites « modèle numériques », comme les modèles numériques de terrain (MNT) ;
- Les informations dites « images », comme les Orthophotos numériques, les données satellitaires fournies par « Landsat » ou « Spot » par exemple.

Dans un environnement informatique graphique, l'unité formelle de ces quatre pôles prend un format bipolaire dite la « Dualité Raster -Vecteur ».

- Le domaine vectoriel recouvre les informations « topographique », « thématique » et « modèles numériques » ;
- Le domaine Raster (image numérique) recouvre les informations « topographiques », « thématiques » et « image ». Il comprend à la fois des données à traiter qualitativement (photos, pour certaines applications) et quantitativement (images classées, cartes thématiques).

7. Données de risque

L'utilisation des systèmes d'information géographiques et la géomatiques en générale dans le domaine de la prévention des risques naturels suscitent un intérêt particulier et de nombreux aspects d'application restent encore à explorer. L'utilisation des résultats de recherches dans la prévision, et la perception des risques dans les systèmes d'information est toujours une question d'actualité. Cependant, la modélisation de ces concepts reste souvent peu appropriée, les démarches de traitement utilisées sont aussi peu adaptées aux besoins de gestion des risques et données disponibles.

En général, le développement des modèles de prévention et cartographie des risques naturels à l'échelle d'un territoire donnée (Ville, commune, province ou autres), se résume à répondre aux préoccupations suivantes :

- Connaître les aléas qui menacent un territoire donné et les modéliser en fonction des données géographiques disponibles et les échelles de production nécessaires ;
- Adapter les modèles et données de l'aléa au contexte de développement local et les besoins d'aménagement ;
- Connaître les enjeux ou les éléments exposés qui existent sur le territoire, ainsi que les caractéristiques physiques du territoire (géologie, altimétrie, occupation du sol, réseau hydrographique, etc.) ;
- Appréhender l'interaction entre les aléas et les éléments exposés, ceci revient à évaluer par exemple la vulnérabilité dans certains cas, ou à organiser les secours et à évaluer les pertes dans d'autres ;
- Produire des résultats cartographiques sur l'état des risques à l'échelle de la zone et les intégrer dans les documents et prescriptions de planification urbaine ;

La dimension spatiale étant au cœur de l'activité de gestion des risques, cette dernière fait souvent appel à l'information dite géographique. La localisation des personnes et des activités, l'extension géographique des phénomènes et de leurs manifestations, la détermination des plans d'urgence, etc. ; tous ces éléments impliquent une dimension spatiale nécessaire à leur intégration et à leur gestion dans les systèmes

d'information. La prise en compte de cette composante est donc nécessaire dans tout système traitant de la gestion des risques naturels.

La diversité des acteurs présents dans la procédure de gestion des risques ne pose pas un problème uniquement au niveau de la visualisation des résultats, mais aussi au cours des phases de leur élaboration. Un autre problème tout aussi important dans la gestion des risques est celui de la diversité des sources, principalement celles d'écrivant les données physiques du territoire et les éléments exposés. Une première tentative pour réussir l'intégration des données sur les éléments géographiques exposés est assurée par la traduction directe d'un format de fichier vecteur ou standard vers un autre. Cependant, ces traductions de formats peuvent mener à une perte d'information. Les alternatives qui évitent ce problème sont généralement très complexes, comme les standards d'échange de données « Spatial Data Transfert Standard » (SDTS) et « Spatial Archive and Interchange Format » (SAIF). Une discussion sur les formats d'échanges de l'information géographique peut être trouvée dans. Une des stratégies importantes pour l'intégration est la conversion des différents formats de données dans une structure de données commune. Une telle structure de données basée sur les standards SIG existants et proposés dernièrement par le Consortium OpenGIS.

La **figure 35** résume les différentes étapes nécessaires à la construction d'un système d'information pour la gestion et prévention des risques naturels :

- a. L'acquisition des données : les données sont de natures très variées, elles regroupent des données spatiales et non spatiales, des documents historiques, des documents multimédias, et des données en temps réel nécessaires pour la surveillance des phénomènes ;
- b. Le stockage et l'intégration de ces données dans le système : la diversité des formats et des structures de données reste un problème important qu'il faut considérer durant la phase d'intégration ;
- c. L'accès et le traitement de ces données : l'accès aux données et leur visualisation nécessitent une prise en compte des différents acteurs qui sont concernés par la procédure de gestion des risques naturels.

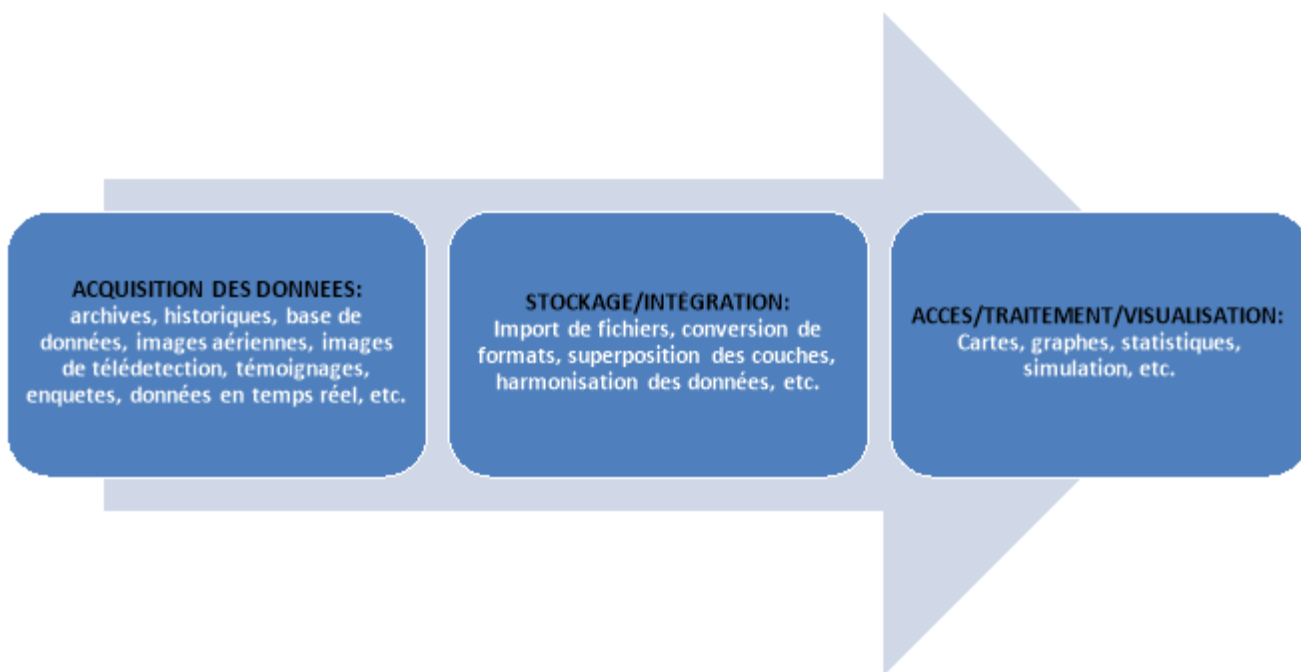


Figure 35: Etapes nécessaires à la construction d'un système d'information pour la gestion et prévention des risques naturels

8. Cartographie du risque

La cartographie des risques est une représentation graphique (sur papier et support numérique) d'un certain nombre de risques. Elle permet d'identifier, d'évaluer, d'hierarchiser et de gérer les zones à risques. La cartographie du risque s'appuie sur une cartographie préalable des composantes 'aléa' et 'vulnérabilité', une mise en place d'une base de données géographique hiérarchisée et structurée, une expertise de risque, etc.

La cartographie est conduite pour illustrer la probabilité de survenance du risque étudié en un lieu donné. Cette information de base est à l'origine de toute politique publique. Elle vise deux séries d'objectifs croisés :

- D'une part, identifier, évaluer, hiérarchiser et gérer les risques naturels à l'échelle d'un territoire ;
- D'autre part, informer les instances publiques et donner aux personnes en charge, la visibilité nécessaire pour la mise en œuvre de mesures de prévention et de détection des enjeux identifiés par la cartographie.

La cartographie des risques présente les caractéristiques suivantes :

- Elle doit être exhaustive et précise c'est-à-dire qu'elle couvre, « de bout en bout », l'ensemble du territoire concerné par la cartographie, exposé à l'aléa/aux aléas et vulnérable. La précision sur la carte reproduite est tributaire principalement de la précision sur les données d'entrée et la méthodologie suivie ;
- Elle doit être formalisée et accessible c'est-à-dire qu'elle prend la forme d'une démarche reconnue et validée, structurée et synthétique, établie sur la base d'une synthèse précise et fiable ;
- Elle doit être évolutive eu égard à la nécessité de réévaluer les risques (du moment où les hypothèses de modélisation préalable changent, les données d'entrée ont changé de valeur et caractéristiques, l'action anthropique remodèle le territoire et change sa représentation physique).

9. Modélisation d'un phénomène (du risque)

Les exemples relatifs au domaine des risques (naturels) intègrent généralement l'intégralité de la phase de modélisation physique du phénomène dans le SIG. En effet, les variables critiques contribuant à la définition du phénomène peuvent être dérivées du modèle numérique du terrain (pente, aspect, altitude) et d'autres données spatiales disponibles (sol, géologie, végétation, classes d'occupation du sol etc.).

- La **figure 36** correspond au Modèle Numérique de Terrain de la ville d'Al Hoceima (connu au mètre près) modélisé sous ArcScene ;
- La **figure 37** correspond à la carte de pentes, extraite du MNT de la ville d'Al Hoceima en utilisant les outils d'analyse spatiale offertes par ArcGis ;
- La **figure 38** correspond à la carte d'occupation du sol de la ville d'Al Hoceima (au 1/2000^e) superposée sur le MNT ;

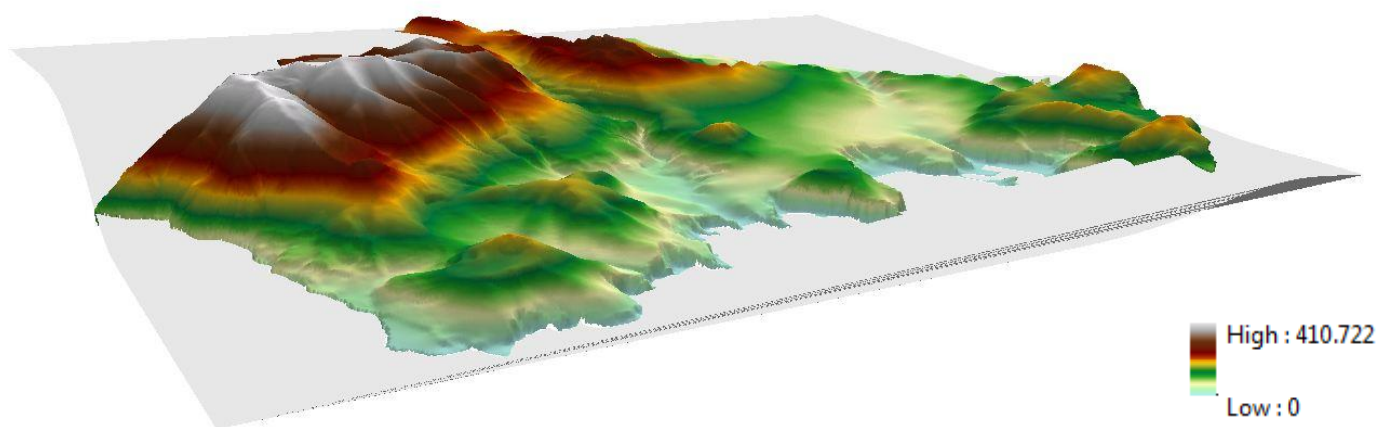


Figure 36: Modèle Numérique de Terrain de la ville d'Al Hoceima (connu au mètre près) modélisé sous ArcScene (les altitudes en mètre)

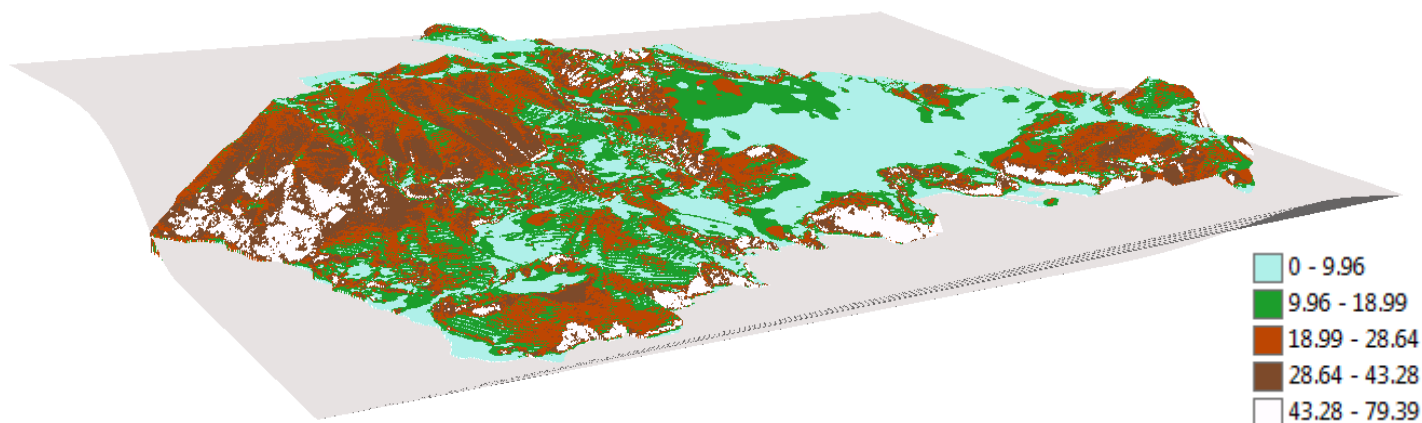


Figure 37: Carte de pentes en 3D, extraite du MNT de la ville d'Al Hoceima (les pentes en degrés)

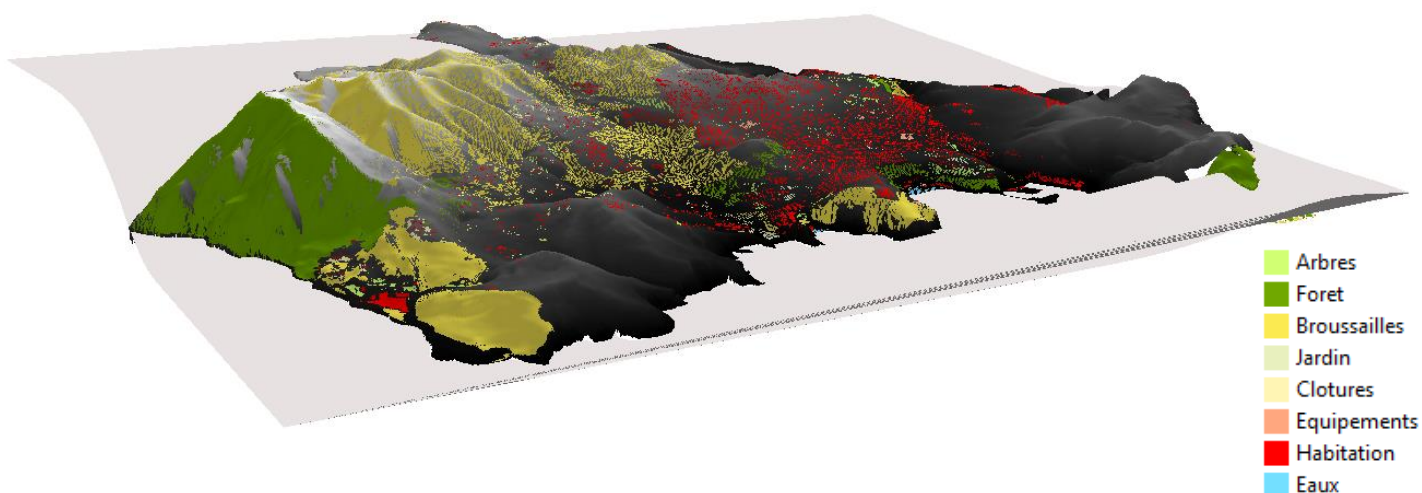


Figure 38: Carte d'occupation du sol de de la ville d'Al Hoceima (au 1/2000e) superposée sur le MNT

Dans les travaux de Carrara et al., (1991), un SIG a été utilisé pour modéliser la présomption des glissements de terrains. Les paramètres morphologiques, géologiques, et de végétations sont calculés à l'intérieur du SIG, et les relations sont analysées dans un outil statistique externe. Cette étude s'est limitée à la phase d'identification physique du risque. Cependant, elle illustre l'importance du SIG dans des applications de modélisation d'un risque qui utilisent les paramètres du terrain pour la modélisation, comme la longueur et la moyenne de la pente, la surface drainée et la pente des sous bassins versants. Ces paramètres sont dérivés des MNT et des réseaux hydrologiques (Detti et al., 1995).

Le **tableau 4** présente un ensemble de fonctions d'étude et modélisation du risque par l'usage d'un SIG.

Tableau 4: Exemples d'application des SIG dans la gestion des risques naturels à une échelle locale

Fonction	Applications potentielles	Exemples
Affichage des données	Aide à l'analyse de la distribution de l'infrastructure socio-économique par rapport aux risques naturels	Quels éléments du réseau se trouvent dans la zone à risque ?
	L'utilisation des cartes thématiques pour améliorer les rapports et/ou les présentations	Quelle est la population qui peut être affectée ?
	Le lien avec d'autres bases de données pour d'autres informations spécifiques	Où se trouve le centre de secours le plus proche ?
Le stockage et la	La maintenance et la mise à jour des	Afficher toutes les parcelles qui ont eu un

recherche des informations	données sur le territoire	problème d'inondation dans le passé
La gestion du territoire	La maintenance et la mise à jour des cartes du territoire, comme les cartes de zonages et d'inondations	Lister les noms de tous les propriétaires de parcelles à l'intérieur de la zone de 30 m à proximité d'une rivière ou d'une faille.
	Déterminer et appliquer la régulation de l'occupation du sol et les codes de constructions	Quelles sont les parcelles qui se trouvent dans une zone à fort risque sismique ?
La sélection des sites	L'identification des sites potentiels pour usage particulier	Où sont les parcelles qui ne sont touchées par aucun risque, ayant au moins x ha, se trouvant à une distance y de la route principale ?
L'évaluation de l'impact du risque	Identification géographique des impacts des catastrophes	Quelles sont les unités de la zone résidentielle qui vont être affectées par les inondations ?
La modélisation du développement	Analyse de l'adéquation de parcelles particulières au schéma du développement	En considérant la pente, le type du sol, le drainage, quelles sont les zones qui doivent avoir la priorité dans le développement ?

10. RESILIENCE TERRITORIALE

La cohabitation entre l'existence humaine et la susceptibilité aux aléas naturels, génère des risques naturels et favorise des situations de vulnérabilité plus ou moins prononcée. La définition de la résilience (**Figure 39**), nécessite préalablement la caractérisation de :

- L'ensemble des parties prenantes de la gestion des risques ;
- Les expériences vécues en rapport avec des événements majeurs et le contrôle des crises ;
- La vulnérabilité du territoire en question et son équilibre ;
- L'adaptation de la société avec la question des aléas et des menaces, etc.

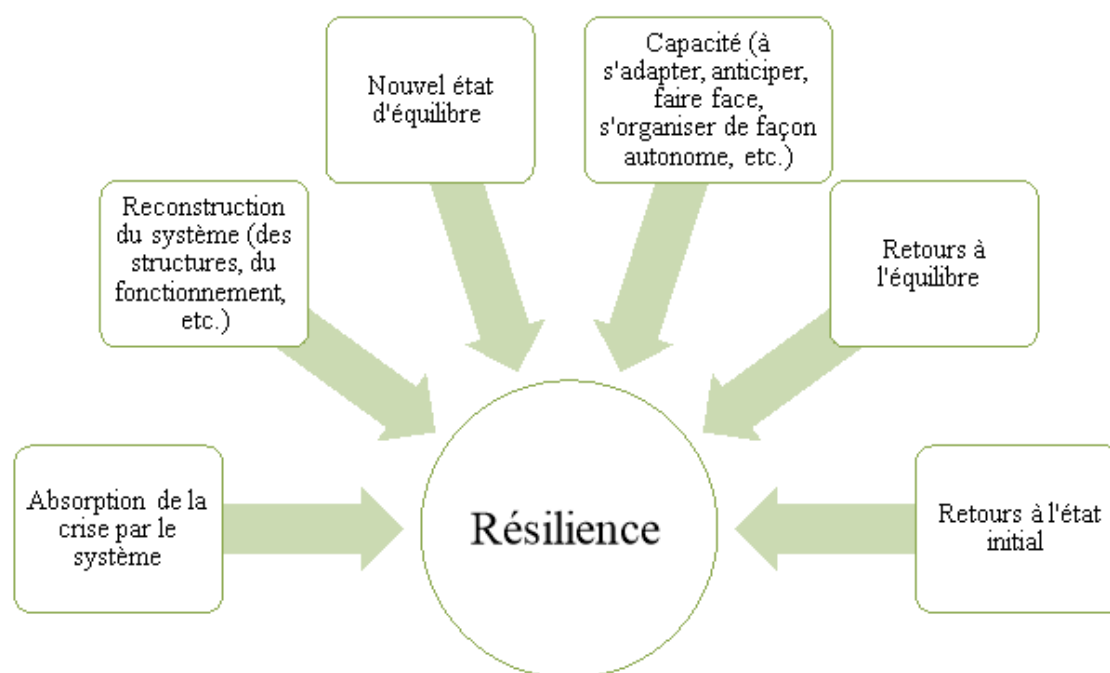


Figure 39: Quelques définitions de la résilience

Il existe une distinction entre la notion de 'vulnérabilité' et 'résilience'. L'approche par la vulnérabilité se situe a priori du risque ou dommage. Elle vise à réduire le plus possible les dommages et à rendre les communautés et individus vulnérables plus robustes, plus résistants. Il est souvent considéré que la résilience représente le positif et le souhaitable alors que la vulnérabilité représenterait le négatif. Ou bien que la résilience soit l'opposé de la vulnérabilité. Ce n'est pas aussi simple, un système vulnérable peut être résilient. Par ailleurs, une capacité de résilience individuelle peut être défavorable à une capacité de résilience plus collective (par exemple une maison en zone inondable, avec des dispositions techniques mettant ses occupants à l'abri, peut aggraver les problématiques de gestion de crise et de retour à la normale à une échelle collective).

11. URBANISME ET GESTION DES RISQUES

L'urbanisme est un champ disciplinaire qui consiste à aménager et organiser les agglomérations humaines par un ensemble de mesures prises d'ordre technique, réglementaire, procédurale, etc. (Ces mesures qui touchent aussi bien l'aménagement et l'assainissement des différents voiries et réseaux divers, création d'espaces verts, protection des sites) ou encore, l'agrandissement qui ont pour but de faciliter, tant au point de vue économique que social, les relations et les fonctions qui lient les personnes vivant dans les agglomérations urbaines.

L'urbanisme réglementaire produit des documents stratégiques (Schéma National d'Aménagement du Territoire : SNAT, Schéma Régional d'Aménagement du Territoire : SRAT, Schéma Directeur d'Aménagement Urbain : SDAU, etc.), de planification (Plans d'aménagement : PA, Plans de développement des agglomérations rurales : PDAR, etc.) et des documents opérationnels (Lotissements, etc.). L'ensemble des documents stratégiques, de planification et opérationnels doivent prendre en charge la notion du risque naturel à l'échelle du territoire concerné.

L'intégration des risques s'inscrit également dans une exigence de développement durable des territoires. Leur prise en compte dans l'aménagement nécessite une démarche construite et organisée pour répondre à la spécificité du sujet. Celle-ci suppose de dépasser les approches sectorielles pour adopter des visions élargies et transversales. Elle impose de dépasser la vision technique pour intégrer les points de vue de la société civile comme de l'ensemble des acteurs publics et privés.

Cette intégration des risques a pris une nouvelle dimension récente, en parle d'ingénierie de risque, qui correspond à un ensemble de savoirs et de méthodes qui permettent d'identifier, de connaître et de prendre en compte le risque sur un territoire donné. L'ingénierie du risque :

- S'appuie sur un ensemble de connaissances situées au croisement des territoires et des risques, qu'elle s'attache à relier et assembler ;
- Assure des traitements et analyses de ces connaissances sur la base de différents concepts aujourd'hui disponibles ou restant à développer ;
- Aboutit à des conclusions opérationnelles pour éclairer les processus de décision.

Il s'agit bien d'une nouvelle forme d'ingénierie, dont les méthodes restent à préciser, qui repose d'abord sur des expérimentations et sur des pratiques locales.

La démarche d'intégration des risques dans l'aménagement intercepte l'ensemble des dimensions du développement durable : l'environnement (connaissance des aléas...), le social (compréhension des diverses conséquences sur les habitants, sur leurs biens, leur mode de vie...), l'économie (les entreprises et leur développement ou leur création, l'agriculture...) et la gouvernance que cela implique (rôle de l'État, des collectivités, des habitants, des entreprises, etc.). Elle mobilise une large gamme de compétences :

- « Politiques » : capacité à comprendre le rôle de chacun des acteurs, avec leurs responsabilités et moyens propres, et à proposer des solutions tenant compte de tous les paramètres ;
- En urbanisme et aménagement : capacité de hiérarchiser les différentes questions d'urbanisme et d'aménagement avec précision (l'habitat, les services, les transports, les activités, l'environnement, etc.) et de mesurer les conséquences de telle ou telle décision ;

- Juridiques : connaissance des textes, des responsabilités des acteurs, des outils et de leur mise en œuvre ;
- Techniques : capacité de piloter des études et de les valider, capacité d'expertise. Elle sera primordiale pour les agents ayant en charge des missions directement en lien avec l'aléa : atlas des zones inondables, études des Plans de Prévention des Risques (PPR), la réduction de la vulnérabilité par la mise en place des Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI), etc.

La construction d'une ingénierie du risque correspond à l'émergence d'une discipline caractérisée à la fois par un champ d'application, celui de l'intégration du risque dans l'aménagement, la mise en œuvre de savoir-faire spécifiques, ainsi que le recours à la démarche de travail partagée. Cette discipline nouvelle sous-entend la mobilisation de compétences couvrant différentes disciplines traditionnelles : urbanisme, habitat, déplacements, information géographique... Elle appelle le développement de pratiques qui lui sont propres mais également le recours à un ensemble de ressources très variées. Il s'agit donc d'un domaine exigeant, qui fait appel à de vrais « généralistes » de l'aménagement (c'est à dire ceux qui ont au moins deux spécialités très différentes). Certaines compétences sont essentielles en particulier pour les agents situés à l'interface des différents acteurs, en situation de portage de multiples politiques publiques.

L'ingénierie du risque et son intégration dans les documents d'urbanisme consiste à :

Adéquation entre échelle des projets urbanistiques, échelle de cartographie des aléas naturels et échelle du document d'urbanisme ;

- Concertation autour du contenu des cartes de risque produites. C'est une attitude très sollicitée, qui consiste à demander l'avis sur un projet, par la consultation de personnes intéressées par une décision avant que celle-ci ne soit prise. L'autorité, qui veut prendre une décision, la présente aux personnes concernées et engage un dialogue avec eux.
- Enquête publique : procédure consultative qui a pour but d'informer le public sur une opération d'aménagement ou un plan d'urbanisme par un dossier (document cartographique et règlement) qui lui est présenté et de recueillir ses observations ;

« Gouvernance », préoccupation majeure dans le discours politique, en particulier dans les politiques de développement. Le concept de gouvernance s'est imposé pour désigner l'ensemble de conditions auxquelles les plans d'actions sont réalisés, intégrant à la fois la légitimité du fonctionnement politique, les rapports avec l'administration et les relations entre l'institution et le reste de la société. La gouvernance est un mode d'élaboration et de mise en œuvre de l'action publique qui se fonde sur la prise en compte de la pluralité des acteurs et le processus collectif de négociation et de légitimation.

III. Mesure de la vulnérabilité

1. Mesure au sens traditionnel : approche qualitative

La vulnérabilité est d'autant plus grande dans des zones peuplées, segmentées et en dysfonctionnement. En effet quatre facteurs de convergence, externes et internes contribuent à des situations de vulnérabilité accentuées.

Deux facteurs sont extérieurs au milieu urbain et périurbain. Premier facteur est la croissance démographique urbaine, deuxième facteur extérieur résulte du déséquilibre entre le développement socio-économique et les choix politiques dans l'aménagement du territoire.

Les deux autres facteurs de vulnérabilité sont intrinsèques. Il y a d'abord l'effet destructeur des phénomènes naturels qui sont aggravés par les propriétés physiques des structures et matériaux ainsi que la morphologie de l'espace urbain et périurbain. La morphologie accentue l'effet induit des phénomènes, puisque le site menacé est débordé par la consommation de l'espace vers des sites exposés aux risques naturels. Le second facteur extrinsèque est la segmentation accentuée des sociétés urbaines, qui reflète le mal-développement et les conflits dans un espace limité.

La prise en charge des facteurs de vulnérabilité donne le moyen de prévoir l'amplitude des préjudices potentiels, car elle fournit une mesure quantitative de l'exposition des éléments à l'échelle du site et une mesure qualitative de la capacité de réponse d'un individu ou d'un groupe exposé au risque. En effet, la qualité de la réponse d'un individu ou d'un groupe sinistré modifie la vulnérabilité (**Figure 40**). L'exemple d'un séisme violent qui dépasse la capacité de réponse de la population se traduit par une situation de crise et des dommages matériels et humaines importantes.

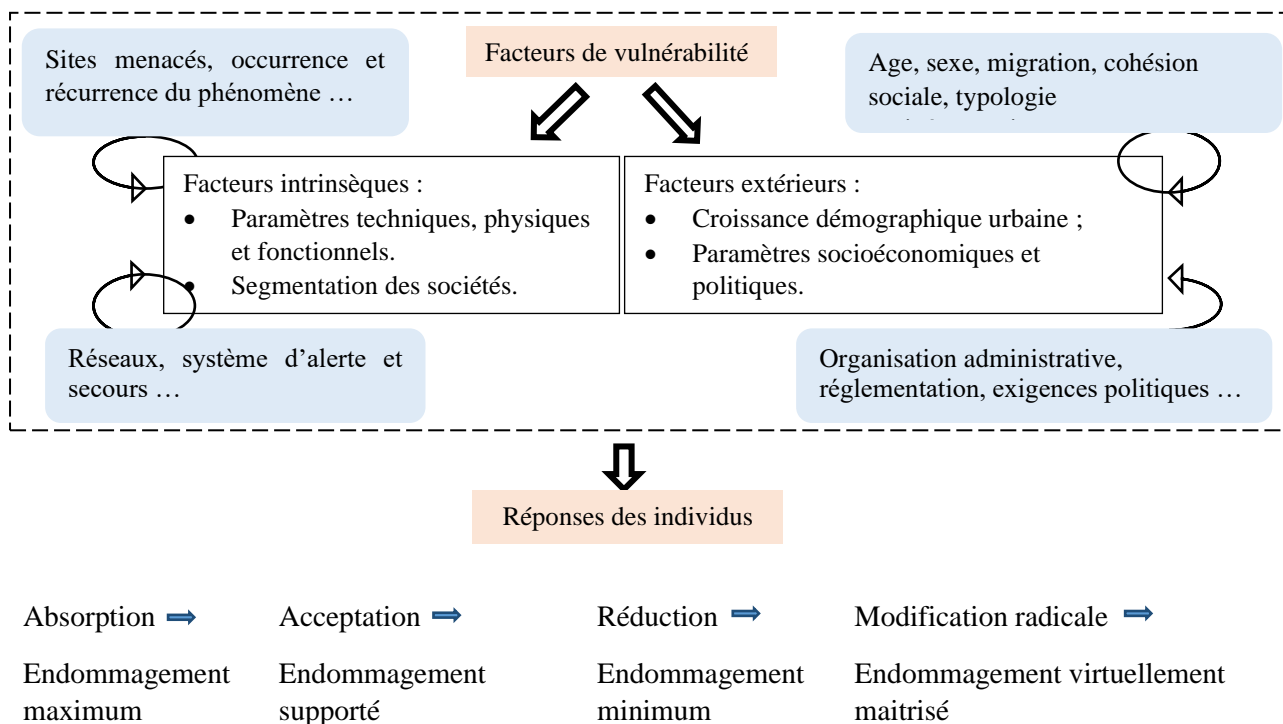


Figure 40: Facteurs de perception de la vulnérabilité et rapport avec la qualité de la réponse des individus au moment de crise

La considération démographique est surtout vraie pour les pays en développement où l'on assiste de plus en plus à une implantation, souvent anarchique, précaire, concentrée et pas toujours contrôlée, des populations dans des zones exposées et dangereuses ;

Le facteur psychosociologique concerne les populations exposées aux phénomènes naturels et conditionnent leur comportement, notamment en situation de crise. La manière dont le risque est perçu est un des facteurs qui influence le plus la décision d'intervenir en cas de crise. Il est important donc de comprendre comment les personnes exposées perçoivent et vivent le risque ;

Les facteurs techniques et fonctionnels viennent pour compromettre la sécurité des personnes en cas de crise. Cela va de certaines déficiences techniques affectant les infrastructures de protection (vice de construction, sous dimensionnement des ouvrages), aux problèmes d'efficacité des systèmes de prévision, de surveillance, d'alerte, d'organisation des secours, d'évacuation, etc. Cela englobe aussi des aspects propres à la prévention du risque, tels que les difficultés de communication entre les acteurs impliqués (scientifiques, décideurs, politiciens, autorités locales, société civile et population), les problèmes d'information des populations exposées, de fiabilité des données, méthodes et outils utilisés, de niveau de compétence et de formation des personnels techniques ou scientifiques, etc. ;

Les facteurs institutionnels et politico-administratifs résumés aux divers blocages institutionnels rendant inopérantes les actions de réduction des risques ou des pressions diverses exercées sur les populations exposées ou bien sur les autorités compétentes. C'est un constat généralisé aux pays en développement où la gestion des risques naturels en général n'est pas encore une priorité. Le Maroc affirme une volonté politique de mise en place de nouvelles stratégies de réduction des risques naturels et de pallier les carences institutionnelles existantes en lançant des stratégies et des programmes, c'est le cas du Fonds de Lutte contre

les Effets des Catastrophes Naturelles (FLECN), Le Fonds des Calamités Naturelles (FCN), le Fond Spécial pour la Promotion et le Soutien de la Protection Civile (FSPSPC), etc. ;

Pour un souci de clarification des notions théoriques de mesure de la vulnérabilité, le **tableau 5** présenté ci-dessous développent de façon exhaustive les mécanismes qui régissent le concept de vulnérabilité à l'échelle d'un territoire.

Tableau 5: Facteurs permettant la perception et l'évaluation de la vulnérabilité d'une zone menacée

Facteurs de perception	Sociodémographiques	Socioculturels	Fonctionnels & techniques	Institutionnel & politico-administratifs
A/Éléments de diagnostic	Paramètres démographiques (âge, sexe ...)	Expériences passées	Organisation des réseaux	Organisation administrative et réglementaire
	Densité	Capacités cognitives	Intervention des secours	Juridique et législative
	Cohésion sociale	Capacités éducatives	Système d'alerte	Exigences politiques
	Modèle socioéconomique	Perception du risque	Infrastructure et points de blocage	Exigences techniques
B/Facteurs de risque	<ul style="list-style-type: none"> Sites menacés, occurrence et récurrence du risque : en fonction des conditions physiques du milieu ; Dysfonctionnements institutionnels et techniques. 			
C/Réponse des individus	<ul style="list-style-type: none"> Niveau 1/Absorption du risque : Très faible (Endommagement maximum) ; Niveau 2/Acceptation du risque : Faible (Endommagement supporté) ; Niveau 3/Réduction du risque : Moyenne (Endommagement minimum) ; Niveau 4/modification radicale du risque : Forte (Endommagement maîtrisé). 			
D/Couts du sinistre	Cout direct évalué (Habitat, infrastructure, activité économique)		Cout indirect évalué (réadaptation et reconstruction à long terme : Patrimoine matériel et immatériel)	

La perception de la vulnérabilité repose sur les 4 parties A, B, C et D :

- Partie A : Les paramètres qualitatifs et semi-quantitatifs : sociodémographiques, socioculturels, fonctionnels & techniques et institutionnel & politico-administratifs ;
- Partie B : Les facteurs géographiques et conjecturels (contraintes de localisation, récurrence du sinistre, ...) ;
- Partie C : Le comportement des individus face au sinistre qui conditionne le degré des répercussions (absorption, acceptation, réduction, modification radicale) ;
- Partie D : Le cout direct et indirect des éléments exposés au sinistre (Lié aux répercussions spatio-temporelles, socio-économiques et culturelles).

2. Mesure de la vulnérabilité au sens technique : approche quantitative et semi- quantitative

L'approche traditionnelle d'évaluation de la vulnérabilité, telle qu'elle vient d'être illustrée précédemment, reposent sur des protocoles d'analyse mal définis, très variables d'un auteur à l'autre et par conséquent difficilement généralisables ou transposables. Ce constat est dû à un manque de structuration du concept lui-même et de ses composantes. C'est pourquoi, compte tenu du fait que le but recherché à travers l'approche est de réduire la vulnérabilité, il est nécessaire de mesurer celle-ci en lui donnant un sens beaucoup plus technique que ce qui a pu être fait jusqu'à présent et d'élaborer une théorie de la vulnérabilité qui permette de dégager des méthodes d'analyse reproductibles à n'importe quelle modèle et site d'étude.

L'approche de vulnérabilité au sens technique s'articule autour de la notion d'élément exposé ou vulnérable, à partir duquel il s'agit de mesurer les conséquences potentielles en cas de manifestation d'un phénomène

dommageable. Elle définit donc une démarche semi-quantitative, voire quantitative et s'inscrit dans le cadre général de la théorie de la décision (**Figure 41**). En effet, l'objectif de l'approche quantitative est de contribuer à la prise de décision par les responsables et formuler les stratégies de prévention, suivant des techniques d'évaluation qui visent à mettre en balance les répercussions de catastrophes potentielles et les coûts entraînés par la réalisation de mesures d'atténuation.

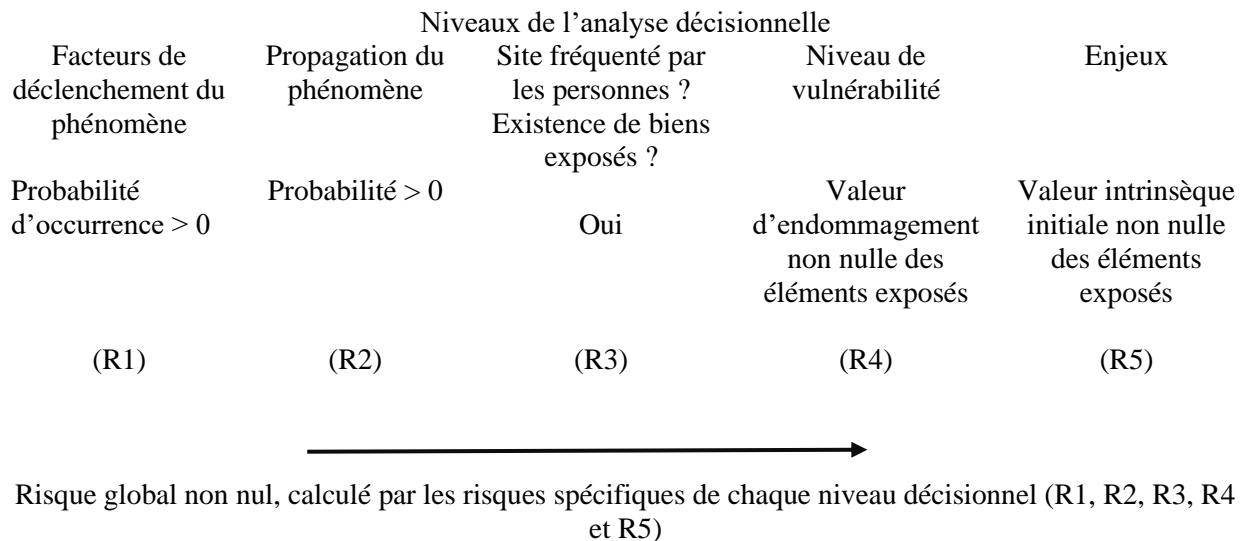


Figure 41: Niveaux décisionnels de la théorie de décision

La définition de la vulnérabilité par l'approche technique repose principalement sur le concept du taux d'endommagement, calculé pour un élément exposé de la zone d'étude, soumise à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti. La valeur de l'endommagement est comprise entre 0 et 1, un dommage nul donnant la valeur 0 et un dommage maximal la valeur 1. D'un point de vue théorique, il pourra être calculé en référence à la valeur initiale de l'élément exposé, avant endommagement. Cette définition permet de replacer la vulnérabilité dans un contexte d'évaluation théorique préalable et mathématique.

De façon générale et simpliste, le niveau d'endommagement (appelé D) d'un élément exposé donné (appelé E) est fonction de la nature, d'une part du phénomène naturel (appelé Φ) et d'autre part de cet élément exposé E. Soit :

$$D = fct (\Phi , E) \quad (1)$$

L'application de cette fonction exige la distinction entre trois familles d'éléments exposés : les biens physiques, les vies humaines et les activités/fonctions diverses :

- Les biens physiques : ensemble des dommages structurels ou matériels (**Figure 42**) ;
- Les vies humaines : ensemble des dommages corporels ou préjudices corporels ;
- Les activités et les fonctions diverses : ensemble des dommages liés à la perturbation fonctionnelle et les dysfonctionnements.

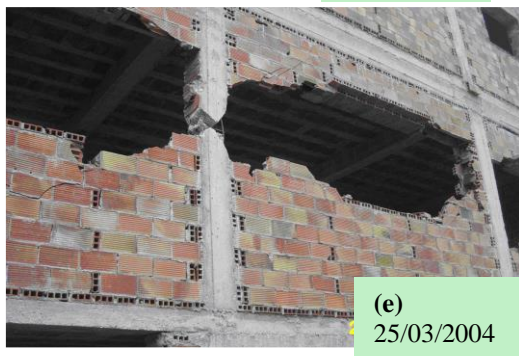
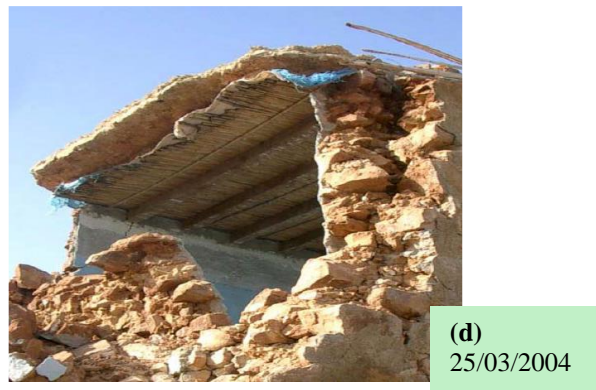


Figure 42: Données historiques de la vulnérabilité des structures après le séisme d'Al Hoceima du 24/02/2004 (a) : Dommages dans les coins des bâtiments dus aux forces horizontales, (b) : Dommages au niveau du RDC dus à une répartition non uniforme des efforts sur la hauteur du bâtiment (cisaillement des poteaux), (c) ; (e) : Poteaux courts, (f) ; (d) : dommages dus à la flexibilité du plancher et à la géométrie de la structure). Source : Séisme d'Al Hoceima (Maroc) du 24 février 2004 - Rapport de la mission AFPS

Le niveau d'endommagement global résultant de l'action d'un phénomène naturel peut être conceptualisé par la **figure 43**.

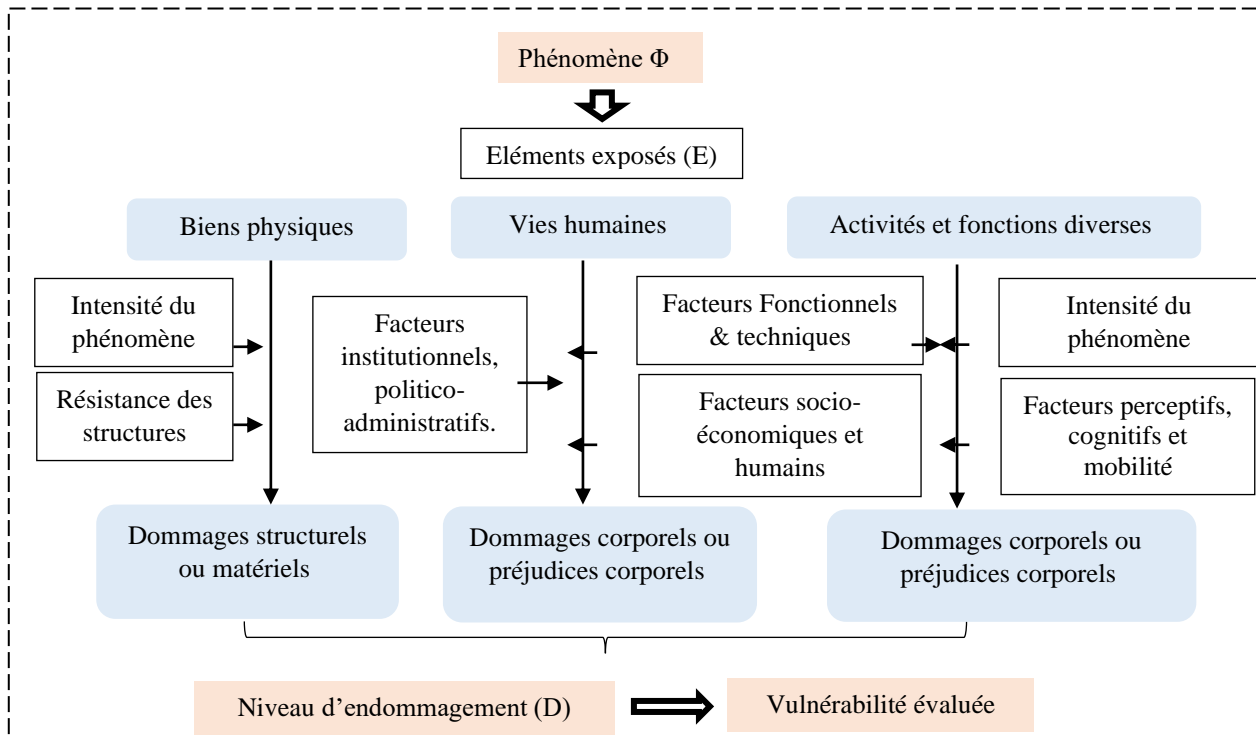


Figure 43: Schéma conceptuel des différentes composantes et facteurs de la vulnérabilité au sens technique

IV. Généralités sur le risque mouvement de terrain

1. Présentation du risque mouvements de terrain

Sous la dénomination commune de "mouvements de terrain", (équivalents anglo-saxons "ground failures" et "mass movements"), on regroupe des phénomènes extrêmement divers et complexes qui impliquent une rupture et un déplacement simultané de matériaux (FLAGEOLLET J.C. ,1989). Ils correspondent à des mécanismes très variés, affectant des terrains aux propriétés mécaniques différentes, mettant en jeu des volumes allant de quelques m³ à plusieurs millions de m³ et créant des dommages de niveau très inégal (ASTE J.P., 1991).

Les mouvements de terrain sont des phénomènes fréquents, pouvant être à l'origine d'une évolution discrète ou au contraire provoquer des déplacements en masse ou particuliers. Contrairement à l'opinion reçue, ils s'avèrent souvent meurtriers et le bilan socio-économique de leurs répercussions les placent dans la catégorie des phénomènes naturels les plus redoutés. Ils sont de dimension parfois catastrophique et peuvent générer des phénomènes induits tout aussi dévastateurs.

Leur nature même, leur disparité, leur dispersion et leur caractère très aléatoire les rend difficiles à prévoir. Il est donc tout aussi délicat de tenter d'en évaluer les effets potentiels et d'aider ainsi à la perception du risque inhérent aussi bien auprès des populations exposées qu'auprès des personnes susceptibles de prendre des décisions en matière de gestion de ce risque.

Compte tenu de la diversité des phénomènes de mouvements de terrain, de nombreuses classifications existent à ce jour. Elles ont longtemps été fondées sur des critères morphologiques simples, selon une approche naturaliste, mais s'appliquaient le plus souvent à une région et à un type de milieu donnés (HOWE E., 1909). Plus récemment, ces classifications se sont étendues, en essayant de considérer un plus grand nombre de phénomènes et ce indépendamment du contexte régional. Elles reposent pour l'essentiel sur des critères, soit morphologiques et géométriques (CARSON M.A. et al., 1972 ; FLAGEOLLET J.C., 1989 ; VARNES D.J., 1978), soit géotechniques (HUTCHINSON J.N., 1973 ; SASSA K. 1985), soit cinématiques ou dynamiques (MILLIES-LACROIX A., 1931 ; SYRIEYS P., 1984), soit d'une combinaison de plusieurs d'entre eux (ANTOINE P. et al., 1994).

Dans un souci d'exhaustivité et de simplicité, la classification exposée ci-dessous repose sur une distinction principale d'ordre dynamique, tout en conservant quelques-uns des critères précédents. Elle permet de regrouper l'ensemble de ces phénomènes en deux groupes principaux : les mouvements lents et continus et ceux rapides et discontinus.

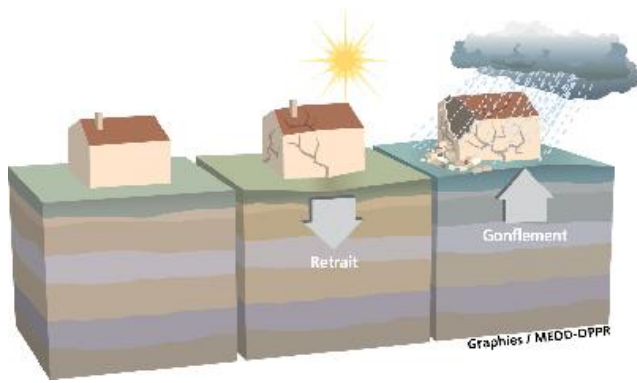
2. Revue de la typologie des mouvements de terrain

2.1. Mouvements lents et continus

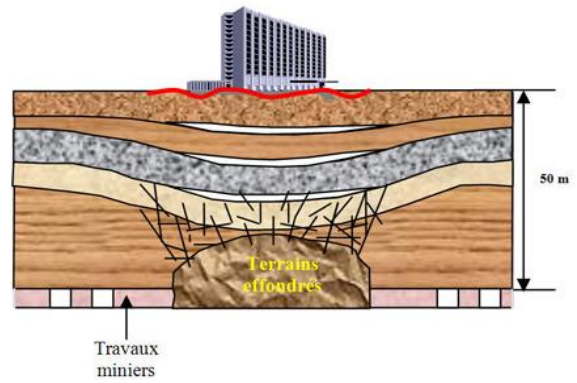
Des mouvements entraînant des déformations progressives. Ils correspondent aux phénomènes suivants, synthétisés au **tableau 6** ci-dessous.

Tableau 6: Typologies des mouvements de terrain lents et continus avec leurs caractéristiques

Phénomène	Description
Gonflement - retrait	<ul style="list-style-type: none"> • Changement d'humidité des sols argileux et sévissant surtout en périodes de sécheresse – sous l'effet du processus de capillarité et de succion ; • Changement du volume des sols pouvant entraîner une pression de gonflement génératrice de dommages (Figure 44-a).
Affaissement	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution lente et progressive de cavités souterraine dont l'effondrement du toit est amorti par le comportement souple des terrains superficiels – sous l'effet de la dissolution de roches solubles, carrières souterraines, galeries minières, etc. ; • Dépression topographique sans rupture apparente, parfois en cuvette (Figure 44-b).
Tassement	<ul style="list-style-type: none"> • Diminution de volume de certains sols compressibles (vases, tourbes, marnes et argiles peu consistantes- Sous l'effet des charges qui leur sont appliquées ou également pompage de fluides souterrains ou à des soutirages de matériaux fins ; • Diminution de la porosité et le cas échéant d'une expulsion d'eau. Il peut aussi s'accompagner, pour des terrains à très fort indice de plasticité, d'un fluage (Figure 44-c).
Reptation	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement cyclique vers l'aval des particules et granules constituant le sol meuble de couverture, sous l'effet conjugué de la gravité et du gonflement du sol par l'action gel-dégel, ou dans une moindre mesure, des variations de saturation en eau ; • L'ordre de grandeur du déplacement est généralement très faible (1 mm à 10 mm) (Figure 44-d).
Solifluxion	<ul style="list-style-type: none"> • Mécanisme s'apparente à une coulée très lente, le sol franchissant provisoirement sa limite de liquidité. Le sol ne comporte pas de surface de glissement au sens strict toutefois comporte une surface de rupture contrairement à la reptation ; • La vitesse est faible (quelques cm/an) mais peut être plus importante dans certains contextes de sol et de climat. Le processus aboutit à la destruction rapide du sol ou entrave sa formation (Figure 44-e).
Fluage	<ul style="list-style-type: none"> • Déformation qui intervient lorsqu'une charge est maintenue pratiquement constante durant un temps prolongé, sans atteindre les limites de résistance mécanique (sans rupture) ; • Elle est localisée sur un ou plusieurs niveaux et associée à certains types d'instabilités (reptation, solifluxion, glissements superficiels et surtout au poinçonnement).
Glissements rotationnels	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement bidimensionnel du glissement sur laquelle la surface de rupture théorique est une portion de sphère ; • Phénomène affecte principalement les formations meubles à forte cohésion, non stratifiée et peu litées à base d'argiles et de limons
Glissements plans ou translationnels	<ul style="list-style-type: none"> • Glissements qui se produisent à la faveur d'une surface de discontinuité, de faiblesse, de rupture préexistante ; • La surface de contact entre la couverture meuble et le bedrock lorsque celle-ci est régulière (surface de la couche, plan de schistosité, etc.) ; un niveau schisteux ou argilo-marneux ou un joint stratigraphique du massif rocheux orienté selon la pente du versant (glissement couche sur couche) ; une discontinuité tectonique ; une faille ou un système de fractures prédominant (Figure 44-f).



a



b



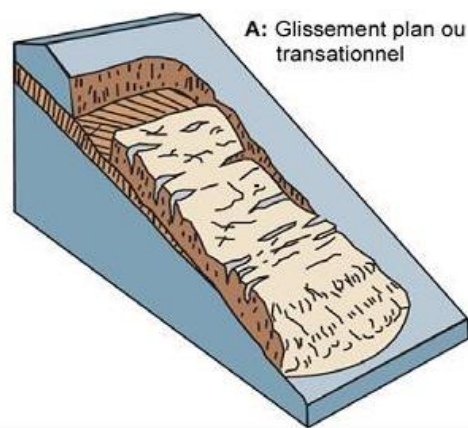
c



d



e



f

Figure 44: Typologies des mouvements de terrain (a : Phénomène de gonflement – retrait, b : Phénomène d’affaissement du sol, c : Phénomène de tassement du sol, d : Phénomène de reptation, e : Phénomène de solifluxion, f : Phénomène de glissements plans ou translationnels). Source ORRM - Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence-Alpes-Côte d’Azur. Observatoire Régional des Risques Majeurs de Provence - Alpes - Côte d’Azur (observatoire-regional-risques-paca.fr)

2.2. Mouvements rapides et discontinus

Il s'agit de mouvements dont la genèse résulte d'une rupture brutale suivie d'un déplacement très rapide des matériaux mobilisés. On peut les scinder en deux groupes, selon que le mode de propagation des matériaux s'effectue en phase solide ou sous forme plus ou moins fluide. Ils correspondent aux phénomènes suivants, synthétisées au **tableau 7** ci-dessous.

Tableau 7: Typologies des mouvements de terrain rapides et discontinus avec leurs caractéristiques

Phénomène	Description
Effondrement	<ul style="list-style-type: none"> • Déplacement vertical instantané de la surface du sol qui résulte de la rupture brutale de cavités souterraines préexistantes, naturelles ou artificielles (mines, carrières). Il peut correspondre au stade définitif d'évolution de certains phénomènes d'affaissement (Figure 45-a).
Chutes de pierres, de blocs, d'éroulements et éboulements rocheux	<ul style="list-style-type: none"> • Chute de pierres ou de blocs par l'évolution d'escarpements plus ou moins abrupts, sous l'action de la gravité. On utilise généralement le terme de chute pour des pierres (volumes inférieurs à 1 dm³) ou des blocs (volumes supérieurs à 1 dm³) qui tombent isolément ou en groupe, et on lui substitue celui à éroulement quand il s'agit de la chute soudaine d'une masse rocheuse qui se détachant d'une paroi ou d'un versant très raide, tombe en se désorganisant ; • Le terme d'éroulement peut être réservé à l'accumulation chaotique elle-même, appelée aussi parfois "éboulement", pour la distinguer des éboulis plus organisés, à pente régulière, constitués de fragments détachés principalement par les effets du gel et du dégel, qui tombent sporadiquement et individuellement, suivant les saisons (FLAGEOLLET J.C., 1989) ; • Lorsque les volumes mis en jeu deviennent considérables, on rattache généralement ces phénomènes à la catégorie suivante (Figure 45-b).
Eboulements d'extension catastrophique	<ul style="list-style-type: none"> • Appellation relativement récente (COURXL M.F. et al., 1980), qui regroupe des phénomènes complexes, d'ampleur exceptionnelle et qui se caractérisent par la succession de plusieurs modes de déplacement. Ils peuvent comporter des analogies morphologiques avec des phénomènes de glissement ou d'effondrement rocheux, mais ils en diffèrent par les volumes mobilisés (supérieurs à la dizaine de millions de m³) ; par l'énergie mise en jeu, par des vitesses de propagation très élevées (de plusieurs centaines de km/h).
Coulées de débris	<ul style="list-style-type: none"> • Cette appellation regroupe tous les phénomènes d'instabilité de pente avec rupture brusque plus ou moins instantanée, avec ou sans surface de glissement. La rupture peut se produire dans les matériaux déjà instables (en glissement latent), ou dans des matériaux initialement en place, qu'il s'agisse de la couverture meuble ou du massif rocheux ; • Phénomènes plus ou moins rapides et destructeurs avec déplacement important des matériaux accompagné d'un remaniement plus ou moins total de ceux-ci. Elles se produisent sur des versants à pente assez forte à forte. Le déplacement des matériaux est égal à plusieurs fois, voire plusieurs dizaines de fois la dimension de la surface de rupture. Les vitesses sont généralement comprises entre 0,5 et 15 m/s ; • Phénomènes qui se produisent à partir de formations rocheuses bien lithifiées, en place ou préalablement disloquées sont les "débris solides" (sans eau ou avec fraction liquide non-significative) et les coulées de débris proprement dites.
Coulées boueuses	<ul style="list-style-type: none"> • Mouvement de matériaux sans cohésion – ou l'ayant perdue dès la mise en mouvement - qui sont mélangés à une quantité d'eau (avant ou après la mise en mouvement) ; • Les matériaux constitutifs d'une coulée boueuse peuvent être indifféremment tous ceux susceptibles de perdre leur cohésion. Il peut s'agir d'argiles, d'argiles limoneuses, de limons, de la couche superficielle terreuse, de colluvions fines, d'éluvions fins, de moraines diverses, mais aussi de roches argilo-limoneuses ou schisteuses décomposées.



(a)



(b)

Figure 45: Typologies des mouvements de terrain rapides et discontinus

(a) : Phénomène d'effondrement à Guatemala en 2013. Le phénomène karstique [GÉOLOGIE]. *Le phénomène karstique [GÉOLOGIE] - MA PLUME - WEBMAG (ma-plume-webmag.com)*

(b) : Phénomène de chutes de pierres, de blocs, d'écroulements et éboulements rocheux). Sébastien GOMINET. Le 15/02/2007. Institut des risques majeurs. Chutes de pierres et de blocs sur la RD 48, Département ISERE en France. *ALBENC (L') : chute de pierres et de blocs - Catastrophes naturelles - Chutes de pierres et de blocs sur la RD 48 (irma-grenoble.com)*

TROISIEME PARTIE : PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE DES INSTABILITES DE TERRAIN

I. Introduction

La répartition spatiale et temporelle des mouvements de terrain est assez diffuse par rapport aux autres risques naturels. Elle se caractérise par :

- L'aspect spatial : régions montagneuses certes, mais aussi des régions à relief plus modéré où une formation géologique défavorable est présente, région à érosion côtières, etc. Le risque se manifeste un peu partout sous des formes très diverses. La sensibilité et l'acceptabilité du risque par les populations, très variables, ne facilite pas la mise en œuvre des politiques de prévention ou de réparation par les communes et les pouvoirs publics.
- L'aspect temporel : période de fortes pluies certes, mais également contrecoup de séismes, conséquences d'interventions humaines, etc.

Le phénomène est toujours unique (et non répétitif comme peut l'être une inondation) : un mouvement qui vient se produire plus jamais, sous la même forme, le suivant sur le même site aura des caractéristiques obligatoirement différentes.

Par leur disparité, leur dispersion et leur caractère très aléatoire, les mouvements de terrain sont difficiles à prévoir. Il est donc tout aussi délicat de tenter d'en évaluer les effets potentiels et d'aider ainsi à la perception du risque inhérent, aussi bien auprès des populations exposées qu'auprès des personnes susceptibles de prendre des décisions en matière de gestion du risque.

Les signes précurseurs sont difficiles à utiliser pour la prévision et la gestion de crise. Contrairement à ce qui se passe pour d'autres phénomènes générateurs de dommages. Le coût engendré par l'aléa mouvement de terrain est important et génère des situations complexes sur le plan humain, économique, techniques, etc.

L'évaluation des instabilités de terrain revient à répondre à des questions précises : ou, quand, comment et pourquoi le phénomène se produira ? Ainsi, cela revient à évaluer la probabilité d'occurrence spatiale d'un type de phénomène pour des conditions locales (topographiques, géomorphologiques, géologiques, hydrologiques, climatiques, etc.), à une échelle temporelle (période de retours) et par une intensité donnée.

Cette évaluation, se fait par un exercice de quantification ou qualification, souvent difficile. En effet, les résultats de l'évaluation sont étroitement dépendants de la qualité/échelle des données, l'exploitation d'une base de données de l'historique des aléas, le coût de production de l'information géographique (topographique, géologique, lithologique, sismique, hydrographique, etc.) et le bon choix de la méthode d'expertise.

II. Eléments de l'étude et l'évaluation des Glissements de terrain

Les méthodes de calcul des instabilités s'intéressent à la détermination d'un coefficient de sécurité sont nombreuses et se différencient par la difficulté de calcul (d'application) et les hypothèses admises préalablement. Par application des hypothèses nous pouvons citer : le calcul en équilibre limite, le calcul à la rupture, le calcul en déformation, etc. et par application du critère de difficulté d'application, nous pouvons citer : le calcul par abaques et le calcul par logiciel. En fonction de la valeur du coefficient de sécurité calculé nous déduisons l'état de la pente et son comportement de stabilité.

Les calculs de stabilité se font à l'état statique et/ou dynamique, ainsi dans le cas dynamique (en cas sollicitation) des coefficients de sécurité partiels sont calculés : affectant, d'une part, les sollicitations appliquées et, d'autre part, les propriétés mécaniques du sol.

L'avantage d'une étude géotechnique préalable à la réalisation des projets et infrastructures, réside dans les conclusions ponctuelles et précises, dégagées par l'expert en géotechnique au moment de son investigation. Les techniques utilisées se différencient également par l'appareillage employé, le mode opératoire, le coût et la durabilité. L'instabilité d'un versant naturel ou artificiel se manifeste par une rupture et suivant la forme de

la surface de rupture observée ou supposée : (plan, droite, calotte sphérique, arc de cercle, arc de spirale logarithmique, etc.) (**Figure 46** : rupture suivant un plan et un arc de cercle).

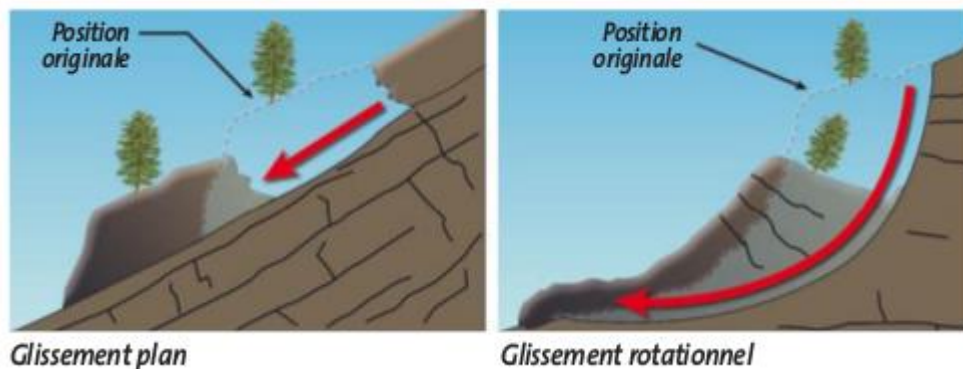


Figure 46: rupture d'un versant naturel instable suivant un plan (Glissement plan) et suivant un arc de cercle (Glissement rotationnel). Source ORRM - Observatoire Régional des Risques Majeurs en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Observatoire Régional des Risques Majeurs de Provence - Alpes - Côte d'Azur (observatoire-regional-risques-paca.fr)

Pratiquement, on considère deux modes de rupture (modes de calcul) : les calculs se font en considérant un mode de rupture plane pour les glissements plans ou cylindrique pour les glissements rotationnels.

Les glissements plans se produisent par cisaillement et par translation sur un plan incliné plus ou moins régulier, où la masse de sol en mouvement se comporte comme un monolithe dont les déformations sont très petites et très localisées au niveau de la surface de rupture.

Les glissements rotationnels simples se traduisent par un basculement de la masse le long d'une surface (glissements superficiels) ou en profondeur (glissements profonds) dans un milieu homogène et isotrope, contrairement aux glissements rotationnels complexes qui résultent d'une surface de rupture globale non circulaire (glissements en escaliers - glissements épicycloïdaux - glissements régressifs) et dans les milieux hétérogènes et anisotropes.

La rupture d'une surface résulte soit de l'augmentation des sollicitations : événement sismique, surcharges, déboisement, suppression de la butée de pied, vibrations artificielles, etc.) Ou la modification du comportement mécanique de la structure : perte de résistance par remaniement), phénomène hydraulique (ruissèlement en surface et/ou profondeur, etc.), etc.

III. Méthode d'analyse des mouvements de terrain

Actuellement, l'analyse des risques naturels vise, parmi différents objectifs (la connaissance des phénomènes, l'adaptation des contre-mesures, etc.), la gestion des crises et l'amélioration de la prévention.

Pour la majorité des méthodes d'analyse employables, des tâches obligatoires doivent être réalisées pour chaque cas d'étude :

- Localisation des zones à risques ;
- Estimation très précise de la fréquence du risque ;
- Prévision à courte échéance du déclenchement du risque ;
- Estimation de l'ampleur du risque (au sens de la vulnérabilité) ;
- Estimation de la portée des actions anthropiques sur l'aléa.

A partir de ces actions, conduites dans le cadre d'approche naturaliste, il est possible de mieux cerner le risque en construisant des scénarios d'événements considérés comme probables. Ceci permet une visualisation synthétique du risque. Les scénarios peuvent être réalisés par le recours à des modélisations.

La gestion et la prévention du risque nécessite une évaluation et une maîtrise de l'ensemble des composants de l'aléa étudié. La **figure 47** simplifie la collecte et l'évaluation de l'aléa en amont de sa gestion. L'organigramme met en valeur le cheminement de l'analyse de l'aléa.

Les méthodologies d'analyse des risques naturels sont très souvent regroupées en deux domaines bien distincts : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives. La dernière méthode permet d'approcher l'ampleur de l'aléa et donc par la suite l'intensité du risque. A l'inverse, dans de très nombreuses situations où les surfaces étudiées sont grandes, la faible quantité de données relativement à l'ampleur de la zone en question ne permette pas d'appliquer une méthode quantitative à l'analyse de l'aléa puis du risque.

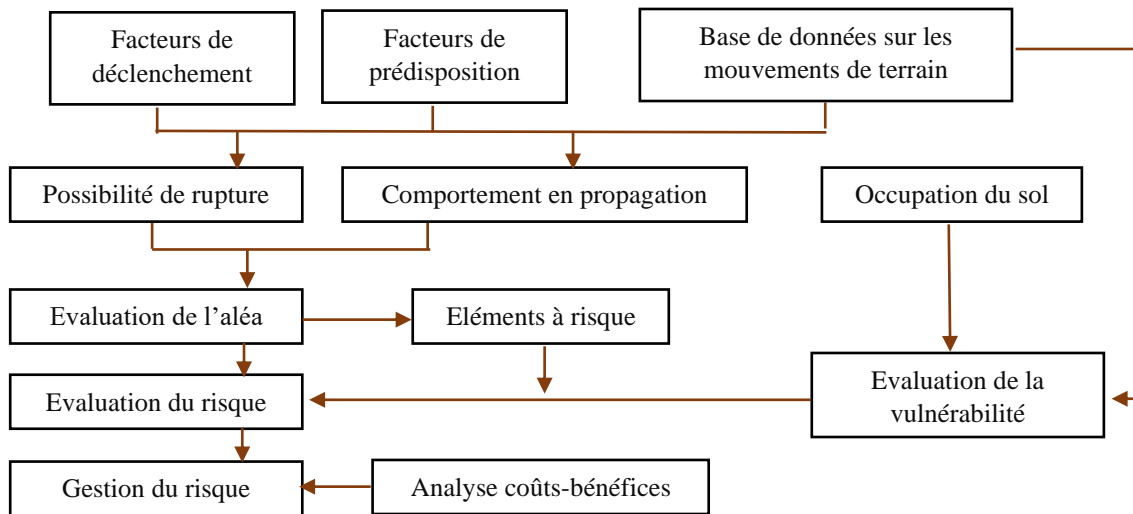


Figure 47: Schéma des étapes de l'évaluation et de la gestion des mouvements de terrain (d'après Dai et al., 2002, modifié par Laugier, 2002)

Chaque type de mouvement de terrain induit des menaces différentes, d'où la nécessité de clairement définir l'aléa pour y adapter une méthode d'évaluation valable. Une grande partie des méthodes utilisées est appliquées aux glissements de terrain (regroupées sous le terme 'Landslide') qui font partie des mouvements de terrain les plus étudiés. Pour les éboulements rocheux des méthodes plus spécifiques ont été développées dont les méthodes d'analyses trajectographiques des blocs en mouvement. La **figure 48** présente quelques-unes des méthodes les plus couramment employées à travers le monde par les scientifiques et spécialistes pour l'évaluation de l'aléa en vue d'une meilleure gestion du risque. Elles sont majoritairement appliquées à la famille des glissements de terrain.

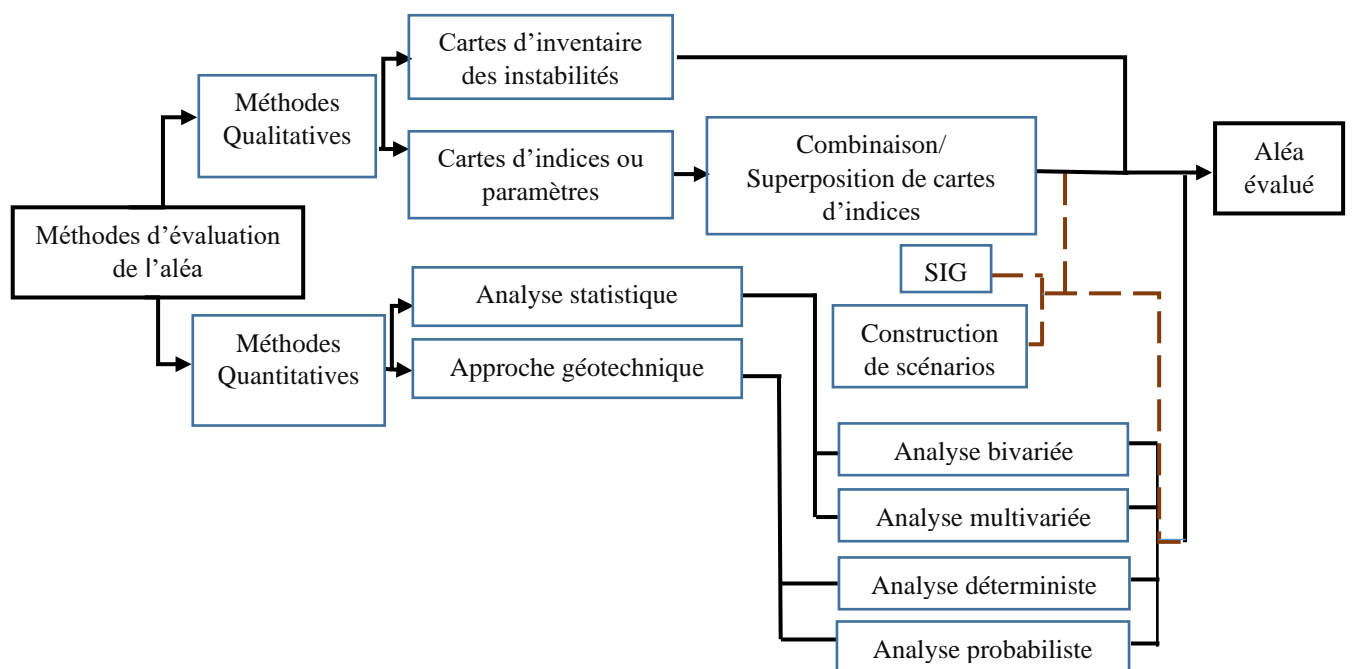


Figure 48: Méthodes d'analyse de l'aléa mouvement de terrain

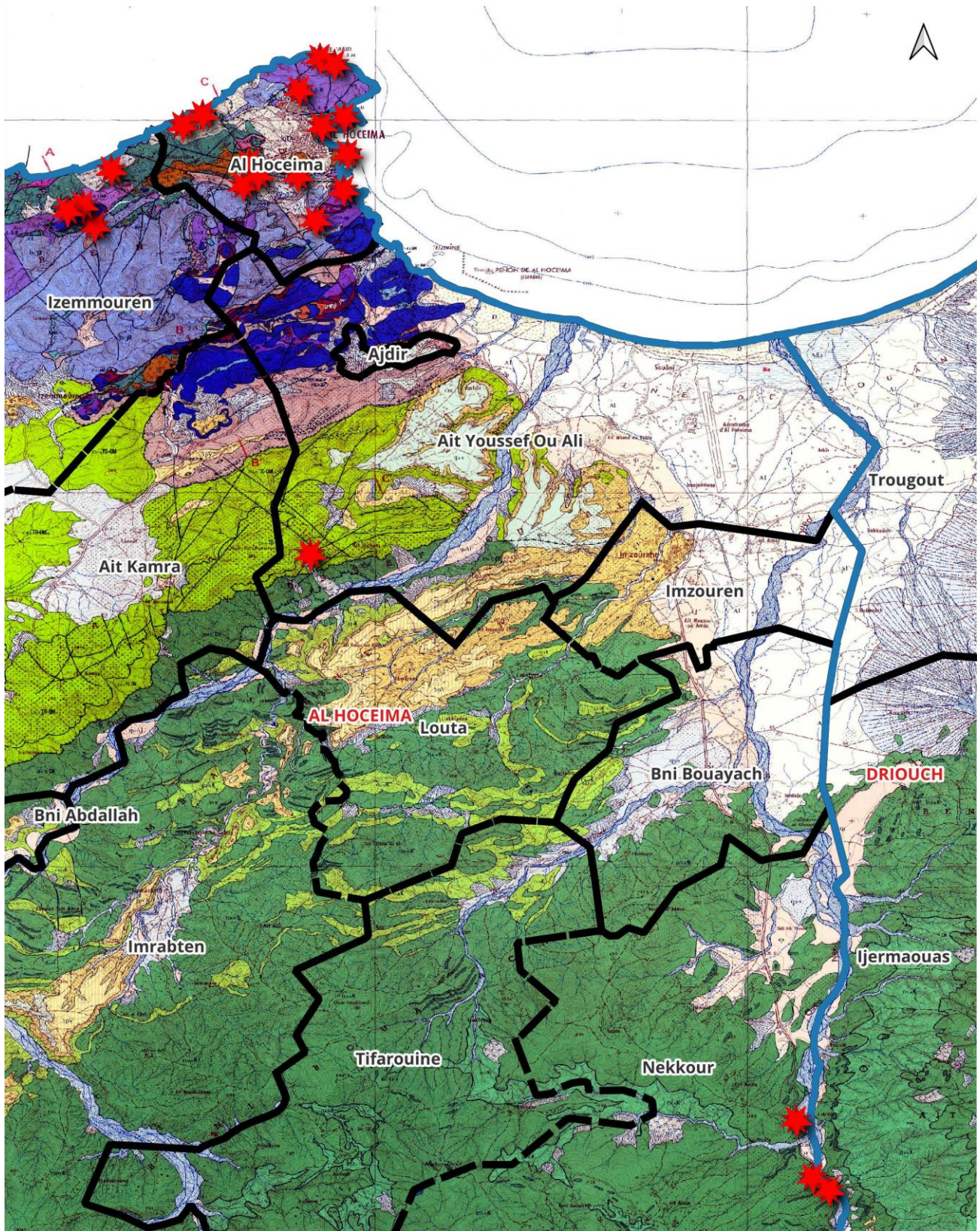
Les données de base à collecter avant d'entreprendre toute démarche d'analyse sont très variées. Elles requièrent une bonne connaissance du cadre géologique, hydrologique et géomorphologique, accessible à partir de données cartographiques disponibles, rapports techniques, consultations d'archives scientifiques, etc.

L'utilisation de données provenant de l'imagerie aérienne et la télédétection (images satellitaires ou images radar) est primordiale pour accompagner et enrichir les données terrains collectés. L'emploi de toutes les données de la zone d'instabilité est indispensable pour la surveillance de son activité et prévision dans le temps et l'espace.



La constitution d'une base de données convenable consiste à :

- Lister les phénomènes d'instabilités survenus à l'échelle de la zone d'étude à travers des cartes de localisation et fiches signalétiques (**Figure 49**) ;
- Caractériser la zone d'étude et les zones d'instabilité : type d'instabilité, géologie, géomorphologie, conditions hydrogéologiques, etc. ;
- Intégrer, structurer et harmoniser toutes les données avec contrôle de validité et précision ;

Avec l'actuel développement croissant des SIG, la création de bases de données ou leur mise à jour est devenue plus aisée et indispensable. Les cartes sont produites beaucoup plus rapidement et avec un cout moindre.



LEGENDE

-  Mouvements de terrain reconnus
-  Découpage provincial

 Découpage communal



Figure 49: Instabilités de terrain au niveau de la zone. Situation extraite de la carte géologique d'Al Hoceima au 50.000°

IV. Dégâts causés par les glissements de terrain

L'environnement géologique particulier du Rif et la forte sensibilité vis-à-vis des mouvements de terrain combinés aux conditions climatiques rigoureuses, inscrivent la province d'Al Hoceima dans une zone à risque, notamment les glissements de terrain. On se qui suit, des exemples de glissements constatés (Figures 50, 51, 52 et 53).

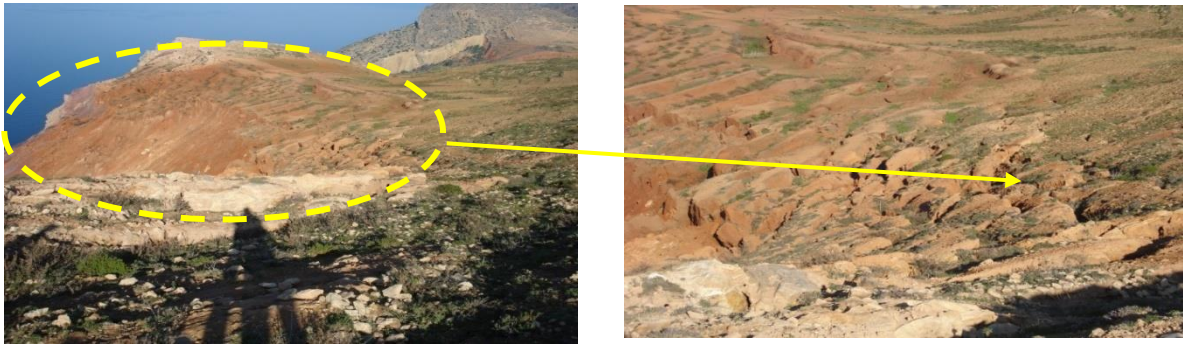


Figure 50: Glissement à TAOUSSART (fissuration du sol)

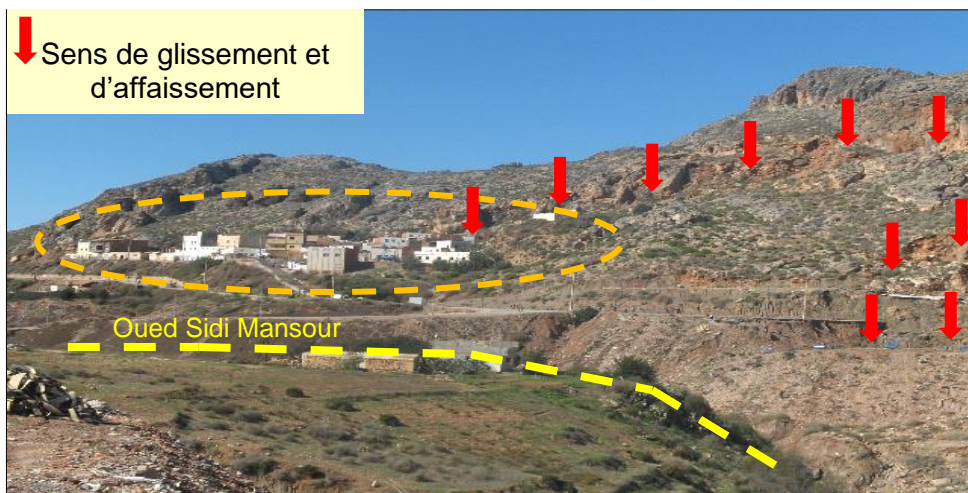


Figure 51: Agglomération menacée par le glissement de terrains et éboulement de rochers, sis quartier Sidi Mansour, Al Hoceima



Figure 52: Affaissement et destruction de la chaussée de la route liant Al Hoceima à IZEMMOUREN



Figure 53: L'érosion continue au Quartier Mirador Haut, Al Hoceima, menace la stabilité des constructions (à gauche), Chantier clandestin en cours en dépit des dangers menaçant la stabilité du sol (à droite).

V. Cartographie de l'aléa

La méthodologie nécessaire à la réalisation d'une carte d'aléa est fondamentalement la même quel que soit le type de carte à produire. Deux phases principales s'imposent : une phase de recasement de l'information alimentée par plusieurs sources de renseignement et une phase d'interprétation et de hiérarchisation de l'aléa qui mène au document final, la carte de synthèse localisent et décrivant l'aléa.

La phase de collecte de données et complètement par reconnaissance terrain abouti à l'établissement de cartes intermédiaires telles que des cartes de localisation des mouvements observés, des cartes de formations superficielles, ou encore des cartes de pentes, qui servent à une première synthèse de l'aléa en regroupant des informations sur les facteurs de prédisposition.

Ainsi, si l'expérience de terrain est encore une méthode efficace de cartographie des aléas, notamment les glissements de terrain, les cartes d'aléas s'appuient bien sur d'autres méthodes toutes spécifiques (WU T.H. et al., 2000) : consultation de données, détermination des conditions physiques des sites, détermination des corrélations statistiques entre la fréquence de l'aléa et certains facteurs (géologiques, climatiques, etc.) ou encore application de méthodes déterministes tel que le calcul de facteur de sécurité.

La deuxième phase d'interprétation et hiérarchisation de l'aléa se base sur une synthèse faite du guide technique pour la caractérisation et la cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, développé par le Comité Français de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement (CFG, 2000) :

- Définition précise de l'aléa sous forme de carte thématique et de la hiérarchisation que l'on souhaite y appliquer (**Figure 54**) ;
- Distinction entre différents phénomènes reconnus comme susceptibles de se produire ;
- Détermination des facteurs prépondérants des instabilités de terrain recensés ou reconnus comme potentielles ;
- Détermination des zones homogènes du point de vue des phénomènes et des facteurs ;
- Définition d'un mode de combinaison des facteurs de chaque zone.

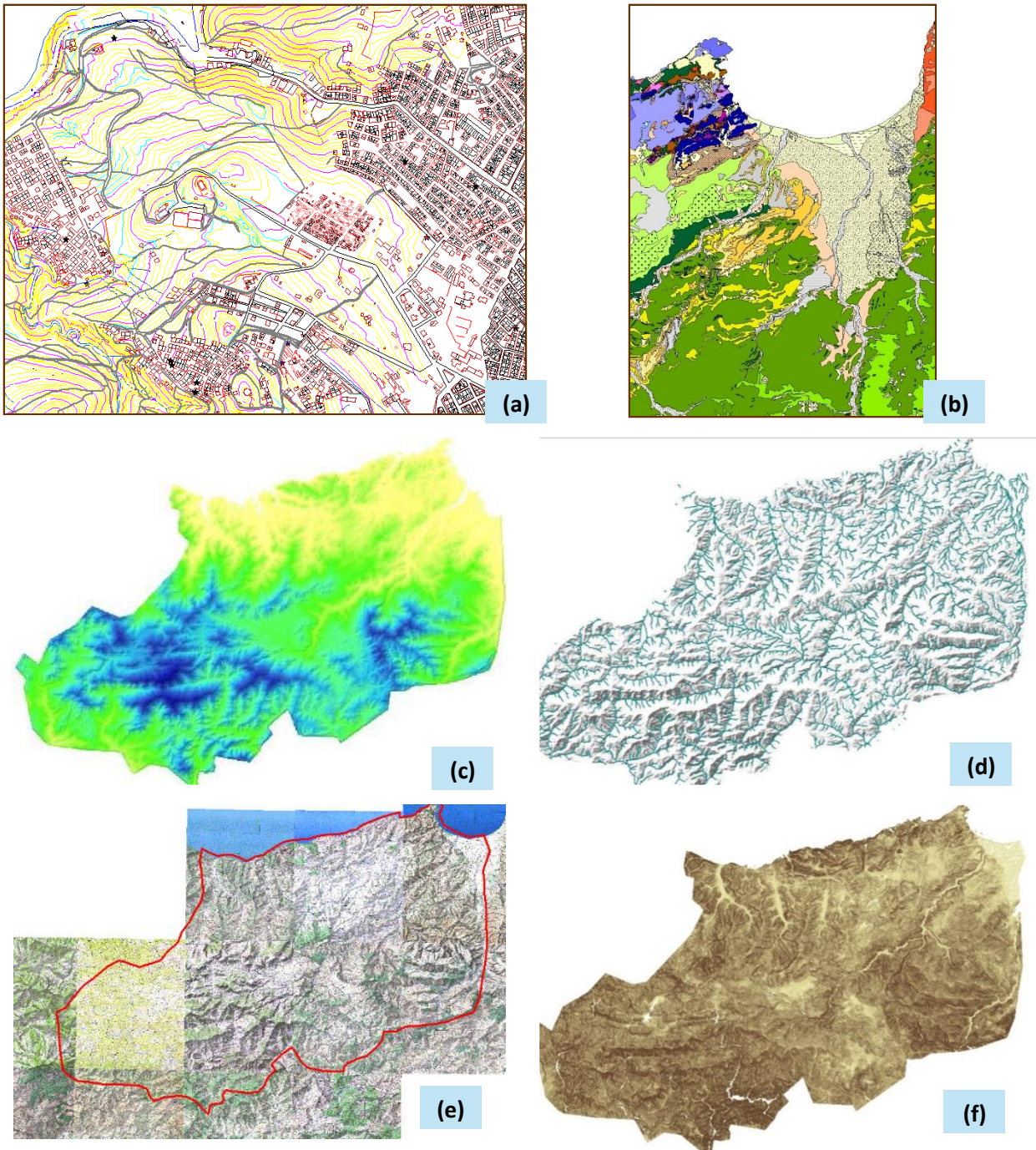


Figure 54: Données cartographiques de base collectés, intégrés et exploités dans le SIG de la zone d'étude (a) : données d'occupation du sol en format vectoriel, (b) : données de la géologie de la zone, (c) : données rasters relatifs à l'élévation du terrain, (d) : données vecteur du réseau hydrographique, (e): carte topographique de la zone à l'échelle 1/25000, (f) : données raster relatives aux pentes de terrain)

Ce canevas de base est à respecter, pour nombre de méthodes d'analyse des aléas, pour pouvoir produire des résultats fiables et utiles dans l'analyse du risque qui s'ensuit.

Les données temporelles sur les activités des mouvements de terrain cartographiés sont aussi à intégrer dans une carte d'aléa. Bien souvent cela est difficile car il y a alors surimposition avec d'autres informations ce qui rend la carte peu lisible et donc peu pratique finalement. L'avènement des outils informatiques a cependant minoré ces difficultés et a permis l'amélioration de l'intégration des données temporelles dans les cartes d'aléas (FLAGEOLLET J.C., 1996).

Enfin, les séismes étant l'un des facteurs déclenchants des mouvements de terrain, l'évaluation de cet aléa se fait souvent en tenant compte de sa probabilité d'occurrence en fonction des intensités sismiques potentielles de la région étudiée. La stabilité des pentes en condition dynamique peut être calculée et les résultats utilisés

pour construire la carte de susceptibilité à l'aléa de mouvement de terrain recherché (LUZI L. et al., 2000 ; PARISE M., 2000 ; WASOWSKI J. et al., 2000).

1. Méthode d'analyse qualitative de l'aléa

1.1. Inventaire des mouvements de terrain et cartographie

Les cartes d'inventaire, parfois appelées cartes de constat, sont la forme la plus basique d'évaluation des aléas. Elles servent de cartes de départ aux cartes géomorphologiques et plus précisément aux autres méthodes de cartographie des aléas et des risques associés. Le plus souvent, les instabilités ne sont pas classées par types, dates d'occurrence ou autres caractéristiques. Seules les limites des mouvements de terrain y sont présentées. Ces cartes sont généralement élaborées à des échelles moyennes.

La carte peut néanmoins décrire, pour chaque type d'instabilité (des glissements de terrain le plus souvent), le type de mouvement, l'état d'activité, la direction principale du mouvement, l'épaisseur estimée des matériaux mobilisés et l'évolution temporelle.

Généralement obtenue par photo-interprétation, elles permettent de justifier la poursuite des investigations à travers la réalisation de bases de données et d'autres documents cartographiques plus détaillés. Elles servent de documents de base pour établir des programmes d'aménagement adaptés à la région d'intérêt (WASOWSKI J. et al., 2000).

1.2. Analyse géomorphologique

La plus simple des méthodes qualitatives, d'après la carte d'inventaire, consiste en une récolte d'information sur le terrain, ici, c'est l'expérience qui et la compétence en mouvements de terrain des géologues et géomorphologues qui permet d'identifier précisément l'aléa.

Cette méthode directe s'emploie à n'importe quelle échelle et peut prendre en compte de nombreux facteurs. La possibilité d'une évaluation rapide des zones observées et son avantage majeur. Cependant, ses principaux inconvénients sont : la subjectivité dans la sélection des données, les méthodes d'investigation de terrain propre à chaque expert, la nécessité de longues missions de terrain (LEROI E., 1996). La nature des facteurs pris en compte est très variée, allant des valeurs de pentes à l'extension des fractures (ALEOTTI P. et al., 1999).

Les étapes suivantes doivent être respectées :

- Sélection des critères spécifiques sur lesquels repose l'évaluation de la susceptibilité ;
- Reconnaissance et mesure des indices d'instabilité de terrain ;
- Evaluation et classification du degré d'instabilité ;
- Cartographie des conditions de stabilité.

L'évaluation de la fréquence des instabilités, via les données de terrain combinées aux données climatiques et aux archives, est l'une des analyses les plus employées lorsqu'il s'agit d'établir une classification des conditions de stabilité.

L'évaluation de la magnitude de l'instabilité permet des estimations utiles des dommages potentiels et des contre-mesures de protection/réduction des dommages à développer. Avec ce type d'évaluation, on approche déjà la notion de risque, au-delà de celle de l'aléa.

L'évaluation de l'instabilité via une classification par le biais des types de mouvements et des vitesses est l'une des plus anciennes (CROZIER M.J., 1984). Elle s'appuie sur la reconnaissance des vitesses des instabilités préalablement délimitées et classées par types de mouvements (chutes de blocs, coulées de boue, affaissements, etc.).

Pour réaliser ces évaluations, des reconnaissances de la zone concernée sont indispensables. La détermination des instabilités nécessite la mise en œuvre de trois méthodes possibles : la reconnaissance aérienne et l'interprétation des photographies obtenues, la reconnaissance sur le terrain et enfin les investigations de sub-surface (par sondages).

Le **tableau 8** distingue les glissements actifs des glissements inactifs, grâce à des indices directement visibles sur le terrain.

Tableau 8: Indices caractéristiques des glissements actifs et inactifs (CROZIER M.J., 1984)

Glissement actif	Glissement inactif
Cicatrices, terrasses et crevasses avec des faces nettes	Cicatrices, terrasses et crevasses avec des faces arrondies
Crevasses et dépressions sans remplissage secondaire	Crevasses et dépressions avec remplissage secondaire
Mouvement de masse secondaire sur les faces de rupture	Pas de mouvement de masse secondaire sur les faces de rupture
Surface de rupture montrant des striations et des miroirs de failles	Surface de rupture ne montrant pas des striations récentes et des miroirs de failles
Surface de fracture fraîche sur les blocs	Altérations des surfaces de fractures de blocs
Réseau de drainage désorganisé, dépressions non drainées et mares	Réseau de drainage non perturbé
Rides de pression au contact des limites du glissement	Fissures marginales et bourrelets abandonnés
Pas de sol couvrant la surface de rupture exposée	Sol couvrant la surface de rupture exposée
Présence de végétation à croissance rapide	Présence de végétation à croissance lente
Végétations différentes sur et hors du glissement	Pas de végétations différentes sur et hors du glissement
Arbres basculés sans nouvelles croissances verticales	Arbres basculés avec nouvelles croissances verticales

1.3. Cartographie par pondération des facteurs

Depuis des années, les recherches sur l'évaluation des aléas naturels ont nettement progressé, en particulier sur le sujet des glissements de terrain (GUZZETTI F. et al., 1999). A l'inverse de l'analyse géomorphologique qui peut paraître trop subjective ou pas assez détaillée, voir difficilement compréhensible pour les non spécialistes, le zonage des aléas par des cartes d'indices ou des paramètres permet une représentation meilleure et rapidement déchiffrable. Ces recherches sur l'évaluation des glissements de terrain ont abouti à la création de ces cartes de facteurs qui sont devenues incontournables dans les analyses cartographiques des aléas.

Le canevas de la plupart des méthodes de cartographie consiste à attribuer des valeurs aux différents facteurs de prédisposition (BONNET-STAUB I., 1998). L'expert doit sélectionner les facteurs jugés déterminants vis à vis de la stabilité des terrains. Chaque analyse de facteur pouvant se traduire cartographiquement, la superposition des cartes de facteurs produit une carte de zonage de l'aléa « carte de susceptibilité à l'aléa » se zonage se fait par classe.

2. Méthode d'analyse quantitative de l'aléa

2.1. Analyse statistique

Les analyses statistiques, méthodes indirectes, ont été développées pour combler le manque d'efficacité des évaluations d'expert (WASOWSKI J. et al., 2000). L'analyse historique des événements doit permettre de développer une méthode beaucoup plus objective que la démarche d'expert.

L'emploi des modèles statistiques nécessitent la détermination des combinaisons de variables responsables des instabilités par le passé. Cette méthode est applicable aux sites stables à condition que ceux-ci présentent des conditions et caractéristiques similaires aux sites instables où les analyses statistiques ont été menées (DAI F. et al., 2001). L'analyse statistique autorise la comparaison entre la répartition spatiale des mouvements de terrain repérés et les paramètres considérés comme favorables à la génération des

phénomènes d'instabilité. Cela revient donc à déterminer le degré de causalité entre chaque facteur et chaque type d'instabilité.

La recherche statistique porte donc sur la découverte des relations probantes entre l'occurrence des mouvements de terrain et la présence des divers facteurs de prédisposition (climatiques, géomécaniques, caractéristiques du mouvement, etc.). L'échelle la plus adaptée à ce genre d'analyses est comprise entre l'échelle régionale et les petites échelles.

2.1.1 Analyse statistique bivariée

L'analyse bivariée s'appuie uniquement sur deux variables d'analyse. Cette méthode est plus employée par les géologues (ALEOTTI P. et al., 1999) et s'applique sur une large gamme de paramètres (orientation de pente, densité du réseau de drainage, pente, etc.). Elle nécessite la détermination d'une valeur seuil pour chaque facteur séparant les deux domaines de susceptibilité.

Les valeurs nominales des facteurs sont converties en valeurs numériques suivant la densité des mouvements de terrain relevé au niveau de chaque unité de terrain. La carte de susceptibilité peut alors être produite. Les conditions géométriques critiques propices à la génération des instabilités sont facilement définissables suivant ce type d'analyse.

2.1.2 Analyse statistique multivariée

L'analyse statistique multivariée permet l'emploi de plusieurs variables d'analyse. Cette méthode se fait via une analyse discriminante ou une analyse régressive multiple. La première s'emploie dans le cas de variables discontinues et la seconde dans le cas de variables nominales ou continues.

Il est nécessaire, dès le début de la méthode, de compartimenter le terrain par la création « d'unités cartographiques » pour permettre par la suite le zonage des indices de susceptibilité aux mouvements. Une unité est une portion de terrain présentant des caractéristiques homogènes (de point de vue topographie, géologique et hydrographique) différentes des zones adjacentes. Le type et la qualité des données, leur précision, le type de phénomène étudié, l'échelle cartographique sont autant de facteurs influençant le type d'unité cartographique retenue. Les étapes suivantes sont indispensables (ALEOTTI P. et al., 1999):

- Classification de la zone en unités cartographiques ;
- Identification des facteurs de prédisposition et création d'une carte par facteur ;
- Cartographie des mouvements de terrain ;
- Superposition des cartes de mouvements de terrain et les cartes des facteurs de prédisposition ;
- Identification des pourcentages de surfaces affectées par les instabilités dans chaque unité cartographique ; classification des unités en zones « stables » et « instables » ;
- Combinaisons entre les cartes de facteurs et la carte des unités « stables » et « instables » ;
- Analyse multivariée régressive ;
- Classement des unités cartographiques en classes de susceptibilité ; carte de zonages finale.

L'avantage principal d'une analyse de bivariée (via une régression logique) sur une analyse multivariée est sa simplicité, les valeurs prédictives ne pouvant être que de deux types : événements possibles et impossibles. Il en découle une facilité de lecture et d'interprétation de résultats. Les cartes de susceptibilité obtenues sont à moyennes et petites échelles (DAI F. et al., 2001).

Le principal risque de la méthode est l'analyse de facteurs dépendants et la création de corrélations parfois grossières et illogiques entre des variables réellement indépendantes et la susceptibilité aux mouvements de terrain.

3. Quantification de la vulnérabilité

La logique des concepts de vulnérabilité repose sur les renseignements tirés des analyses en retour d'expériences déjà vécues.

La quantification de la vulnérabilité aux mouvements de terrain par une méthodologie reproductible exige tout d'abord la classification des mouvements de terrain, la définition de son intensité et la constitution des

typologies d'endommagement spécifiques. Elle se matérialise par la constitution de matrices d'endommagement qui constituent le cœur de la méthodologie d'évaluation.

Les étapes méthodologiques une fois définies, on tente de les illustrer par quelques applications fictives sur des zones exposées d'une part à des chutes de blocs et d'autre part à des glissements.

L'évaluation de la vulnérabilité, selon une approche quantitative, passe par la détermination du niveau d'endommagement potentiel d'un certain nombre d'éléments exposés situés dans la zone d'extension prévisible du phénomène. Cela revient donc à prévoir et à quantifier, dans la mesure du possible, la nature de l'interaction entre éléments exposés et phénomènes.

Cependant, compte tenu de la diversité, de la complexité et de la variabilité spatio-temporelle des mécanismes mis en jeu par les phénomènes de mouvements de terrain, il est souhaitable de réduire leur classification à une expression plus simple qui soit représentative de leur processus d'endommagement, ou en d'autres termes et par analogie aux séismes, de la nature de la sollicitation qu'ils exercent sur les éléments qui y sont exposés. La seconde difficulté est d'arriver à caractériser l'intensité destructrice de cette sollicitation par des critères physiques simples.

Un fois cette étape réalisée, on disposera d'un schéma homogène de structuration et de quantification de la vulnérabilité des éléments exposés sous la forme de matrices dites "d'endommagement". La constitution de ces matrices nécessitera au préalable de définir des typologies à la fois des éléments exposés et de leurs modes d'endommagement. On verra que la réalisation de cette étape n'est pas aisée, compte tenu notamment du peu de données statistiques dont on dispose et de la méconnaissance des différentes fonctions d'endommagement qui conditionnent ces matrices.

Le processus d'endommagement, ou sollicitation, décrit l'action du phénomène sur l'élément structurel (bien) ou corporel (personne) qui le subit.

Contrairement à d'autres phénomènes naturels tels que les inondations ou les séismes, les mouvements de terrain se singularisent par différents types de processus d'endommagement (LEONE F. et al., 1995). La **figure 55** distingue entre les principaux phénomènes de mouvements de terrain.

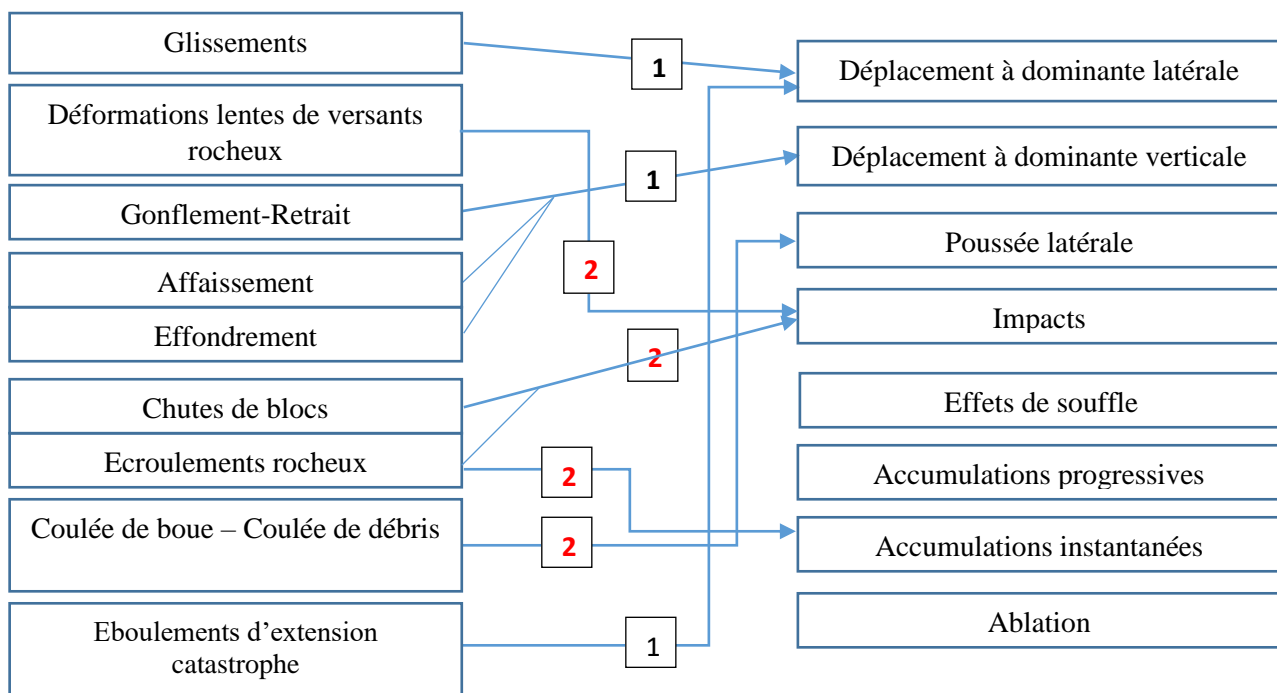


Figure 55: Les principaux phénomènes de mouvements de terrain et les sollicitations associées ; 1 : à l'aplomb de la surface de rupture, 2 : pour la zone aval (de réception)

4. Synthèse

De nombreuses zones du Maroc subissent des aléas d'instabilité, le cas d'Al Hoceima est très significatif, la plupart des zones instables engendrent des incidences sur les biens et risquent de causer des pertes humaines et limitent les choix en matière d'aménagement du territoire. L'instabilité des versants est rarement attribuée

à un seul facteur. Elle est le plus souvent, déterminée par la combinaison de plusieurs difficilement dissociable à cause des interactions mutuelles. La taille du mouvement augmente d'autant plus que le nombre de facteurs impliqués est important.

Les facteurs causals sont subdivisés en :

- **Facteurs de conditionnement** : Lithologie, Tectonique, Géotechnique, morphologie, proximité d'un réseau de drainage, etc., sont ceux qui déterminent les conditions de stabilité ou d'instabilité du versant ;
- **Facteurs de déclenchement** : Précipitation, séisme, activité anthropique, sont ceux qui déclenchent les mouvements par changement rapide des conditions des versants définies par les premiers. Les facteurs causals constituent les éléments de base pour comprendre les processus d'évolution des versants et pour adopter le zonage de l'aléa permettant d'expliquer la potentialité d'occurrence des mouvements.

Les études des risques de mouvements de terrain visent principalement l'élaboration un diagnostic des zones d'aléas et l'expertise générale des composantes géologiques, géotechniques et spatiales pour une meilleure compréhension dans le but d'élaborer une carte de zonage de l'aléa, la vulnérabilité et le risque total ; les cartes constituées constituent un référentiel de base pour maîtriser, encadrer et canaliser le développement de tous les projets d'urbanisation et d'aménagement du territoire.

La réalisation de toute étude s'effectue en deux étapes principales :

- **Investigations et reconnaissances de l'aire d'étude** : Cette phase de l'étude comporte des investigations spécifiques et adéquates, en complément de la documentation disponible. Les investigations se rapportent à l'analyse de la topographie du site, les données géotechniques, géomorphologiques et tectoniques, les données géologie de l'aire d'étude et l'utilisation générale du sol.
- **Etablissement des cartes de zonage** des aléas, vulnérabilités et risques de mouvements de terrain à une échelle adéquate. Les cartes produites justifient les résultats de l'étape précédente de diagnostic et reconnaissance. Les cartes de zonages s'expriment par échelles d'intensité et s'accompagnent généralement des mesures et recommandations d'utilisation du sol.

QUATRIEME PARTIE : ETUDE DE CAS, ANALYSE, RESULTATS ET CONCLUSIONS

INTRODUCTION

Les risques naturels se produisent dans la zone d'Al Hoceima, appartenant au rif oriental du Maroc, là où les facteurs de prédisposition et de déclenchement des aléas sont très favorables. La zone enregistre des séismes de magnitudes élevées, des glissements de terrain et généralement des instabilités de terrain, à cela s'ajoute des enjeux importants, à l'échelle humaines et matérielles.

Des études antérieures et des travaux de terrain dans le Rif septentrional et la région d'Al Hoceima ont permis de mettre en évidence le rôle essentiel que jouent les formations géologiques et la topographie dans la répartition des mouvements de terrain (Talhaoui et al., 2005). Le tableau ci-dessous présente l'ensemble des instabilités, les sites où elles ont été localisées et les subdivisions des facteurs contribuant à leur déclenchement (**Tableau 9**).

Tableau 9 : Facteurs déclenchants, sites et types d'instabilités (Talhaoui et al., 2005). Modifié

Site	Type d'instabilité	Pente			Lithostratigraphie			Fracturation			Sismicité		
		Forte	Moyenne	Faible	Roche compacte homogène	Roche tendre homogène	Hétérogène	Forte	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Faible
SIDI MANSOR	Glissement de terrain												
QUEMADO													
Port d'Al Hoceima													
MATADERO	Ecrolement												
CALA BONITA													
Village MIRADOR													
SABADIA	Détachement de blocs												
RAS EL ABED													
MORO VIEJO													

La partie présente partie est consacrée à la présentation des études d'instabilités sur différents secteurs rencontrés dans la zone d'Al Hoceima. Elle a permis de réaliser des descriptions et des cartographies, des facteurs d'aléa, intensités, enjeux identifiés et de souligner l'importance des risques évalués des zones étudiées.

CHAPITRE I : ETUDE MULTI-ECHELLE QUALITATIVE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN DE LA PROVINCE D'AL HOCEIMA

I. Introduction

Le cadre sismique régional et local de la région d'Al Hoceima constitue une cause majeure de plusieurs instabilités déclenchées dans la ville (en milieu urbain aménagé et périphérie) et les autres communes de la province. Ainsi les séismes survenus (1994, 2004 et 2016) peuvent induire des phénomènes de mouvement de terrain (glissements, chute de blocs, éboulements). Ces mouvements de terrain peuvent être à l'origine de dégâts plus importants que ceux qui sont provoqués directement par les vibrations du sol, comme ce fut le cas lors du séisme du Salvador de janvier 2001. Les mouvements de terrain ne sont cependant pas exclusivement provoqués par les séismes. Ils peuvent également être engendrés par les fortes pluies et/ou l'action de l'homme. La conjugaison de deux facteurs est, elle aussi, possible (par exemple lors du séisme du 21 novembre 2004 en Guadeloupe).

D'après les études antérieures sur la zone, le séisme de 2004 n'a pas induit des mouvements de terrain significatifs et directs (BRGM, 2005). Dans le cadre de notre intervention sur le territoire de la région, de nombreuses instabilités survenues récemment depuis 2016, ont suscités une action publique d'étude, évaluation, cartographie et adaptation de la politique de construction et aménagement urbain. En effet, il est important de prendre en compte l'ensemble des événements historiques et facteurs de prédisposition pouvant avoir une manifestation locale.

La cartographie des risques pour l'aptitude à l'urbanisation de la zone devra donc prendre en compte l'ensemble des types de mouvements de terrain qui peuvent affecter cette zone, quel qu'en soit le facteur déclenchant. Cette prise en compte se fera par le biais d'une carte d'aléa mouvement de terrain, qui sera réalisée selon l'approche alternative présenté ci-après.

II. Typologie des instabilités recensées dans la région

La chaîne du Rif en général et la Province d'Al Hoceima en particulier, présente une certaine variété d'instabilités. Cette diversité est liée à la complexité lithologique et structurale, ainsi qu'à l'importance des dénivellations, faisant intervenir des pentes et des conditions climatiques différentes [Mastere et al. 2015 ; El Hamdouni et al. (2018) ; Elmoulat et Ait Brahim (2018) ; Ait Brahim et al. (2018) ; Bousta et Ait Brahim (2018) ; Jemmah et Ait Brahim (2018) ; El Fahchouch et al. (2018) ; El Hamdouni et Aitbrahim (2018) ; Elmoulat et al. (2021) ; El Hamdouni et al. (2022)]. Ces instabilités entraînent chaque année des dégâts aussi bien humains que matériels (habitations, infrastructures et aménagements hydrauliques, réseau ferroviaire et routier, ...). Malheureusement, ces phénomènes, sont très peu étudiés et connus sur l'ensemble du territoire d'Al Hoceima. Seulement 12% de la documentation collectée concerne ces phénomènes. Par ailleurs la plupart de ces documents sont soit d'ordre général (méthodologique) ou encore correspondent à des études ponctuelles. L'étude, la plus générale, la plus complète et la plus précise et fiable existant sur notre secteur d'étude est la thèse de Margaa (1994). Ce travail, qui a constitué la principale source d'information concernant les mouvements de terrain sur notre zone d'étude ne concerne que la ville d'Al Hoceima et ses environs immédiats.

En rajoutant les instabilités que nous avons recensées, nous pouvons citer certains situées sur des sites très reconnus : QUEMADO ; SIDI ABED/RAS EL ABED ; PORT D'AL HOCEIMA ; SABADILLA ; SIDI MANSOUR ; BOUJIBAR ; CALA BONITA ; MIRADOR ; MATADERO ... Les **figures 56, 57, 58 et 59** représentent les zones instables de l'inventaire effectué pour les 4 typologies d'instabilité.

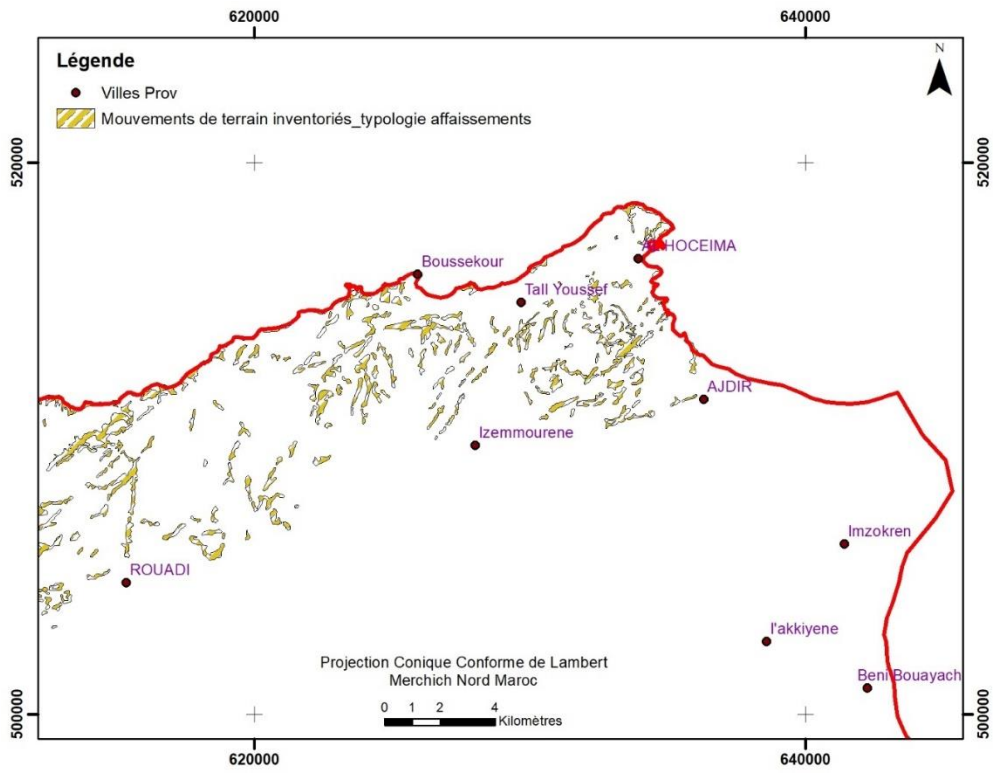


Figure 56: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des affaissements effondrements

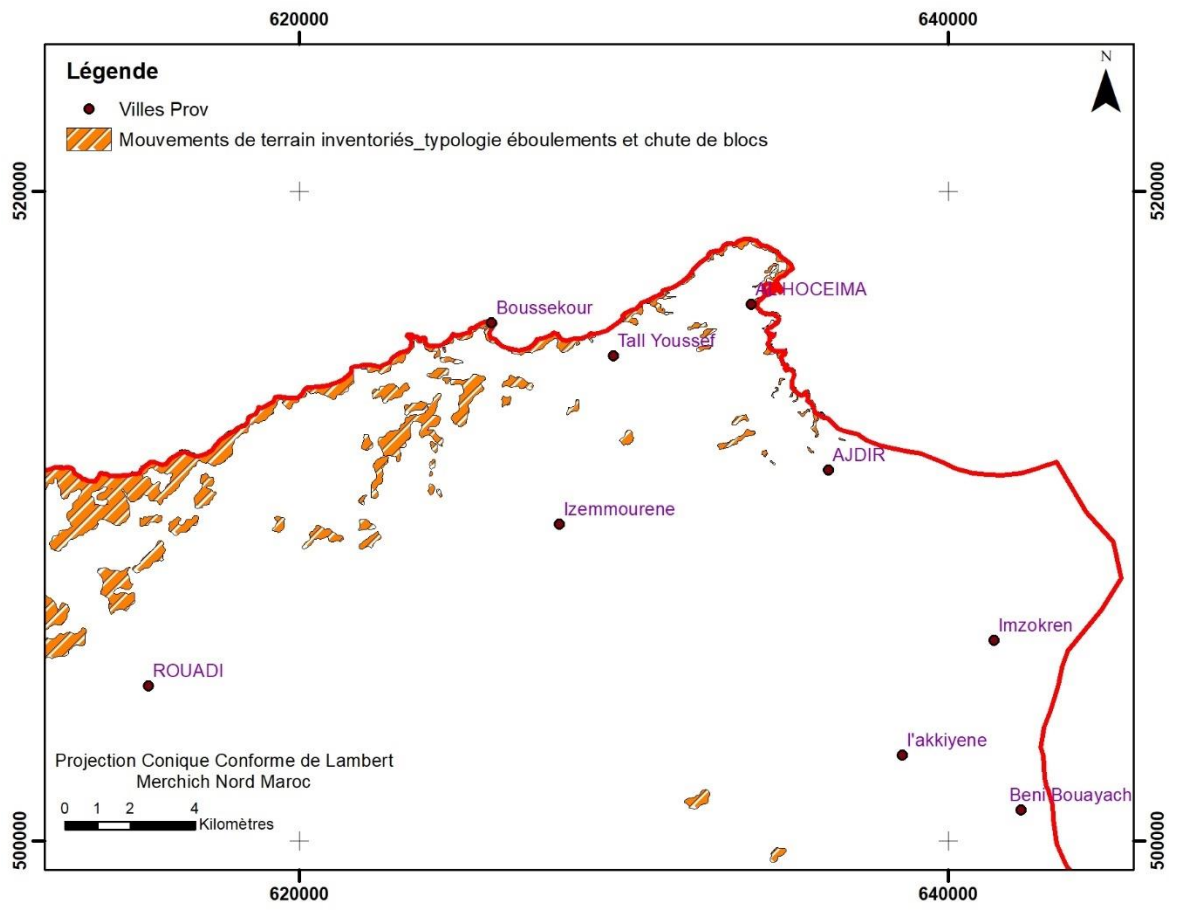


Figure 57: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des éboulements et chutes de blocs

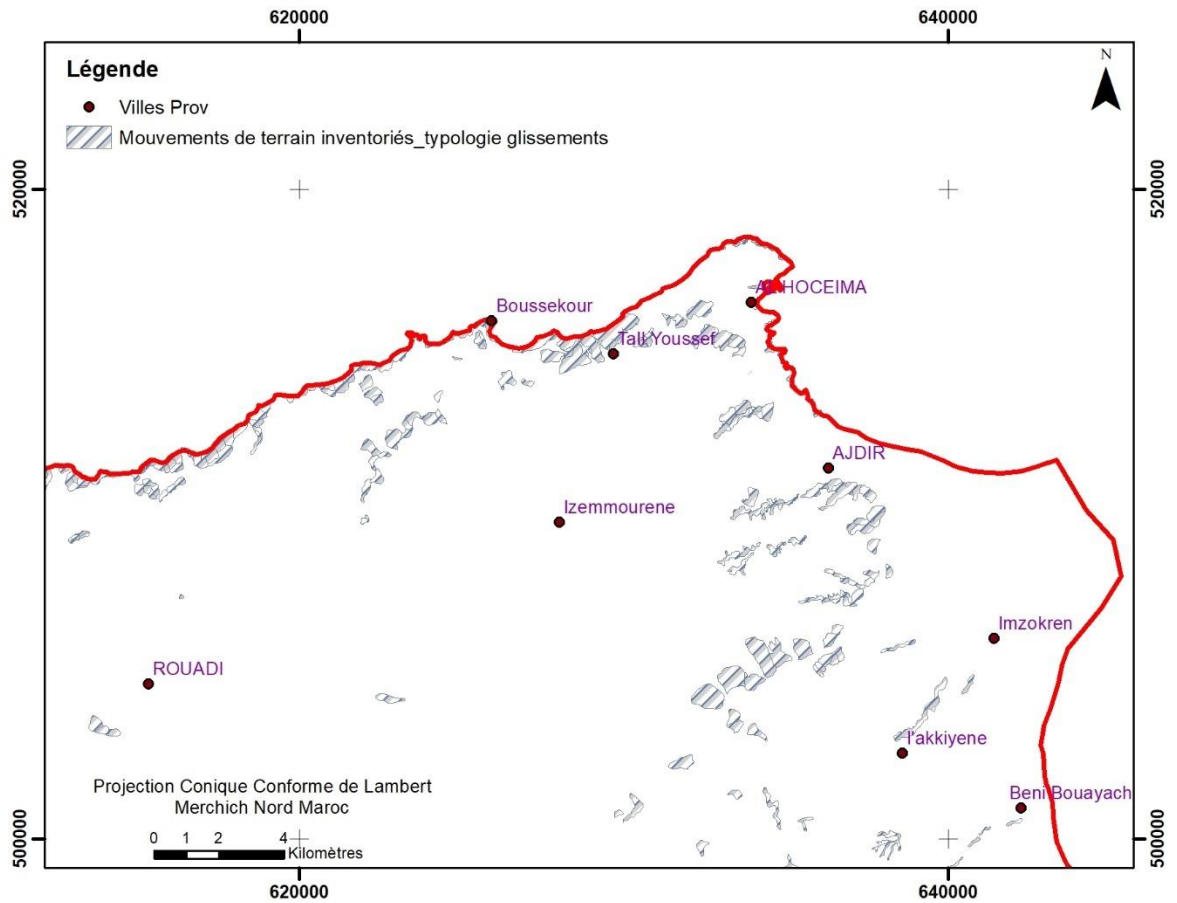


Figure 58: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des glissements de terrain

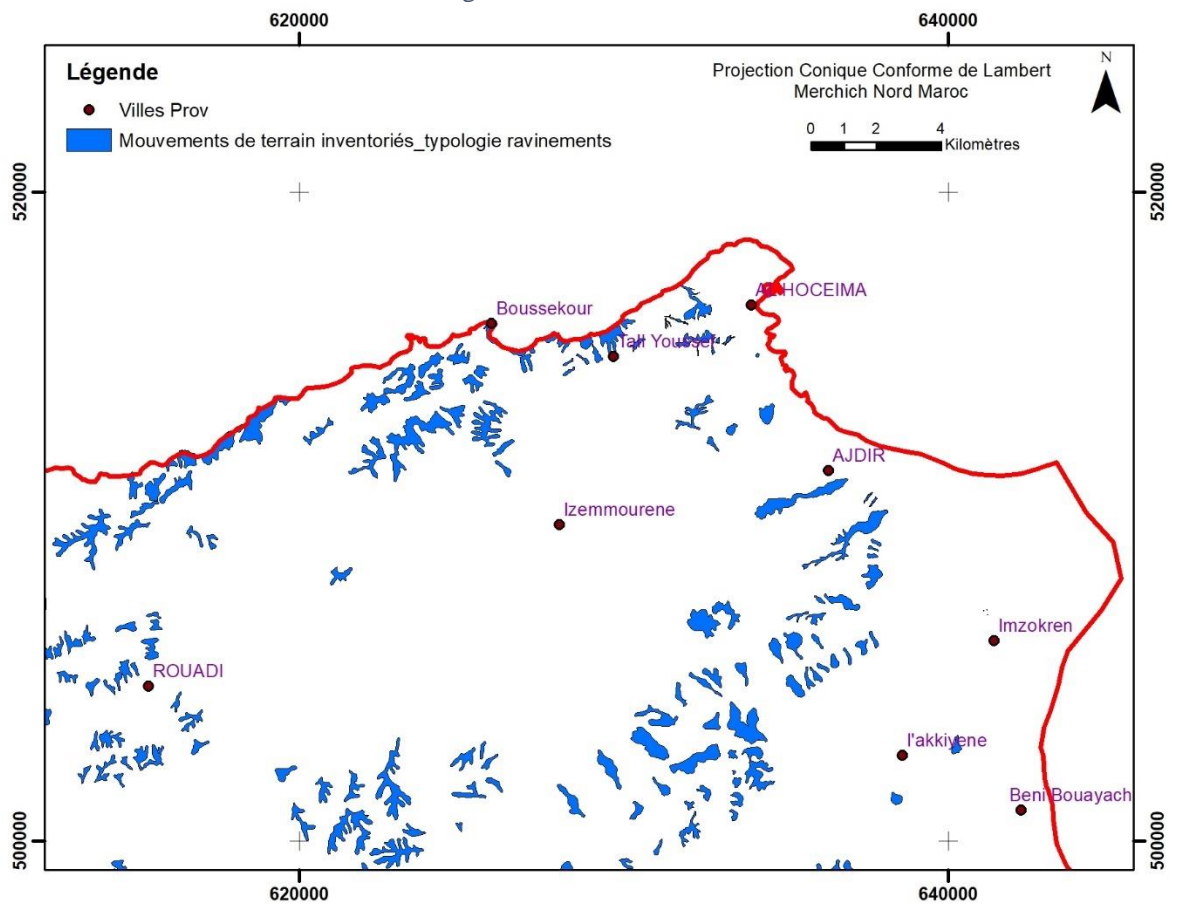


Figure 59: Sites d'instabilités de terrain recensés à l'échelle de la zone et inclus dans notre BD SIG – cas des ravinements

III. METHODOLOGIE PROPOSEE

Différentes approches de la cartographie des risques mouvements de terrains, à différentes échelles existent (l'expertise, analyse en retour par reconnaissance de forme, analyse mécanique, etc.). Mais s'appuyant obligatoirement sur une bonne connaissance du contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique local, la cartographie de ces phénomènes doit être réalisée par des experts pluridisciplinaires expérimentés, rompus au travail de terrain et aux pratiques de la géologie, de l'hydrologie, de l'ingénierie et l'utilisation des outils spécifiques (télédétection, photo-interprétation, SIG, etc.). La démarche aboutissant à la qualification et la cartographie des aléas mouvements de terrain et qui sera présentée plus en détail au cours de la phase suivante de la présente étude, se décompose en 6 étapes principales.

- Etude géologique, géomorphologique, hydrogéologique et géotechniques : exploitation des données existantes et étude de terrain.
- Recherche historique concernant les évènements survenus dans le passé, leurs effets et leurs éventuels traitements : Recherche bibliographique enquête auprès des administrations.
- Reconnaissance des phénomènes naturels par analyse et interprétation des imageries satellitaires et/ou des photographies aériennes et/ou images drone et étude directe sur terrain, évaluation de leur instabilité et leur classification en fonction de leur degré d'activité relative.
- Elaboration d'une base de données SIG (sous ARCGIS ou QGIS) et de fiches techniques descriptives de l'ensemble des évènements recensées et validées lors des étapes précédentes.
- Cartographie des phénomènes naturels : élaboration d'une carte de potentialité aux mouvements de terrain (pré-zonage des risques) à petite échelle : Délimitation semi-automatique des secteurs homogènes où ces phénomènes sont susceptibles de se produire en appliquant une nouvelle méthodologie de cartographie rapide des aléas mouvements de terrain développé par S. REBAÏ-PHILIP (2006).
- Qualification et cartographie des instabilités à l'échelle des zones homogènes et des zones spécifiques.

IV. RECONNAISSANCES DES CAS D'INSTABILITE PAR ANALYSE TERRAIN DIRECTE

Dans notre approche, la priorité est accordée à l'analyse de terrain. Ainsi des missions de reconnaissance sommaire de terrain ont été effectués après traitements des données existantes et analyse des images existantes (satellitaires et de photogrammétrie : par avion et drone). Le but essentiel est de s'imprégner du contexte local du terrain et d'identifier la typologie des phénomènes mouvements de terrains et les facteurs de prédispositions locaux qui les régissent. Cette campagne nous a permis d'une part, la vérification et la confirmation des informations recueillies au cours des étapes bibliographiques et d'autre part la détection d'autres indices de phénomènes à risques et l'évaluation, de leur ampleur et leur potentialité de réactivation et la délimitation de leur emprise.

V. CARACTERISATION DE LA ZONE A UNE ECHELLE DE CARTOGRAPHIE ADAPTEE VIS-A-VIS L'ALEA MOUVEMENT DE TERRAIN

Il existe différentes approches à différentes échelles de la cartographie des risques « mouvements de terrain » (l'expertise, l'analyse en retour par reconnaissance de forme, l'analyse mécanique, etc.). Mais s'appuyant obligatoirement sur une bonne connaissance des contextes géologiques, hydrogéologiques et géotechniques locaux, la cartographie de ces phénomènes doit être réalisée par des experts pluridisciplinaires expérimentés, rompus au travail de terrain et aux pratiques de la géologie, de l'hydrologie, de l'ingénierie et l'utilisation des outils spécifiques (télédétection, photo-interprétation, SIG, etc.). La présente démarche alternative proposée consiste à rechercher, recenser, décrire et cartographier tous les phénomènes prévisibles (actifs, déclarés ou constatés à l'échelle humaine et présumés ou potentiels) en matière de risques naturels mouvements de terrain. Cette étude aboutit à la délimitation sur un fond topographique des secteurs de manifestations prévisibles (actifs ou présumés) des phénomènes mouvements de terrain. La démarche aboutissant à la cartographie informative des phénomènes à risques se décompose de 5 étapes principales :

- Collecte des données
- Analyse et exploitation des données
- Elaboration des différentes cartes thématiques
- Délimitation semi-automatique des secteurs homogènes où ces phénomènes sont susceptibles de se produire : carte de potentialité aux mouvements de terrain (pré-zonage des risques)
- Application de la méthodologie sur l'ensemble de la zone d'étude

1. Collecte des données existantes

Par rassemblement des données disponibles sur la zone d'étude (informations historiques concernant les phénomènes naturels ; zones inondables cartographiées ; cartes thématiques et générales déjà établies sur les phénomènes naturels ; occupation des sols ; diverses études, ouvrages ou publications scientifiques géologiques, géotechniques, géomorphologiques, hydrogéologiques, hydrologiques, hydrauliques, etc. ; cartes géologiques, structurales, géomorphologiques ; données pluviométriques et débits ; données topographiques existantes, etc.). Cette partie a fait l'objet d'une description ci-dessus (**Figure 21**).

2. Analyse et exploitation des données existantes

L'ensemble des données collectées nous a permis de situer notre zone d'étude dans son contexte géologique, géomorphologique et hydrologique régional. Elle nous a permis également d'analyser les différents facteurs de prédisposition aux mouvements de terrain.

2.1. Historicité des phénomènes naturels

Cette étape est essentielle et incontournable dans notre démarche. Au plan technique, elle présente un double intérêt : D'une part, celui de dresser un historique des événements, ce qui permet d'avoir une idée de la sensibilité du site concerné vis-à-vis de tel ou tel phénomène. D'autre part, celui d'identifier les conditions d'environnement ayant favorisé l'apparition des instabilités.

2.2. Identification des facteurs de causalité des phénomènes naturels et élaboration des cartes analytiques et thématiques

L'identification de ces facteurs est importante car ce sont eux qui gouvernent la répartition spatiale des phénomènes naturels mouvements de terrain. La cartographie de ces aléas nécessite donc la connaissance de ces facteurs en tout point. Ces phénomènes sont généralement liés à la conjonction de deux types de facteurs : des facteurs de déclenchement et des facteurs de prédisposition.

Les **facteurs de prédisposition** sont ceux dont la présence induit les phénomènes de mouvements de terrain, mais ne suffisent pas à eux seuls à les déclencher. Ces facteurs sont fixes ou évoluent très lentement avec le temps. On y distingue des facteurs internes, qui sont liés à la nature du sol et du sous-sol, et des facteurs d'environnement qui caractérisent plutôt le site. Les facteurs de prédisposition permanents conditionnent en fait la répartition spatiale du phénomène. Ils permettent de caractériser la potentialité du milieu vis-à-vis du phénomène en question. Il s'agit essentiellement de la lithologie et des caractéristiques géotechniques propres de chaque formation, pente, fractures, pendages, hydrologie, végétation, travaux et action anthropique, etc.

Ces facteurs sont transcrits sous forme de cartes analytiques ou de facteurs de prédisposition d'échelle régionale, dont principalement les suivantes : carte lithologique simplifiée, carte des fracturations, carte hydrologiques et d'accumulation des eaux, carte des pentes, carte d'exposition, carte d'occupation du sol (végétation).

Il s'avère en effet souvent utile de réaliser des cartes analytiques, qui concernent certains éléments jugés déterminants. C'est la combinaison de ces éléments qui permet entre autres d'évaluer la potentialité aux phénomènes à risques dans une zone donnée.

Les **facteurs de déclenchement** sont quant à eux ceux qui sont responsables de l'activation du phénomène. Ils sont bien souvent d'une origine externe au site en question.

2.3. Elaboration des différentes cartes thématiques

Chacun des facteurs de prédispositions précédemment identifiés a fait l'objet d'une carte synthétique spécifique dite « carte thématique » dans un souci d'homogénéisation de l'information et d'une préparation de la phase de croisement et de traitement numérique sous SIG. Ainsi, une dizaine de cartes thématiques ont été élaborées. Nous présentons ci-après les principales d'entre elles.

Lithologie : Sa répartition spatiale est connue au travers des cartes géologiques à l'échelle 1/50 000e, 1/100 000e, 1/200 000e et/ou 1/500 000e qui couvrent la totalité de la zone d'étude. Cependant, il convient de garder à l'esprit que les éléments cartographiés sont des formations géologiques (caractérisées par un âge et des conditions de mise en place) lesquelles ne correspondent pas nécessairement à une lithologie homogène. Plus de mille formations lithologiques différentes sont identifiables sur l'ensemble de la zone d'étude. Par souci d'homogénéisation, nous avons groupé ces différentes formations en fonction uniquement de leur nature lithologique et de leurs caractéristiques mécaniques intrinsèques (cassant, ductile, meuble) indépendamment de leur âge. Seulement une dizaine de classes lithologiques différentes ont été retenues. Nous avons par la suite affecté à chacune de ces différentes classes un coefficient de prédisposition en fonction de différents types de mouvements de terrain susceptibles d'affecter la zone d'étude (excepté le retrait-gonflement des argiles) ; **Figure 60, 61, 62 et 63.**

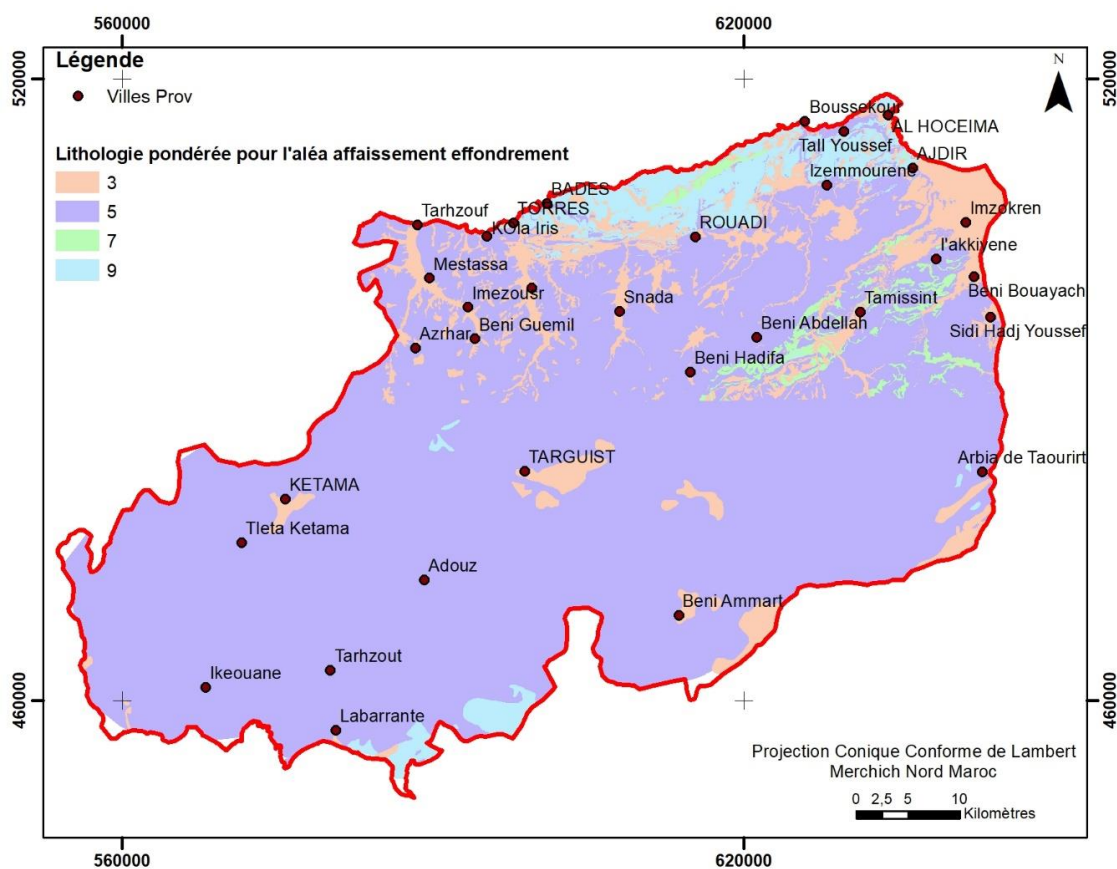


Figure 60: Lithologie pondérée pour l'aléa affaissement effondrement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa affaissement effondrement)

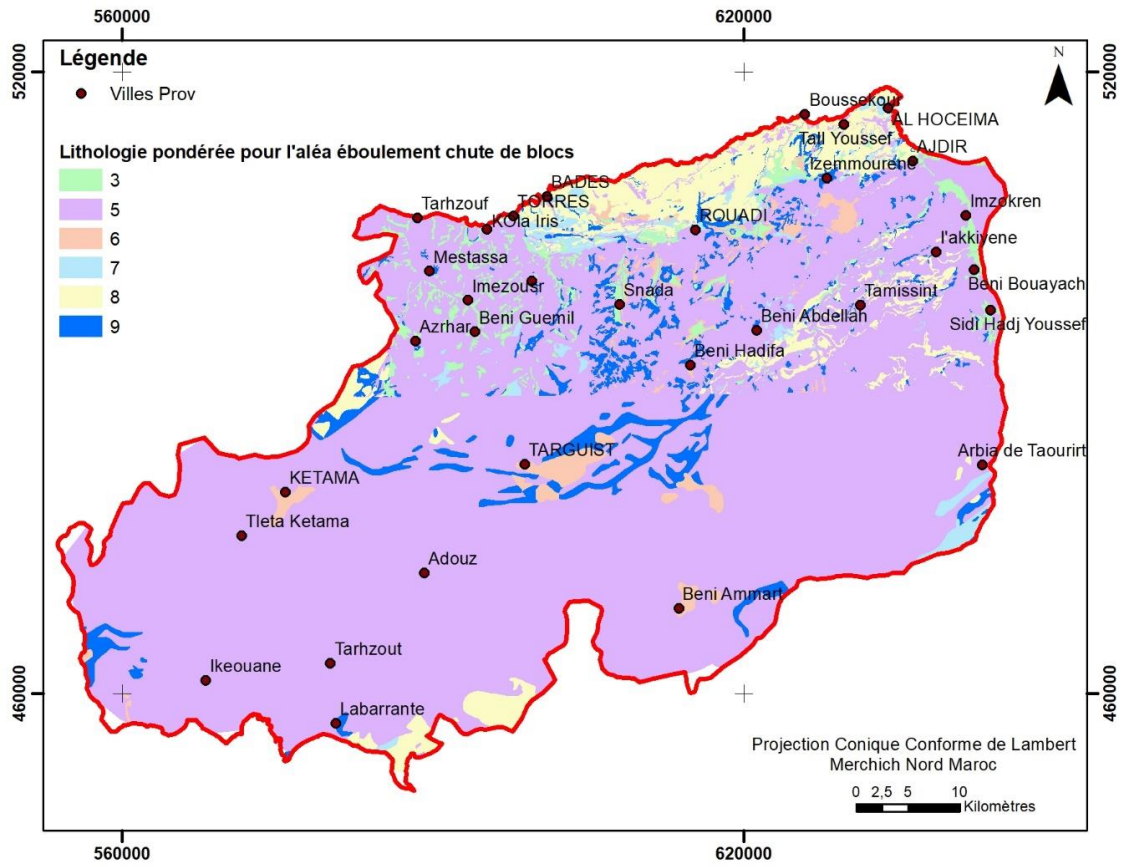


Figure 61: Lithologie pondérée pour l'aléa éboulement chute de blocs (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa éboulement chute de blocs)

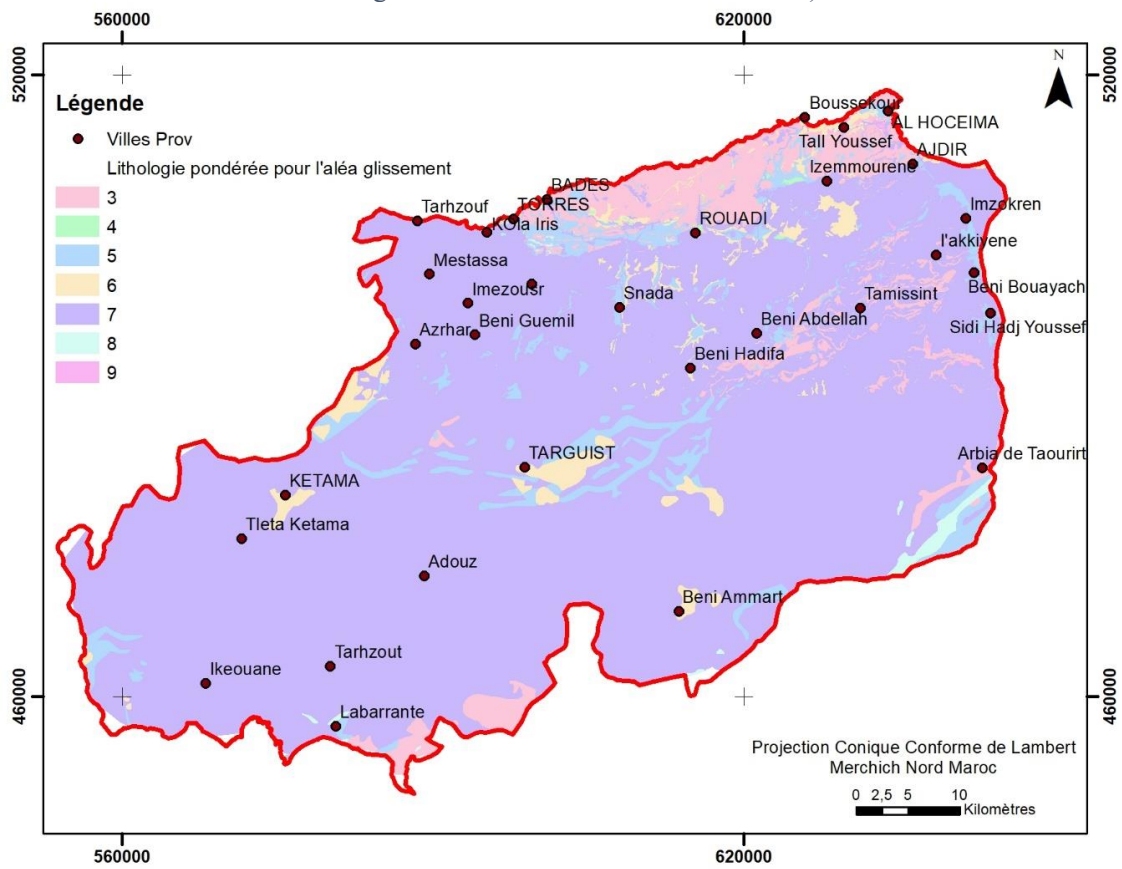


Figure 62: Lithologie pondérée pour l'aléa glissement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa glissement)

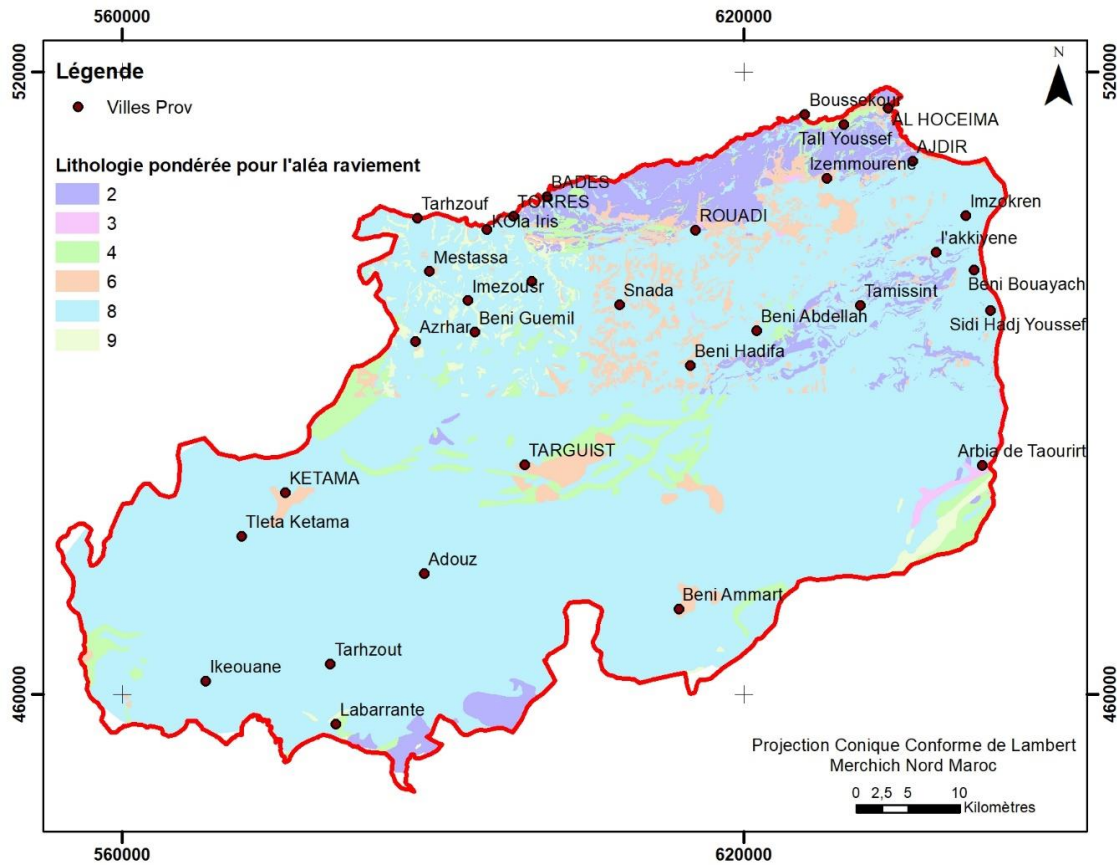


Figure 63: Lithologie pondérée pour l'aléa ravinement (Voir tableau des pondérations par type de lithologie et l'aléa ravinement)

Élévations et pentes : répartition spatiale de ces paramètres peut être approchée par l'exploitation d'un modèle numérique de terrain (MNT). Un tel modèle ainsi qu'une carte de pentes à l'échelle provinciale sont actuellement disponibles au pas de 15 m (MNT provenant des données STRM mondiales) (**Figure 64 et 65**).

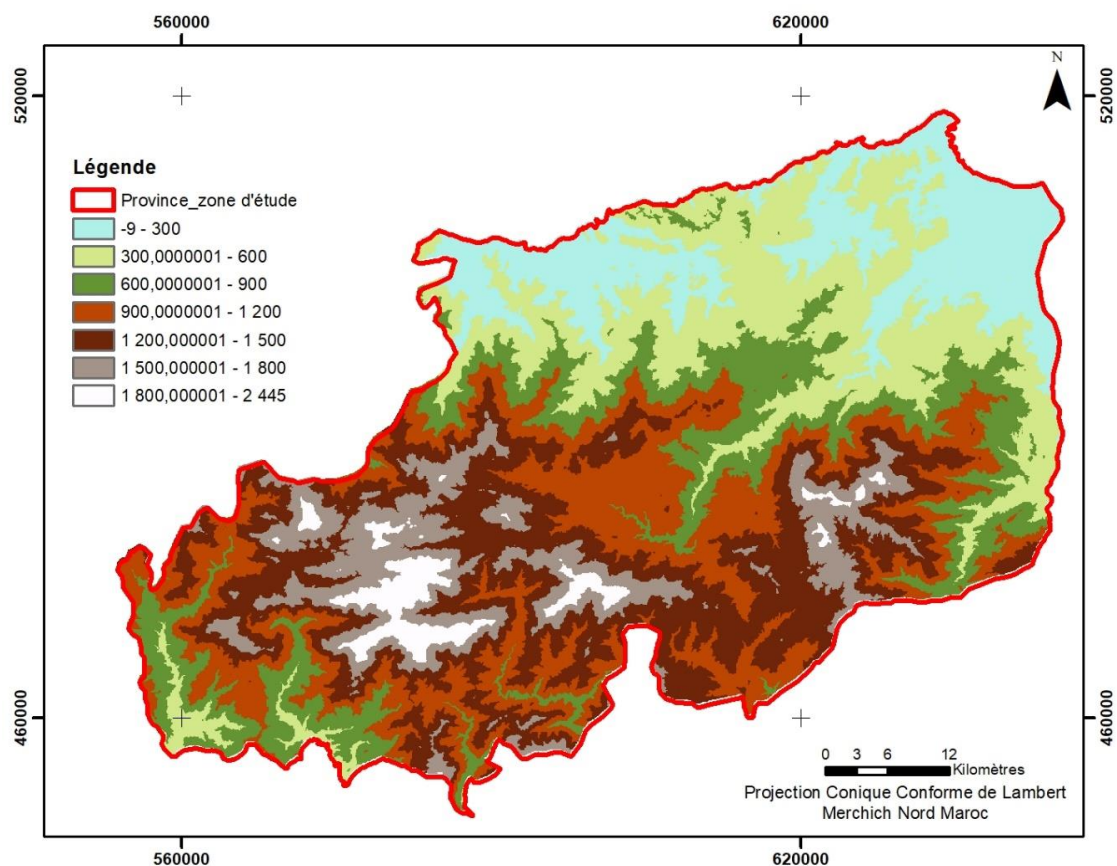


Figure 64: Carte des élévations hiérarchisées (MNT) provenant des données STRM mondiales au pas de 15m.

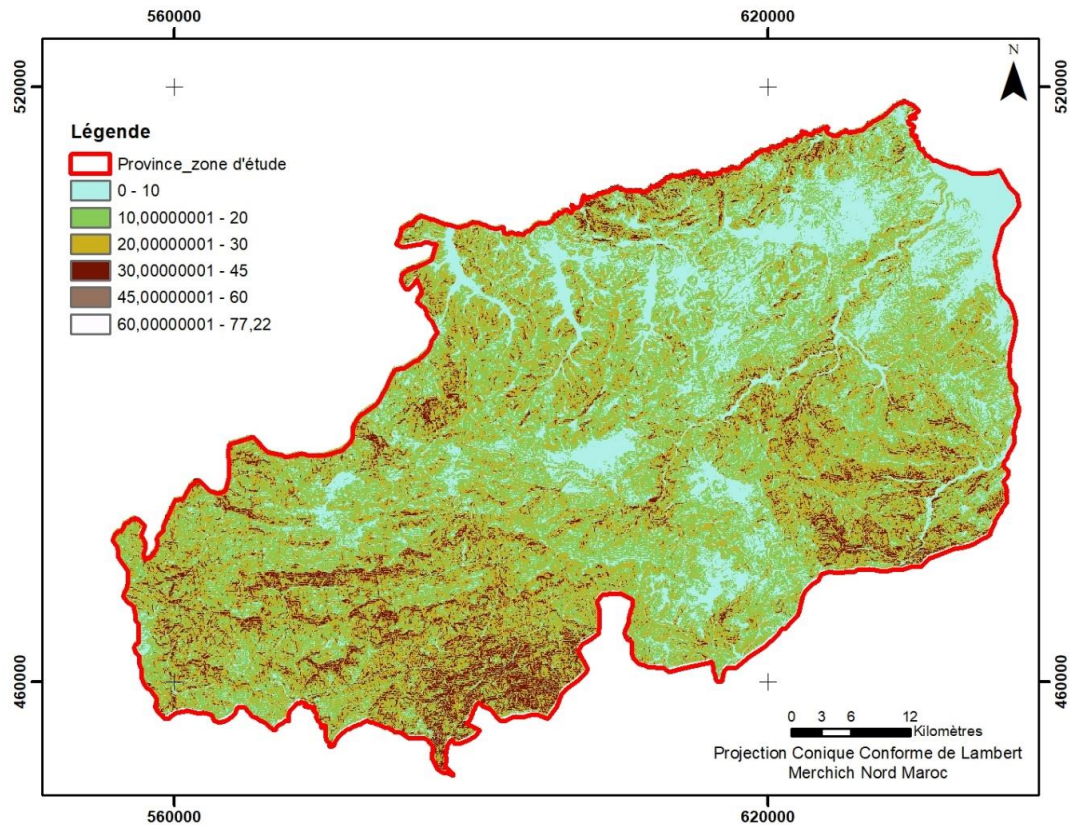


Figure 65: Carte des pentes hiérarchisées obtenue par traitement du MNT.

Fracturation : répartition spatiale de ce paramètre peut être approchée par l'exploitation des cartes géologiques couvrant la province. Malheureusement sur ces cartes l'échelle des différentes fracturations n'est pas toujours renseignée. De même, ces structures correspondent à des linéaires et sont donc saisies sous forme de poly-lignes. Pour le besoin de l'étude nous avons commencé par hiérarchiser l'ensemble des failles en deux classes selon leurs échelles (régionale : kilométrique à plurikilométrique ou locale : pluridécamétrique à pluri-hectométrique). Nous avons par la suite affecté une bande d'influence moyenne autour de ces failles par des intervalles de distance (**Figure 66**).

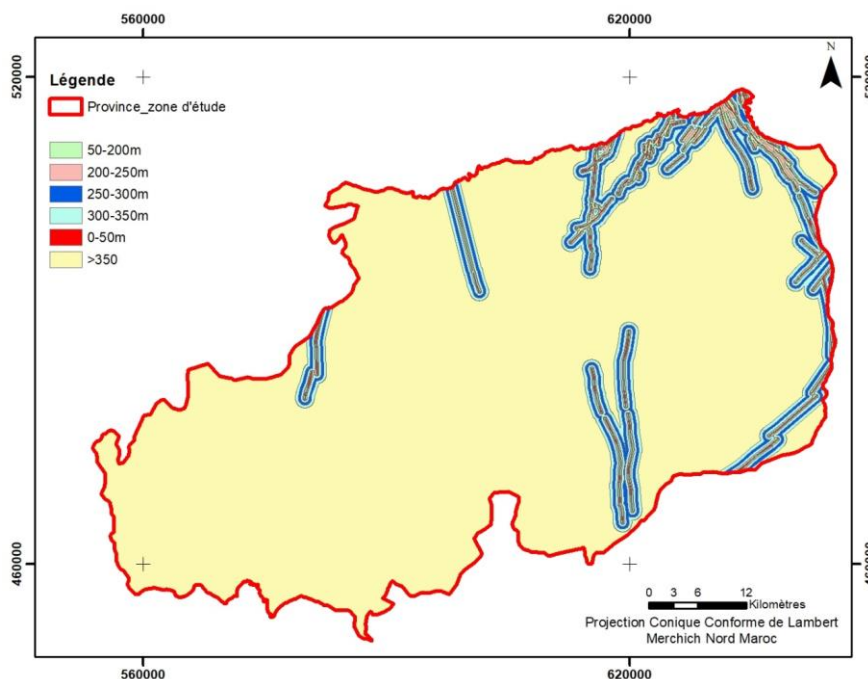


Figure 66: Carte hiérarchisée de fracturation avec les zones d'influence (exemple = zone 1 représentée en vert : influence très élevée entre 50 et 200 m de distance à partir de l'axe de faille ; zone 6 : influence négligeable représentée en jaune = pour les territoires éloignés de l'axe de faille par plus de 300 m).

Hydrologie : répartition spatiale de ce paramètre permet, à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de 15m de pas, d'établir une carte d'accumulation des eaux (**Figure 67**) et de construire de proche en proche le réseau hydrographique avec des bandes d'influence (**Figure 68**).

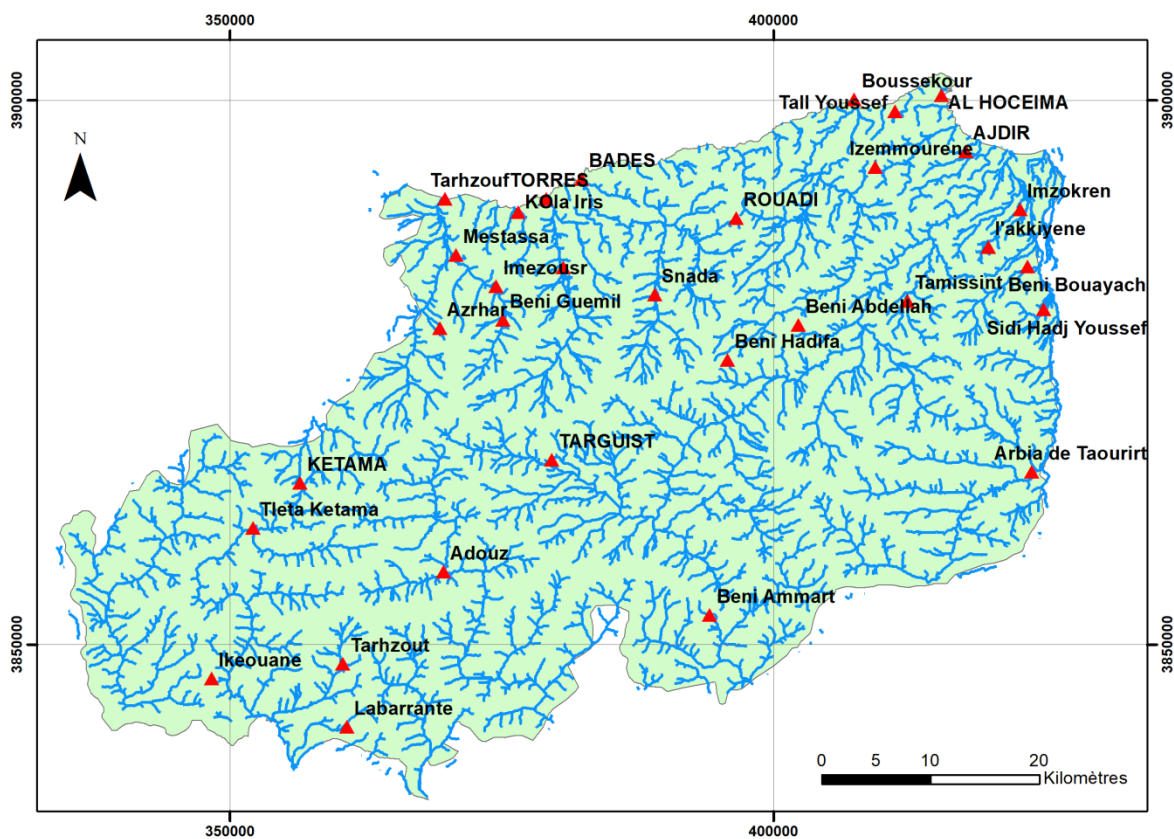


Figure 67: Carte du réseau hydrographique de la zone d'étude

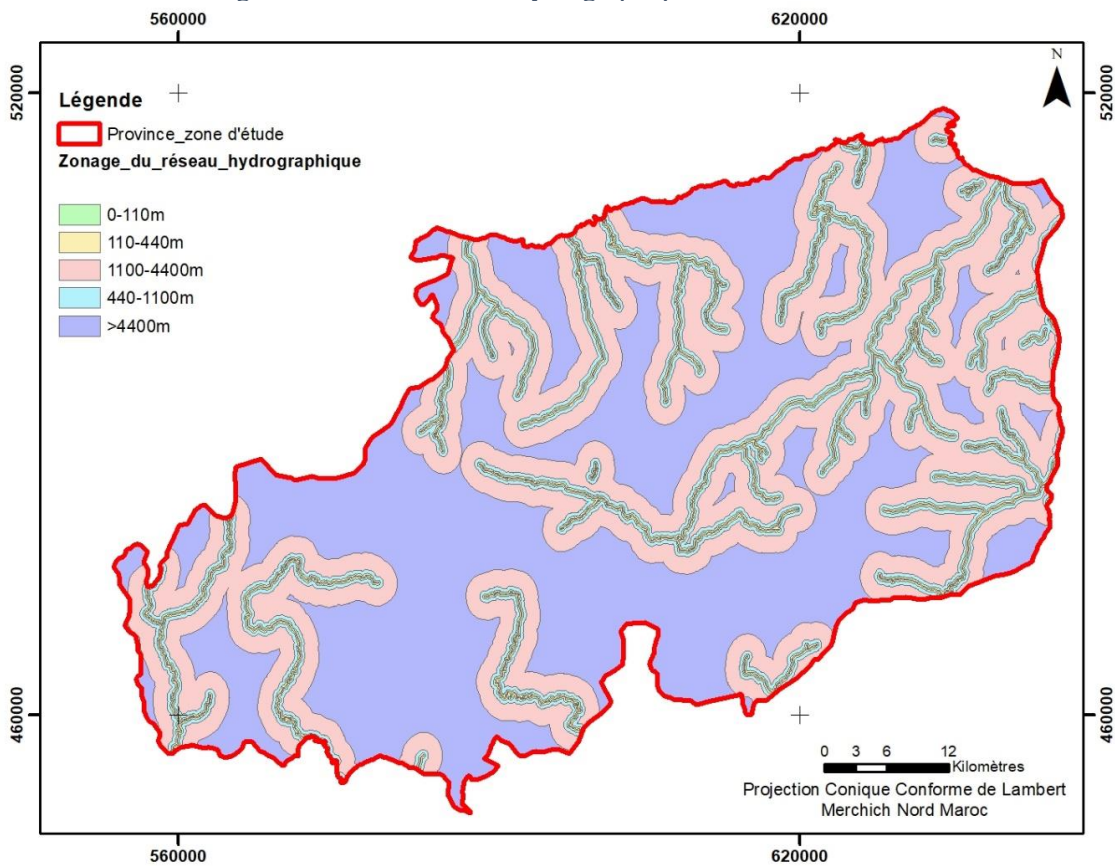


Figure 68: Carte hiérarchisée du réseau hydrographique

Exposition : Comme pour la carte des pentes, la répartition spatiale de ce paramètre a pu être approchée par l'exploitation d'un modèle numérique de terrain (**Figure 69**).

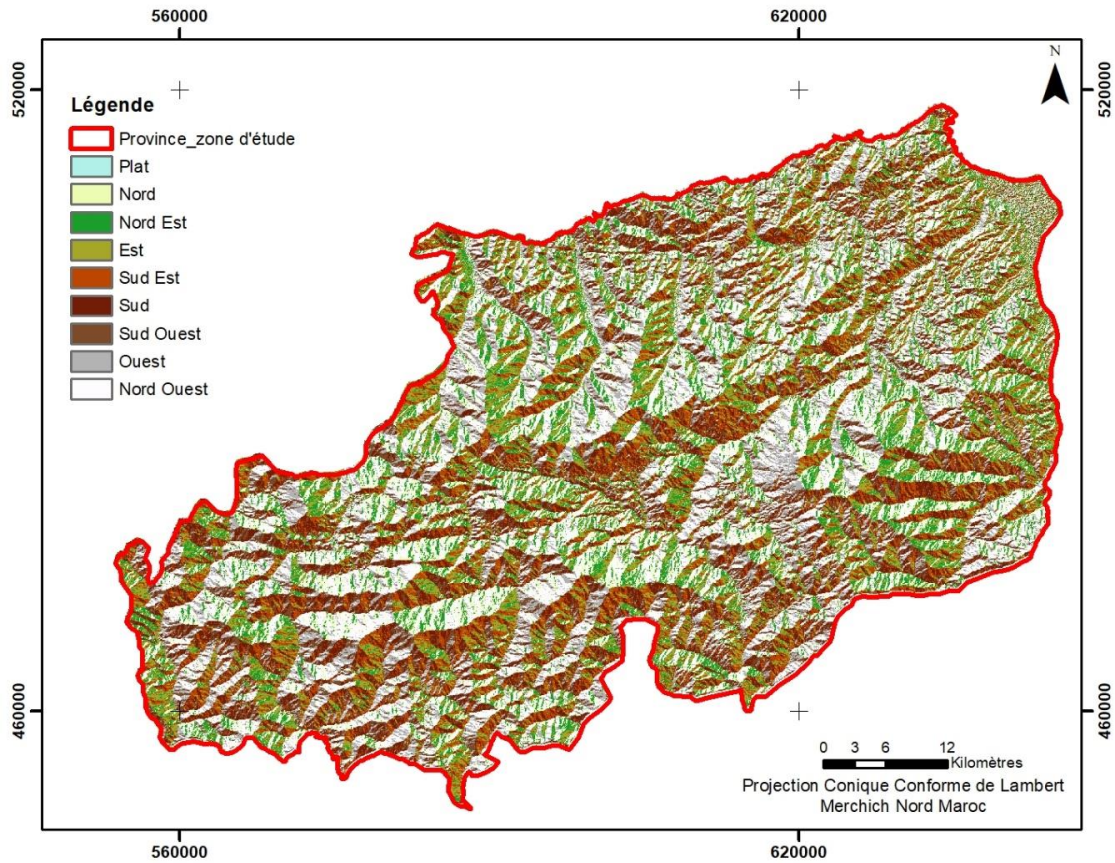


Figure 69: Carte des expositions

Occupation du sol : Couche obtenue par exploitation de la base de données OSM, traitement approprié et hiérarchisation des classes en fonction des catégories dominantes de la région (**Figure 70**).

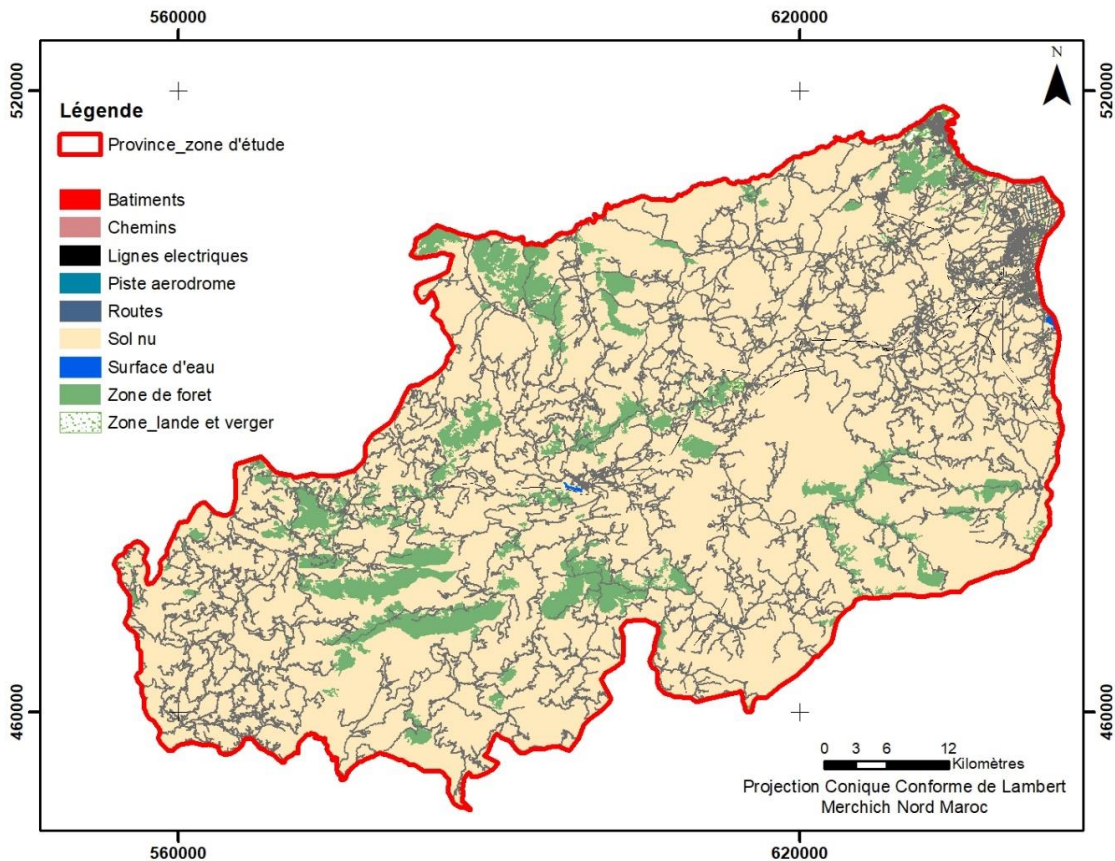


Figure 70: Carte d'occupation du sol obtenue par exploitation de la base de données OSM

Zonage géotechnique (Figure 71) : obtenu par exploitation des données géologiques de la zones (1-digitalisation des cartes géologiques couvrant le bassin d'étude à différentes échelles ; 2-passage à une interprétation simplifiée en exploitant les résultats des investigations terrain → obtention de la lithologie de surface ; 3- Caractérisation des classes géotechniques de chaque lithologie selon les caractéristiques détaillées au **tableau 10**.

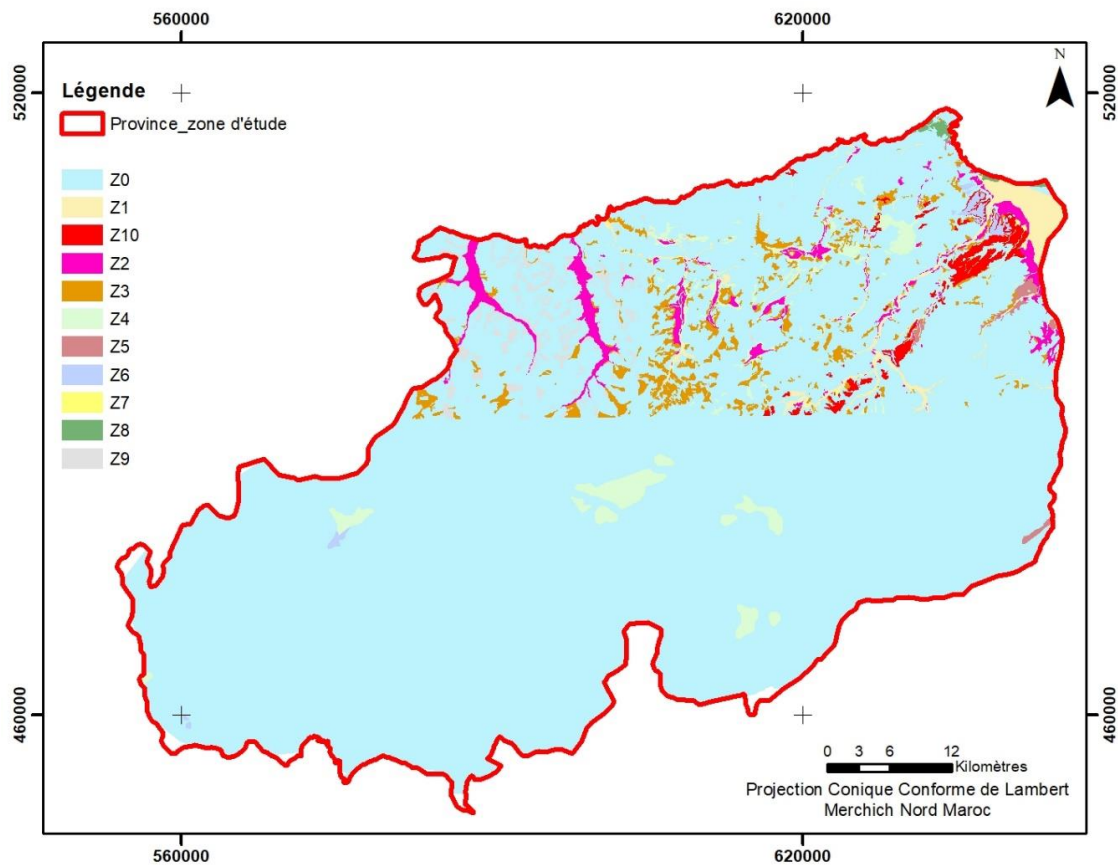


Figure 71: Carte du zonage géotechnique du sol. Voir les critères de classification des zones géotechniques au Tableau 10.

Tableau 10: Critère de classification des formations de la zone

Zone géotechniques	Critère de classification
Z0	Sols granulaires moyennement compacts (calcaire / Dolomie/Flysch/Pélites/Schistes) ; sols cohérents (argiles ou marnes durs/Argile + Gypse) ; Sols granulaires compacts (Olistostromes 2)
Z1	Sols granulaires lâches + sols cohérents : alluvions récents
Z2	Sols granulaires lâches (Limons des plaines non subdivisés) + sols cohérents mous (argiles molles ou vase)
Z3	Sols granulaires moyennement compacts (éblouis ; formations de pentes et colluvions) + Sols granulaires compacts (éblouis anciens)
Z4	Sols granulaires lâches du quaternaire indéterminé
Z5	Sols granulaires compacts du quaternaire moyen
Z6	Sols granulaires compacts du quaternaire ancien + soles granulaires lâches du quaternaire indéterminé
Z7	Sols granulaires lâches – dépôts torrentiels / cônes de déjection
Z8	Sols granulaires moyennement compacts – sables dunaires consolidés
Z9	Sols granulaires lâches – Terres rouges du quaternaires
Z10	Sols granulaires moyennement compacts : conglomérats, grès et limon des plateaux d'Oued GHISS et IMZOURENE)

2.4. Indexation des paramètres de prédisposition : Pondération des paramètres et coefficients attribués par classe

Le zonage de la susceptibilité a été réalisé en appliquant l'approche par combinaison des cartes d'index, qui est une approche heuristique indirecte et qualitative, à la base des cartes hiérarchisées des différents paramètres (au nombre de 7 dans notre cas d'étude). Le choix des pondérations se fait par un raisonnement d'expert en fonction de l'importance dans le déclenchement des instabilités de Mouvement de terrain (pour les 4 typologie étudiée : glissement, ravinement, éboulement chute de blocs, affaissement effondrement). Dans notre cas d'étude le raisonnement est appuyé par un croisement automatique entre chaque paramètre de susceptibilité et la carte des zones instable pour déterminer les classes les plus impactés par le phénomène.

Une fois les cartes hiérarchisées par les poids de chaque classe (W_{ij}) et après choix de la pondération globale du paramètre (W_j) ;

Voir annexe 1 ; déterminant les Poids attribués à chaque paramètre et classe pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements ; SC : surface de la classe en ha ; FC : fréquence de la classe ; N de TMT : nombre des zones de glissement par classe/ TMT : typologie du mouvement de terrain ; Poids relatifs de chaque classe : w_{ij} ; Poids relatif de chaque facteur : W_j).

Voir Annexe 2 : Poids attribués à chaque paramètre et classe pour la cartographie de la susceptibilité aux affaissements et effondrements ; SC : surface de la classe en ha ; FC : fréquence de la classe ; N de TMT : nombre des zones de glissement par classe/ TMT : typologie du mouvement de terrain ; Poids relatifs de chaque classe : w_{ij} ; Poids relatif de chaque facteur : W_j

Voir Annexe 3 : Poids attribués à chaque paramètre et classe pour la cartographie de la susceptibilité aux éboulements et chute de blocs ; SC : surface de la classe en ha ; FC : fréquence de la classe ; N de TMT : nombre des zones de glissement par classe/ TMT : typologie du mouvement de terrain ; Poids relatifs de chaque classe : w_{ij} ; Poids relatif de chaque facteur : W_j

Voir annexe 4 ; Poids attribués à chaque paramètre et classe pour la cartographie de la susceptibilité aux ravinements ; SC : surface de la classe en ha ; FC : fréquence de la classe ; N de TMT : nombre des zones de glissement par classe/ TMT : typologie du mouvement de terrain ; Poids relatifs de chaque classe : w_{ij} ; Poids relatif de chaque facteur : W_j

La formule suivante est calculée par sommation algébriques matricielle (pixel par pixel entre le jeu de donnée composé des 7 paramètres) :

$$CS = \sum_{j=1}^7 W_j \times W_{ij}$$

CS : Carte de susceptibilité à l'aléa (pour chaque typologie des mouvements de terrain) ;

J : les paramètres de susceptibilité (7 au total) ; W_j : la pondération de chaque paramètre (Valeur comprise être 1 et 9) ; W_{ij} : la pondération de chaque classe de paramètre (Valeur comprise être 1 et 9)

2.5. Application de l'équation sur l'ensemble de la zone d'étude

Après application de l'équation de sommations et pondérations. Il résulte de cette étape quatre cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain présentées en valeurs quantitatives ; des cartes de zonage d'aléa à petite échelle à savoir :

- Une carte de la susceptibilité aux glissements de terrain (**Figure 72**) ;
- Une carte de la susceptibilité aux éboulements/chutes de blocs (**Figure 73**) ;
- Une carte de la susceptibilité aux ravinements (**Figure 74**) ;
- Une carte de la susceptibilité aux affaissements/effondrements (**Figure 75**).

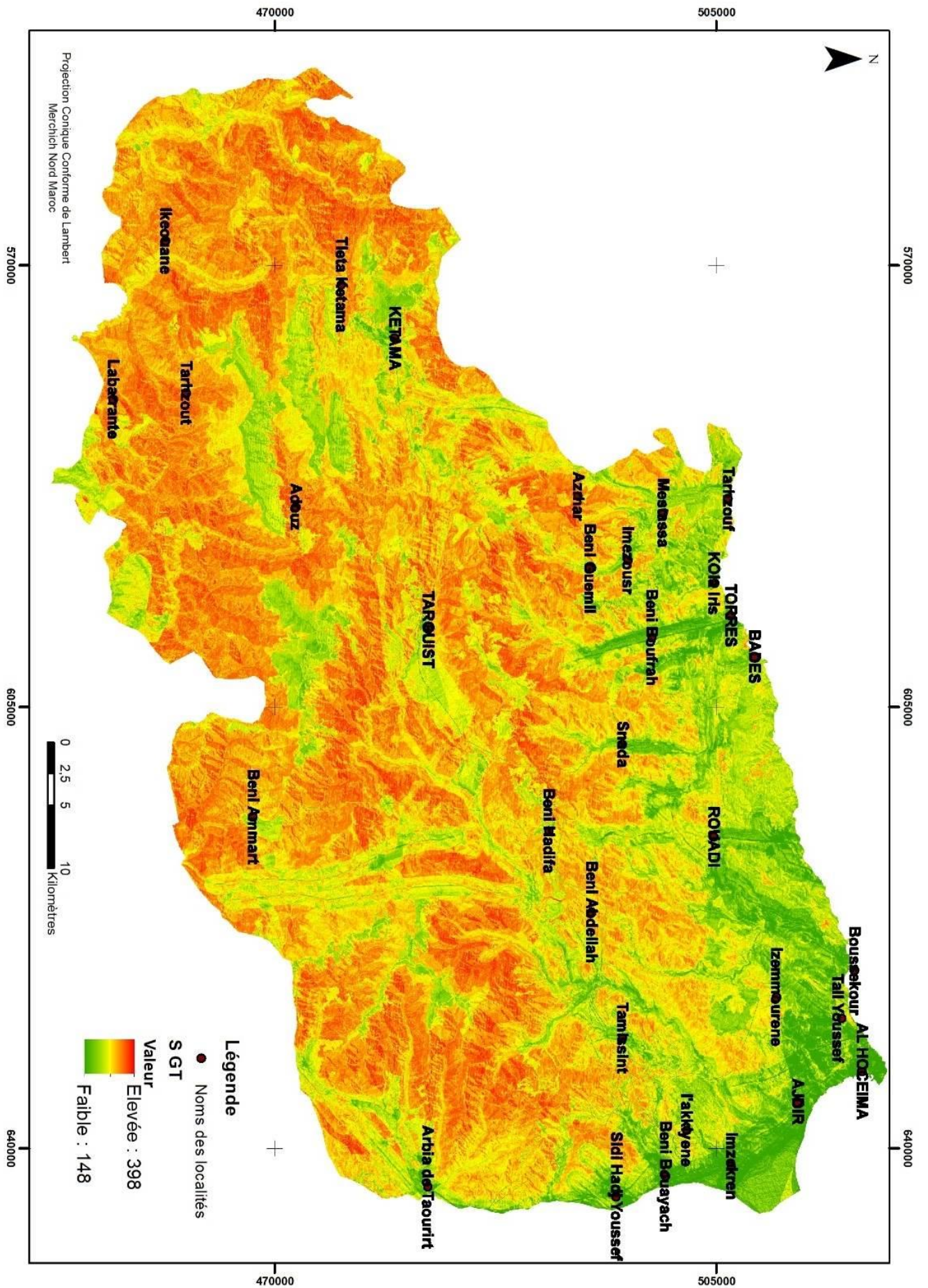


Figure 72: Carte quantitative de la susceptibilité aux glissements de terrain

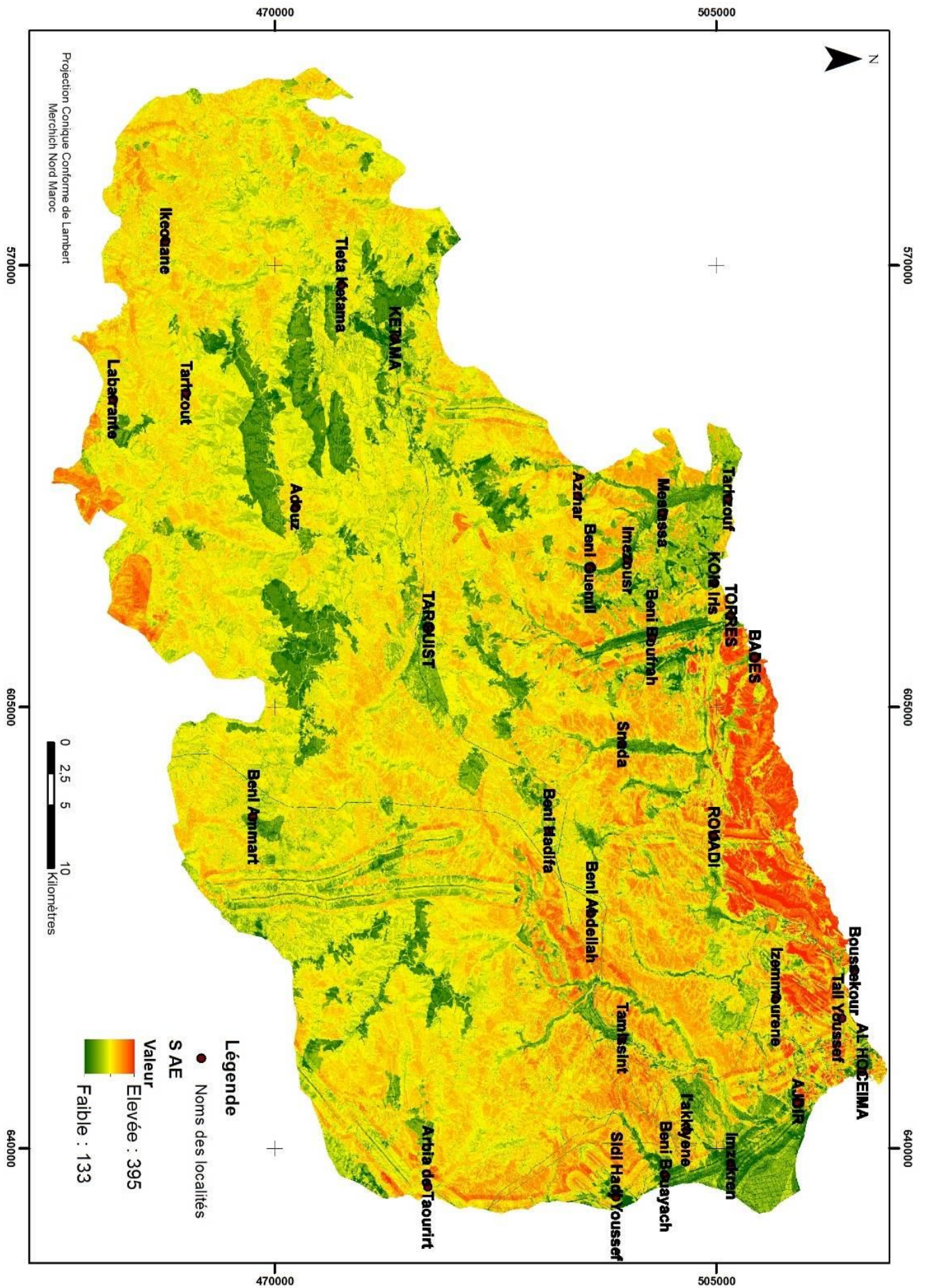


Figure 75: Carte quantitative de la susceptibilité aux affaissements effondrements

Les cartes de la susceptibilité aux mouvements de terrain doivent être présentées sous forme de classes qualitative pour une lisibilité, adaptation et généralisation cartographiques. La carte des glissements comporte des valeurs quantitatives entre 148 et 398 ; des éboulements et chute de blocs entre 121 et 407 ; des ravinements entre 135 et 411 ; des affaissements effondrements entre 133 et 395.

Cette démarche de classification nécessite une comparaison au sens statistique-empirique entre les méthodes de classification usuelles à savoir : la classification par écart type, par discontinuités naturelles, par intervalle égale et par quantile. Les quatre méthodes ont été testées en créant la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) de chaque méthode, permettant d'approcher les valeurs positives et négatives de la classification par une régression logistique, les résultats sont présentés à titre d'exemple pour la classification des glissements au **tableau 11** ci-dessous.

Tableau 11: Résultats de calcul des paramètres de la courbe ROC pour le choix entre les 4 méthodes de classification

ECART TYPE						
CLASSES	Value	Count total	Count sites	FPR	TPR	AUC
				1	1	0,021222
148-259,988	1	91659	3583	0,99451841	0,978778003	0,07093317
259,988-289,828	2	311836	15825	0,97030791	0,907453866	0,19846996
289,828-319,669	3	924108	75208	0,85524798	0,702910591	0,30633035
319,669-349,509	4	1697823	211308	0,5319701	0,344733366	0,17575365
349,509-379,350	5	1702852	331691	0,02451954	0,014350799	0,00035187
379,350-398	6	75586	16027	0	0	0
						0,77306099
SEUILS NATURELS						
				1	1	0,03215756
148-267	1	139219	5758	0,9911909	0,967842443	0,09540526
267-296	2	424921	25449	0,95225674	0,871589279	0,16062542
296-319	3	763463	63409	0,85524798	0,702910591	0,19407135
319-340	4	1062717	120956	0,67019867	0,475992369	0,19430087
340-359	5	1427505	224292	0,32705671	0,186077034	0,06085774
359-398	6	986039	213778	0	0	0
						0,7374182
QUANTILE						
				1	1	0,18382149
148-305	1	812045	49145	0,92481358	0,816178508	0,16136599
305-326	2	799965	75814	0,80882654	0,641693625	0,14485815
326-341	3	841090	97799	0,65920489	0,462596941	0,1125525
341-352	4	837384	128776	0,46219184	0,291857158	0,06976741
352-363	5	766792	140320	0,24751775	0,140908125	0,03487726
363-398	6	746588	161788	0	0	0
						0,70724281
INTERVAL EGALE						
				1	1	0,00015975
148-189,667	1	671	8	0,99998776	0,99984025	0,00343616
189,667-231,333	2	15021	760	0,99882504	0,996404048	0,03968661
231,333-273	3	172147	7245	0,987741	0,956670752	0,20709845
273-314,667	4	940233	70061	0,88055541	0,747001968	0,44167846
314,667-356,333	5	2406536	324823	0,38361213	0,245411209	0,09414272
356,333-398	6	1269256	250745	0	0	0
						0,78620215

La conformité des quatre méthodes a été comparée pour en appliquer la meilleure. Pour ce, la courbe ROC correspondant à chacune des méthodes a été réalisée, en intégrant les zones de glissements recensées (**Figure 76**) ;

La représentation graphique de la courbe définit la relation existante entre la sensibilité et la spécificité d'un test pour toutes les valeurs seuils possibles. L'ordonnée (sensibilité) présente l'occurrence des glissements de terrain et l'abscisse correspond à la quantité (spécificité) qui représente l'index de la susceptibilité obtenu en 100 subdivisions (sur un pourcentage de 100) (**Figure 75**). Au fait, l'aire sous la courbe ROC (AUC : AREA

UNDER THE CURVE) définit la qualité du modèle de classification, un modèle est correct pour des valeurs supérieures à 0,5 et proches de 1, le modèle est aléatoire si la valeur est inférieure à 0,5.

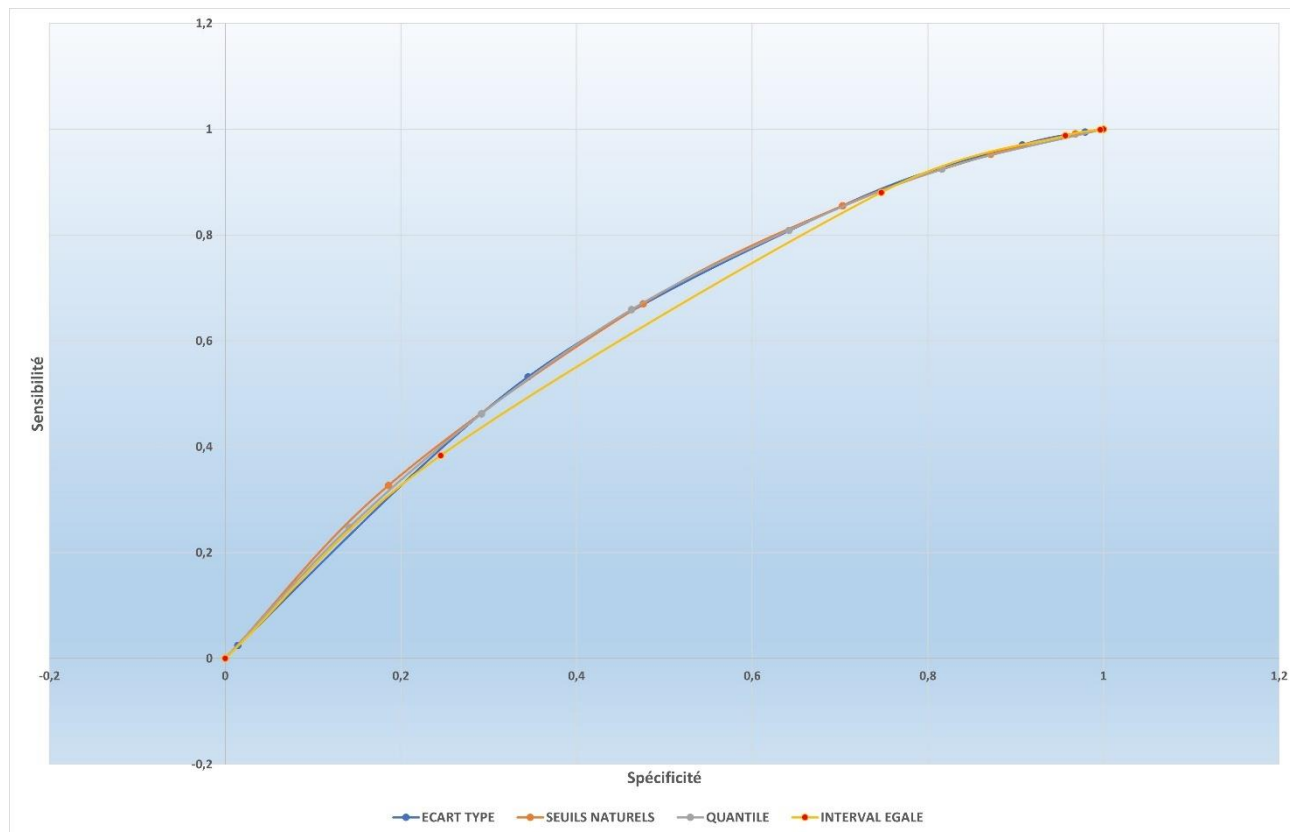


Figure 76: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux glissements.

Pour notre cas d'étude de la susceptibilité aux glissements de terrain, c'est la méthode des intervalles égaux qui a été retenue pour la classification de notre carte d'index (S GT), cela s'explique par la valeur de la sensibilité obtenue pour une spécificité de 1 de la courbe (supérieure à 0,78). La carte de susceptibilité aux glissements obtenue présente six différentes classes ou niveaux de susceptibilité (**Figure 80**). Par ordre d'importance, il s'agit de la classe de susceptibilité très forte qui occupe environ 26,42 % de la superficie globale de la zone d'étude, la classe à susceptibilité forte avec 50,10 %, la classe à susceptibilité moyenne couvrant 19,57 %, la classe à susceptibilité modérée qui occupe 3,58 %, ensuite la classe de susceptibilité faible avec 0,31 %, et enfin la classe de susceptibilité très faible qui est couverte 0,02% du secteur d'étude.

Les **figures 77, 78 et 79** représentent respectivement les courbes ROC du choix de la méthode la plus pertinente pour les cartes de susceptibilité aux éboulements chute de blocs, aux ravinements et aux affaissements effondrements.

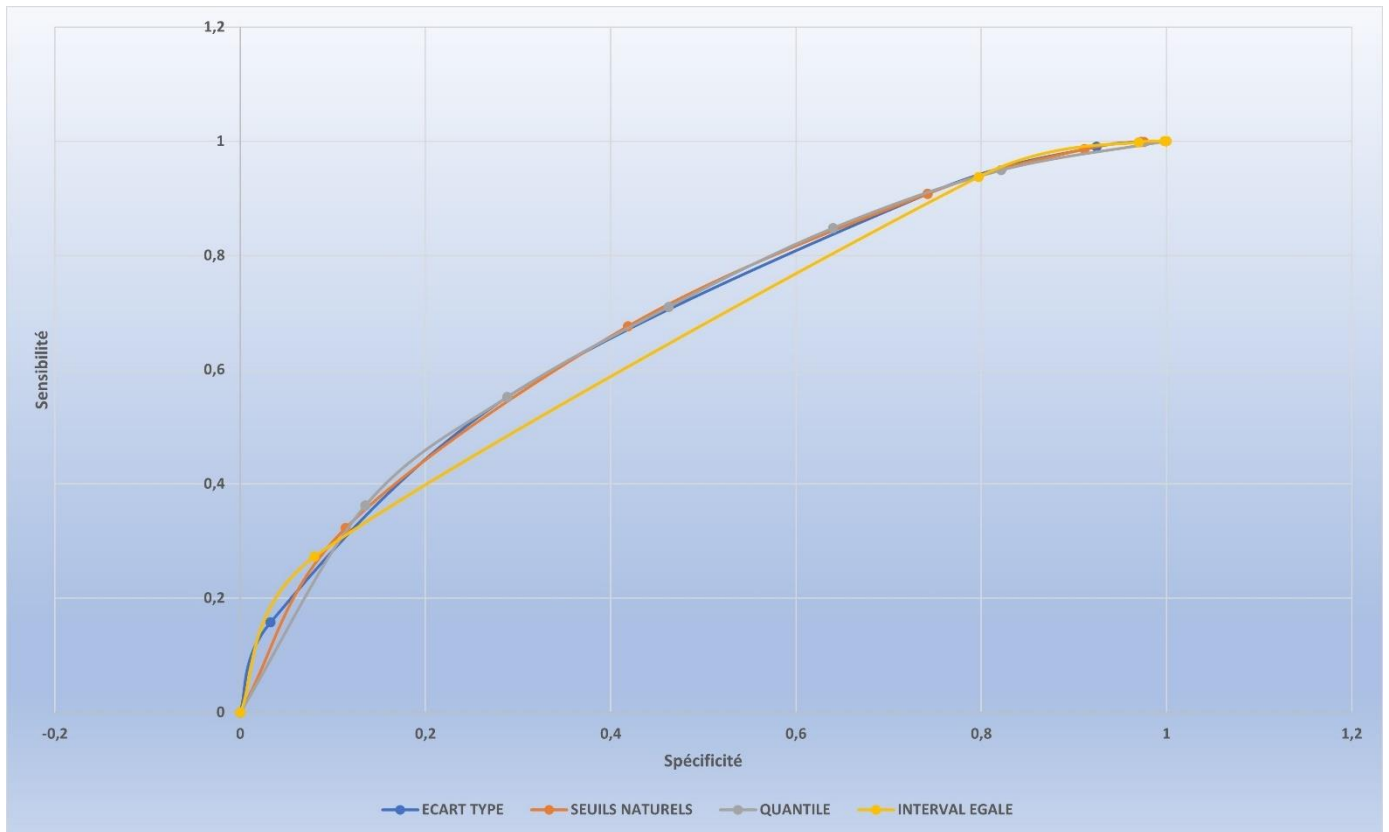


Figure 77. Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux éboulements chutes de blocs

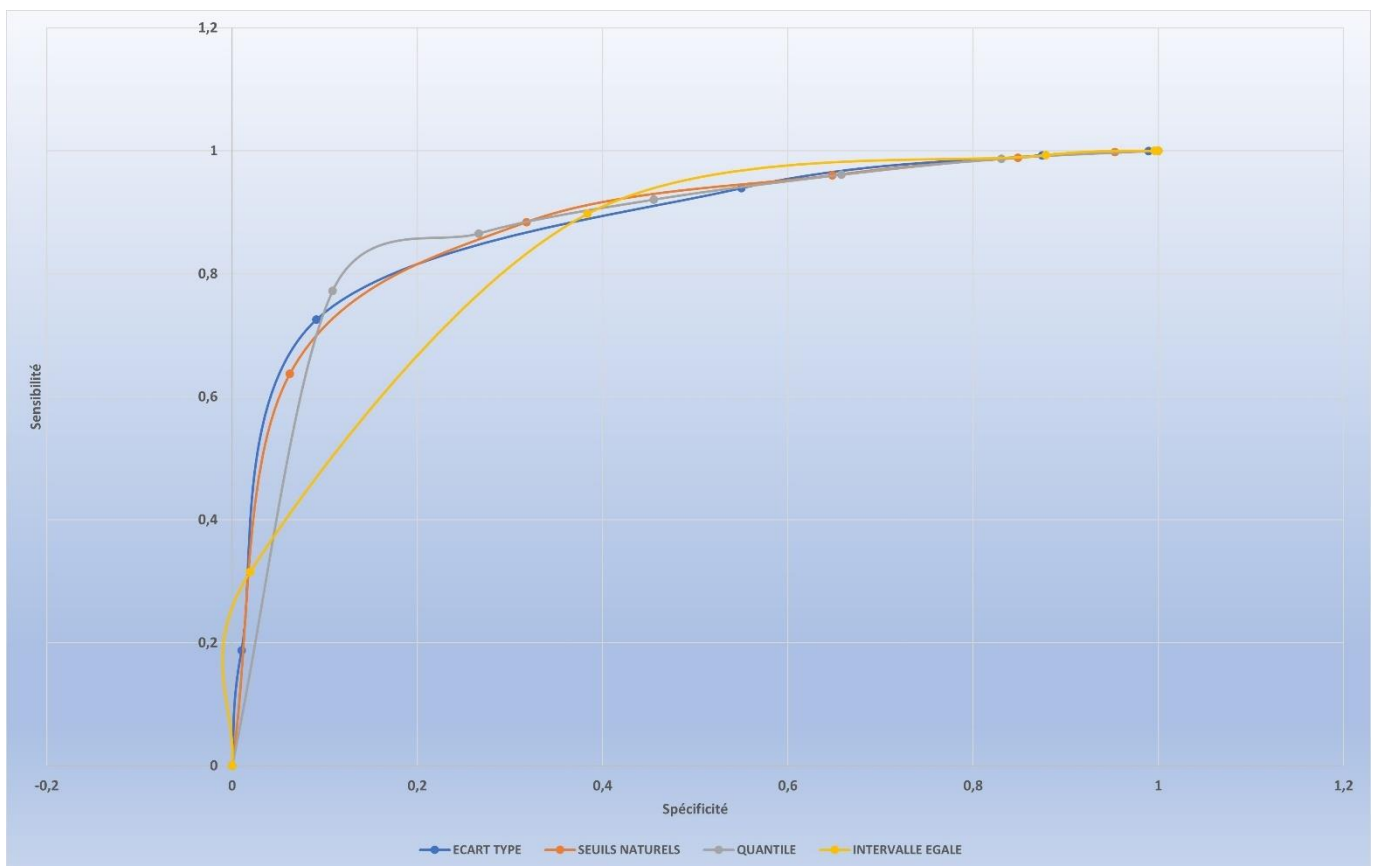


Figure 78: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux affaissements effondrements

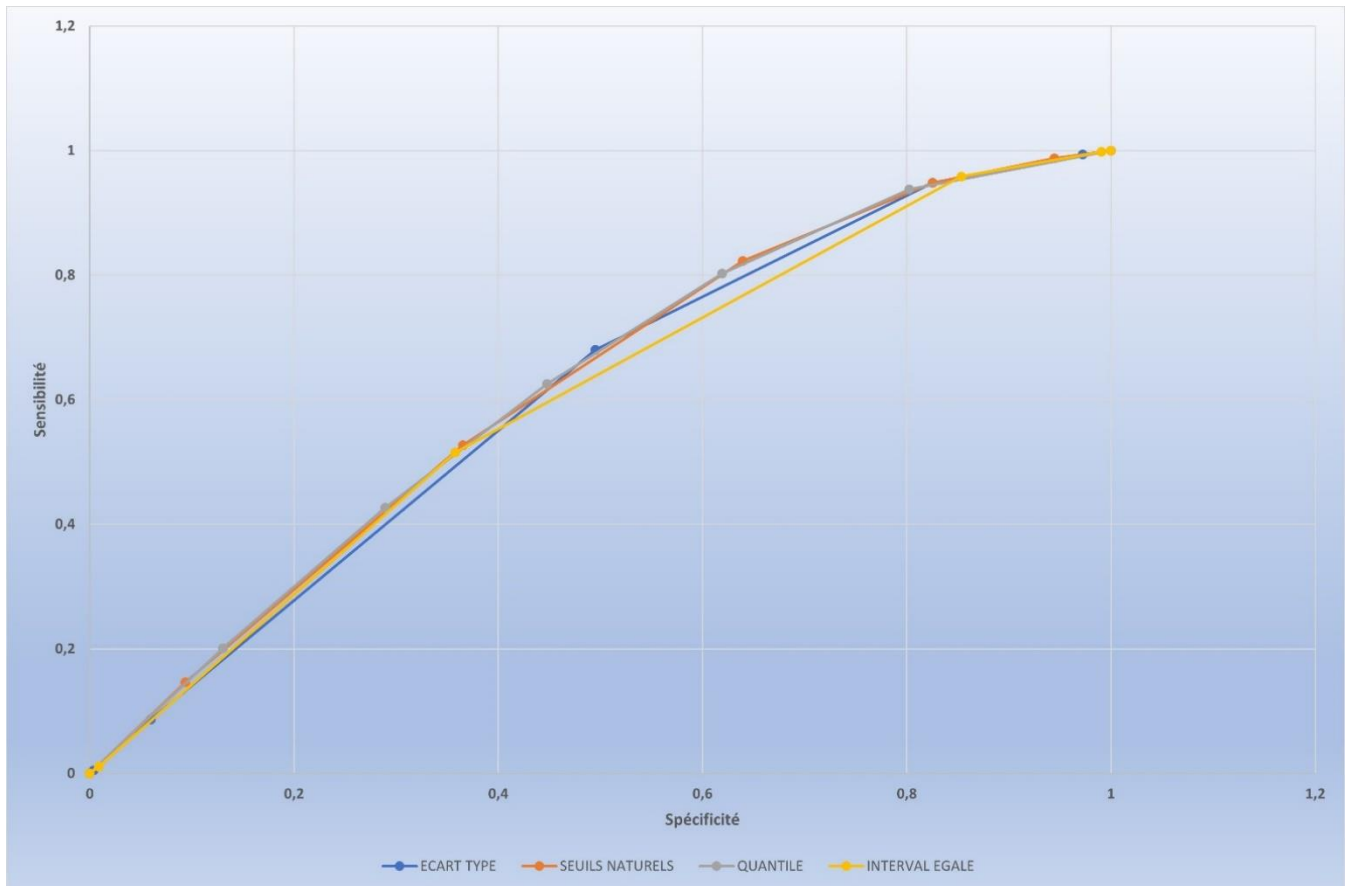


Figure 79: Courbe ROC (Receiver Operating Characteristic) pour les quatre méthodes de classification de la carte de susceptibilité aux ravinements

Concernant la cartographie de la susceptibilité aux éboulements chutes de blocs, la méthode des intervalles égaux qui a été retenue pour la classification de notre carte d'index (S ECB), cela s'explique par la valeur de la sensibilité obtenue pour une spécificité de 1 de la courbe (supérieure à 0,89). La carte de susceptibilité aux éboulements chute de blocs présente six différents niveaux de susceptibilité (**Figure 81**). Par ordre d'importance, il s'agit de la classe de susceptibilité très forte qui occupe environ 9,48 % de la superficie globale de la zone d'étude, la classe à susceptibilité forte avec 71,32 %, la classe à susceptibilité moyenne couvrant 16,41 %, la classe à susceptibilité modérée qui occupe 2,57 %, ensuite la classe de susceptibilité faible avec 0,21 %, et enfin la classe de susceptibilité très faible qui est couvert 0,01 % du secteur d'étude.

Nous avons appliqué la méthode des intervalles égaux pour classifier la carte de susceptibilité aux affaissements effondrements (S AF), cela s'explique par la valeur de la sensibilité obtenue pour une spécificité de 1 de la courbe (supérieure à 0,94). La carte de susceptibilité aux affaissements effondrements présente six différents niveaux de susceptibilité (**Figure 82**). Par ordre d'importance, il s'agit de la classe de susceptibilité très forte qui occupe environ 2,24 % de la superficie globale de la zone d'étude, la classe à susceptibilité forte avec 36,65 %, la classe à susceptibilité moyenne couvrant 49,07 %, la classe à susceptibilité modérée qui occupe 11,65 %, ensuite la classe de susceptibilité faible avec 0,37 %, et enfin la classe de susceptibilité très faible qui est couvert 0,02 % du secteur d'étude.

Pour le cas d'étude de la susceptibilité aux ravinements, c'est la méthode des intervalles égaux qui a été retenue aussi pour la classification, cela s'explique par la valeur de la sensibilité obtenue pour une spécificité de 1 de la courbe (supérieure à 0,80). La carte de susceptibilité aux ravinements présente six différentes classes ou niveaux de susceptibilité (**Figure 83**). Par ordre d'importance, il s'agit de la classe de susceptibilité très forte qui occupe environ 0,93 % de la superficie globale de la zone d'étude, la classe à susceptibilité forte avec 38,13 %, la classe à susceptibilité moyenne couvrant 48,47 %, la classe à susceptibilité modérée qui occupe 11,68 %, ensuite la classe de susceptibilité faible avec 0,77 %, et enfin la classe de susceptibilité très faible qui est couvert 0,02 % du secteur d'étude.

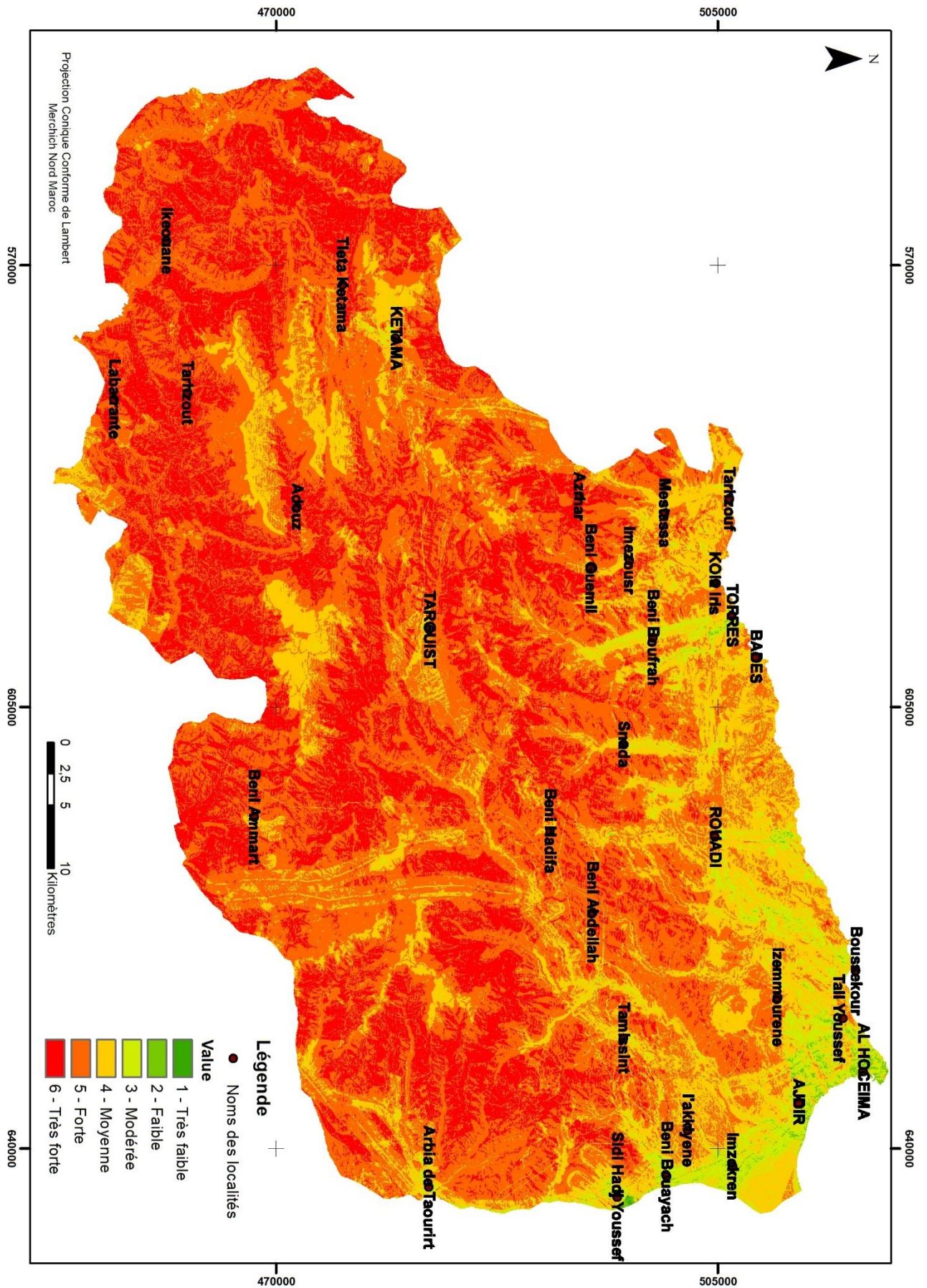


Figure 80: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux glissements de terrain à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA

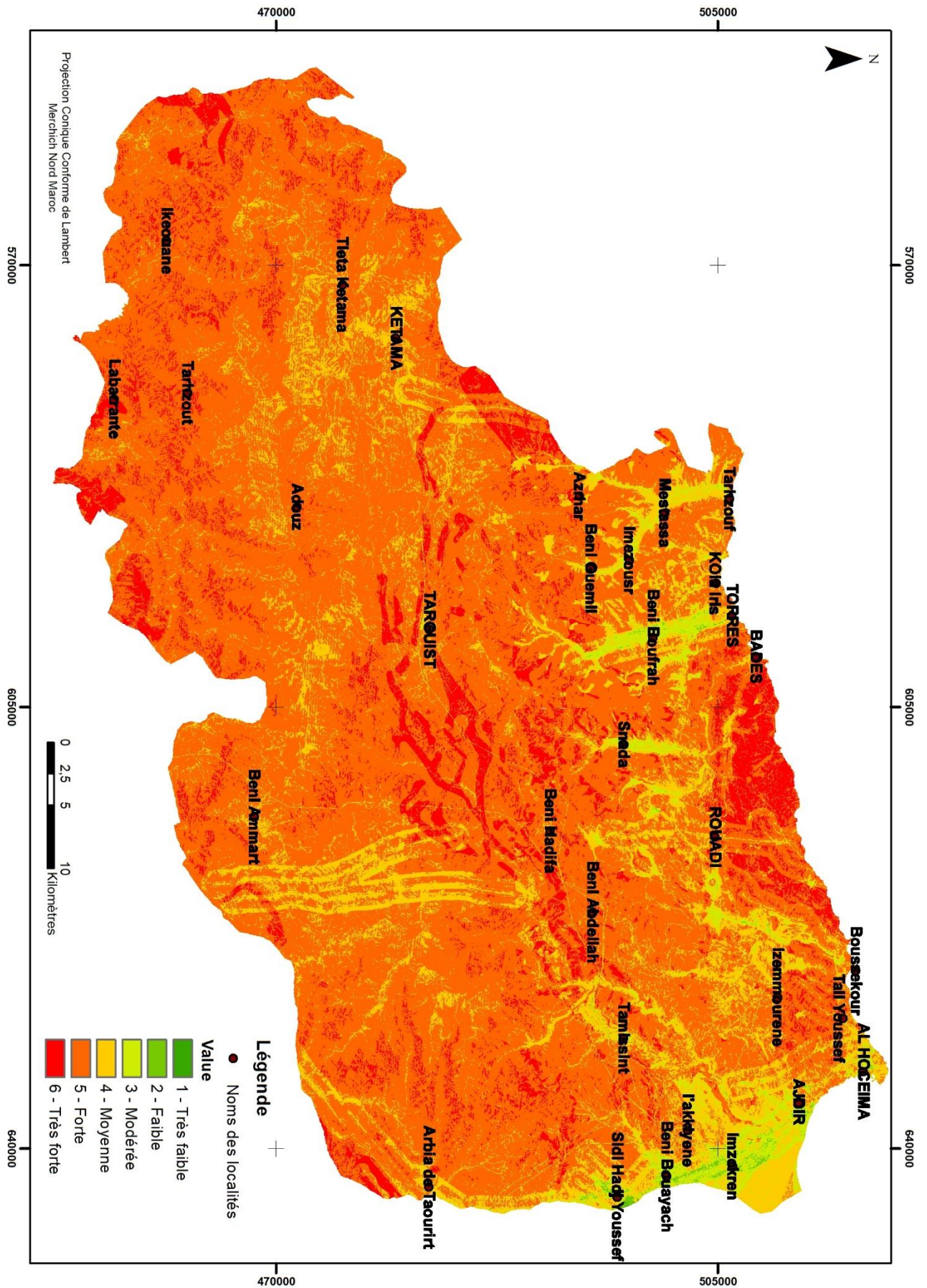


Figure 81: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux éboulements chute de blocs à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA

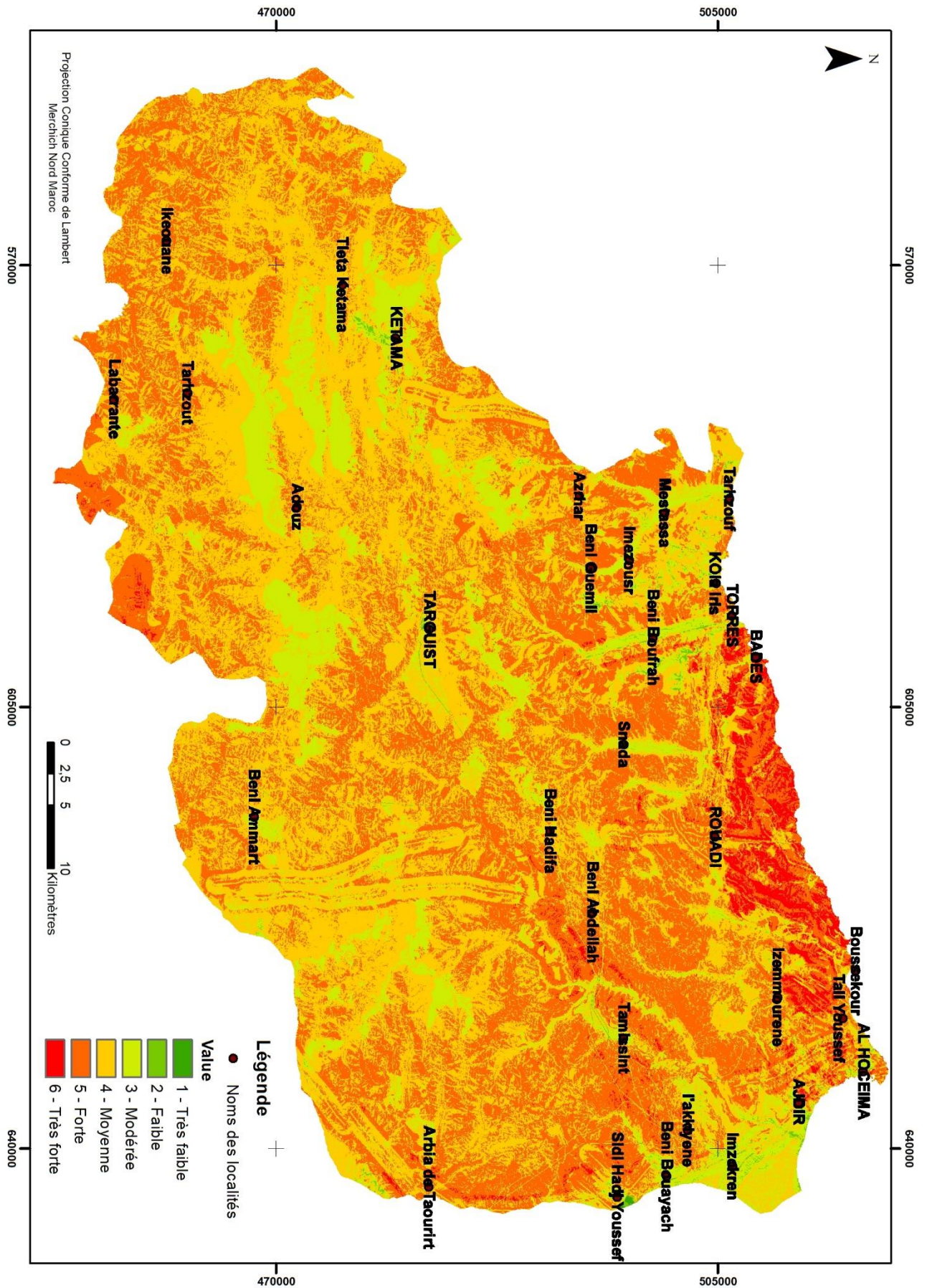


Figure 82: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux affaissements effondrements à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA

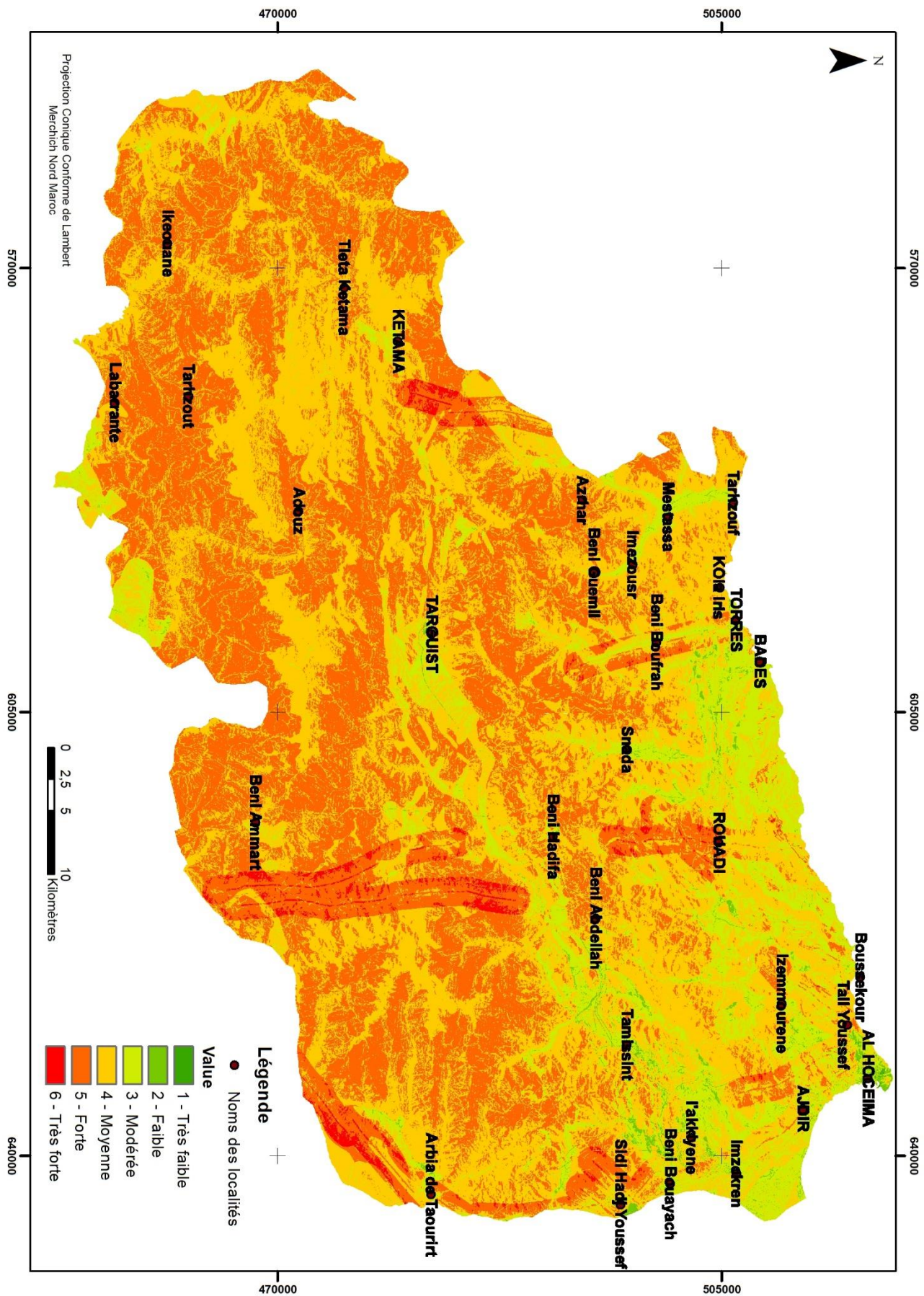


Figure 83: Carte qualitative/classifiée de la susceptibilité aux ravinelements à l'échelle de la province d'AL HOCEIMA

VI. Conclusion

Le présent chapitre propose une démarche adaptée à l'étude des mouvements de terrain à petite échelle, par utilisation de la méthode heuristique analytique hiérarchisée, combinant les cartes hiérarchisées de chaque facteur sous forme d'index. Pour ce faire, huit paramètres intervenant dans la genèse des 4 typologie de MT (glissements, éboulement chute de blocs, affaissements effondrement et ravinements), ont été intégrés, à savoir : la lithologie, la fracturation, le réseau hydrographique, la pente, l'exposition de la pente, l'élévation, l'occupation du sol et le zonage géotechnique. L'intégration des paramètres exige une hiérarchisation et pondération préalable, justifiée par le jugement expert et le croisement avec la carte des zones d'investigation sur les aléas existants au niveau de la zone d'étude.

Après application de la sommation sur les cartes pondérées de chaque paramètre, nous pouvons classier les cartes de susceptibilités quantitatives (S GT, S ECB, S AE et S R) pour les présenter sous forme de niveaux d'aléa. Pour ce faire, le choix de l'une des méthodes de classification est nécessaire, notre étude a permis d'adopter celle des intervalles égales, ayant donné les valeurs AUC les plus significatives.

Nous avons présenté les cartes finales de susceptibilité selon quatre niveaux d'aléa :

- Aléa très faible – niveau 1 ;
- Aléa faible – niveau 2 ;
- Aléa modéré – niveau 3 ;
- Aléa moyen – niveau 4 ;
- Aléa fort (ou important) – niveau 5 ;
- Aléa très fort (ou très important) – niveau 6.

Il est recommandé de grouper les niveaux d'aléa selon la possibilité de mettre en œuvre une parade technique pour s'en prémunir et l'échelle des coûts possibles pour la réalisation. Cette caractérisation nécessite une prise en considération des caractéristiques des mouvements de terrain répertoriés au niveau de chaque classe et en intégrant les caractéristiques géotechniques du sol par reconnaissance instrumentale. Cette recommandation a pour but de différencier les phénomènes majeurs des phénomènes plus secondaires.

La prise en considération des cartes de susceptibilité produite dans le cadre du présent chapitre dans la phase techniques des études d'aménagement et d'urbanisme est une nécessité. Les efforts nationaux s'ajoutent à notre intérêt scientifique pour se doter le territoire marocain des cartes de risques naturels, appelées Cartes d'Aptitudes à l'Urbanisation (CAU). Le zonage des cartes de susceptibilité, de la vulnérabilité et du risque total, complété par des mesures et recommandations techniques propres à chaque zone, permettent aux experts, et aux hommes de l'art de bien concevoir le projet d'aménagement du territoire (à différentes échelles : projet urbain, quartier/localité, commune, projet intercommunal, ...).

L'intégration des dispositions de la carte dans les documents d'urbanisme réglementaires apporte aux responsables une base technique solide pour statuer sur les projets urbanistiques et émettre l'avis définitif.

CHAPITRE II : MODELE D'EXPERTISE POUR L'ANALYSE DE LA VULNERABILITE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA VILLE D'AL HOCEIMA – A MOYENNE ECHELLE

1. Introduction

Les glissements de terrain sont considérés comme l'un des plus importants aléas naturels qui menacent plusieurs pays (Crozier, 2005 ; Zorn et al., 2007 ; Tosic et al., 2012). Ils sont responsables des pertes en vies humaines et matérielles (**Tableau 12**).

Tableau 12: Statistiques des glissements de terrain par continent entre la période 1903 - 2004

	Evènements	Morts	Blessés	Sans abri	Total	Domage (1000 USD)
Afrique	22	721	56	7 936	11 748	-
Amérique	139	20 532	4 750	186 752	4 476 441	1 317 927
Asie	220	15 754	3 464	3 742 596	1 309 796	534 229
Europe	75	16 458	743	3 125	37 668	1 705 689
Australie	15	528	52	8000	2963	2 466

Les glissements de terrain sont une expression de l'instabilité des terrains qui fait partie d'une famille d'aléas naturels, dénommée mouvements de terrain. Les instabilités de terrain se différencient par les types des matériaux en mouvements, le processus et la vitesse de déplacement (USGS, 2001). Généralement, l'inclinaison de la pente, les précipitations, les altitudes, l'activité sismique et la fragilité de la géologie, des facteurs qui favorisent le déclenchement des instabilités de terrain dans la région du Rif marocain [Talhoui et al., 2005 ; Mastere et al. 2015 ; El Hamdouni et al. (2018) ; Elmoulat et Ait Brahim (2018) ; Ait Brahim et al. (2018) ; Bousta et Ait Brahim (2018) ; Jemmah et Ait Brahim (2018) ; El Fahchouch et al. (2018) ; El Hamdouni et Ait brahim (2018) ; Elmoulat et al. (2021) ; El Hamdouni et al. (2022)].

En effet, l'étude des instabilités de terrain dans la zone d'Al Hoceima, au Rif oriental du Maroc, suscite un intérêt particulier des décideurs et les responsables de la planification et le développement de la zone (Girma et al., 2015 ; Raghuvanshi et al., 2014 ; Popescu, 2002). La présente étude apporte une contribution et s'inscrit dans ce cadre.

Les mouvements de terrain sont le résultat de facteurs intrinsèques et d'autres déclenchant. Les facteurs intrinsèques sont principalement : les paramètres géologiques (lithologie et type de sol, discontinuités de surface, etc.) et les paramètres topographiques (inclinaison de la pente, orientation, élévations, etc.). Les facteurs déclenchant sont les précipitations, l'activité sismique, l'action anthropique de construction et aménagement, etc.

Les méthodes d'évaluation de la susceptibilité développées peuvent être classifiées en trois groupes : les méthodes d'experts, les méthodes statistiques et les méthodes déterministes. Chaque approche se caractérise par des avantages et inconvénients, l'application d'une approche dépend principalement de l'échelle de travail, la précision requise et la disponibilité des données (Carrara et al., 1995).

La présente étude concerne une zone située au Nord du Maroc (**Figure 84**), elle occupe le Rif oriental du massif Bokoya (entre la longitude 35°13' N et 35°16' N et la latitude -03° 56' E et -03° 58 E, pour une superficie approximative de 27 km²). La zone d'étude est délimitée par la méditerranée du Nord et de l'Est, et par les flyschs de Tisirène du côté Ouest avec une topographie accidentée et des altitudes qui dépassent 400 m.

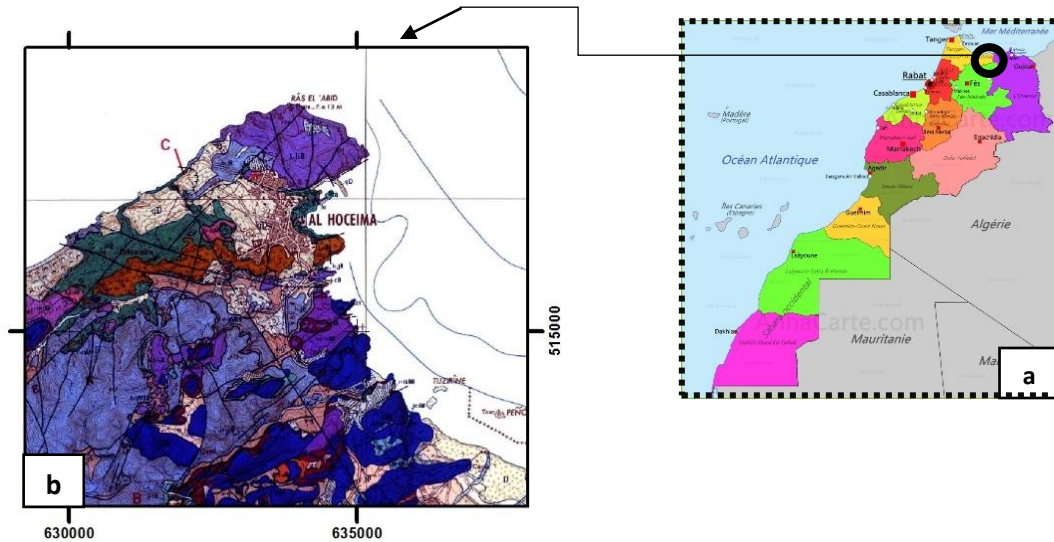


Figure 84: Situation de la zone étudiée (a: Carte du Maroc avec le découpage administratif des régions, b: localisation de la zone - carte géologique d'Al Hoceima)

2. Objectif et méthodologie générale

L'objectif principal de l'étude et l'élaboration d'une carte de susceptibilité de la zone aux mouvements de terrain. La méthodologie adoptée nécessite la cartographie des instabilités (inventaire des instabilités) et l'application de la méthode d'analyse multivariée sur les cartes des facteurs de prédisposition au mouvement de terrain et leur interaction avec la carte d'inventaire réalisée.

La mise en forme des facteurs de prédisposition à l'aléa concerne 9 paramètres : la géologie, les types de formations, la pente, les altitudes, l'exposition, l'occupation du sol, la distance des failles, la distance du réseau hydrographique et le zonage géotechnique. L'approche utilisée dans cette étude est basée sur le rapport entre les facteurs de prédisposition à l'aléa et son intensité (Figure 85).

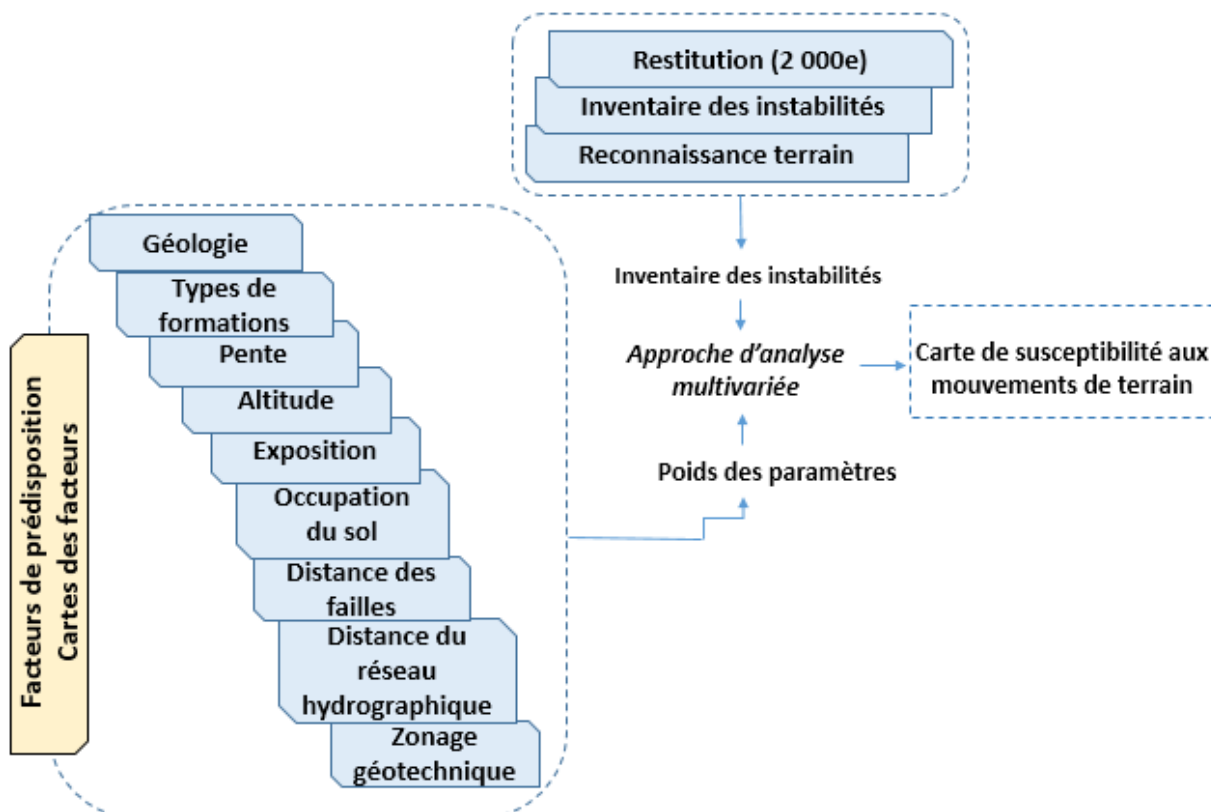


Figure 85: Méthodologie et cartes des paramètres utilisées dans le cadre de l'étude

3. Topographie et contexte géologique

La cartographie de la susceptibilité aux mouvements de masse dépend de plusieurs facteurs [Mastere et al. 2015 ; El Hamdouni et al. (2018) ; Elmoulat et Ait Brahim (2018) ; Ait Brahim et al. (2018) ; Bousta et Ait Brahim (2018) ; Jemmah et Ait Brahim (2018) ; El Fahchouch et al. (2018) ; El Hamdouni et Ait brahim (2018) ; Elmoulat et al. (2021) ; El Hamdouni et al. (2022)]. Dans le cadre de l'étude, des sources de documents et données existantes ont été couplés pour une interprétation suffisante de l'aléa.

A la base du modèle numérique de terrain de la ville d'Al Hoceima, la carte topographique de la zone exprime des dénivelées importantes, particulièrement, au Sud-Ouest et au Nord-est.

La description des formations géologiques de la zone est exprimée à partir de la carte géologique d'Al Hoceima au 50 000e, complétée par un travail de reconnaissance terrain.

4. Collecte des données et analyses

Les données requises pour l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de masse, collectées de différentes sources, regroupes les cartes topographiques, restitutions photogrammétriques, images satellitaires, cartes géologiques, modèles numériques de terrain, etc. les investigations terrain ont permis d'inventorier les anciennes instabilités de la zone et leur rapport avec les 9 facteurs de prédispositions retenus dans l'étude.

4.1. Inventaires des instabilités de la zone

L'inventaire des instabilités est préparé par la combinaison de la documentation existante sur les événements intervenus au passé (Guzzetti, 2006), l'interrogation des images aériennes et satellitaires, etc. Les techniques de cartographie des instabilités dépendent de l'étendu de la zone, l'échelle des cartes de base, la résolution des images utilisées (aériennes et satellitaires), l'expérience et la compétence du spécialiste (Ait Brahim, 2018 ; Elmoulat et al. 2021 ; El Hamdouni et al. 2022).

La caractérisation des instabilités passées, repose sur le fait que les conditions ayant déclenché les anciennes instabilités sont encore valides (Dai et al., 2002 ; Lan et al., 2004 ; Raghuvanshi et al., 2015). Ceci revient à considérer que :

- Les instabilités passées laissent des signes reconnus, par l'exploitation des cartes, données et travail terrain (Guzzetti et al., 2000) ;
- Les instabilités survenues sont repérées par des signatures morphologiques (Pike, 1988) ;

Dans le cadre de la présente étude, la carte des instabilités passées est élaborée par identification terrain, repérage par GPS et complètement à partir des images aériennes et satellitaires.

4.2. Evaluation des facteurs de prédisposition

Les facteurs de prédispositions employées sont : la géologie, les types de formations, la pente, les altitudes, l'exposition, l'occupation du sol, la distance des failles, la distance du réseau hydrographique et le zonage géotechnique.

- Lithologie simplifiée

La géologie de la zone élaborée à partir de la carte géologique d'Al Hoceima au 50000e et simplifiée par les investigations terrain (**Figure 86**). La distribution des instabilités recensées par rapport à la géologie, montre que 36.7% du phénomène survient dans les formations calcaires et les dolomies. Dans le cas du type de sol, 36.8% des instabilités concernent les roches cohérentes et rigides (**Figure 87**).

- Pente

Les instabilités rencontrées sont proportionnelles au gradient des pentes, extraites du modèle numérique de terrain (MNT) de la zone, précis au mètre près, classifié en 6 intervalles (0 – 5° ; 5 – 14° ; 14 – 25° ; 25 – 35° ; 35 – 45° ; > 45°) La **figure 88** correspond aux classes de pentes retenues. La distribution des instabilités recensées par rapport à la pente, montre que 31.06% survient dans des pentes comprises entre 14°

et 25°. Près de 21.55% survient dans les pentes entre 25° et 35°. Les instabilités concernent une grande partie des pentes entre 14° et 25° en raison des formations instables et les dépôts de pente.

- Altitudes

Les altitudes de la zone ont été subdivisé en cinq classes (0 – 82 m ; 82 –164 m ; 164 –246 m ; 246 – 328 m ; > 410 m). Les instabilités survenues comportent 47.35% dans la classe d'altitude comprise entre 82–164 m (**Figure 89**).

- Exposition

L'exposition de la zone est dérivée du MNT et comporte 9 classes : (– 1°), Nord (0 – 22.5°), Nord-Est (22.5 – 67.5°), Est (67.5 –112.5°), Sud - Est (112.5 –157.5°), Sud (157.5 –202.5°), Sud - Ouest (202.5 –247.5°), Ouest (247.5 –292.5°) and Nord - Ouest (292.5 – 337.5°) (**Figure 90**). L'étude de la distribution de la classe d'exposition par rapport aux instabilités montre que la corrélation est très limitée.

- Occupation du sol et autres facteurs

La carte d'occupation du sol et la carte des distances du réseau hydrographique ont été dérivé par restitution photogrammétrique à l'échelle 2000^e ;

La distance des failles est dérivée de la carte géologique ;

La carte du zonage géotechnique est préparée à la base des caractéristiques du sol (**Figure 91**).

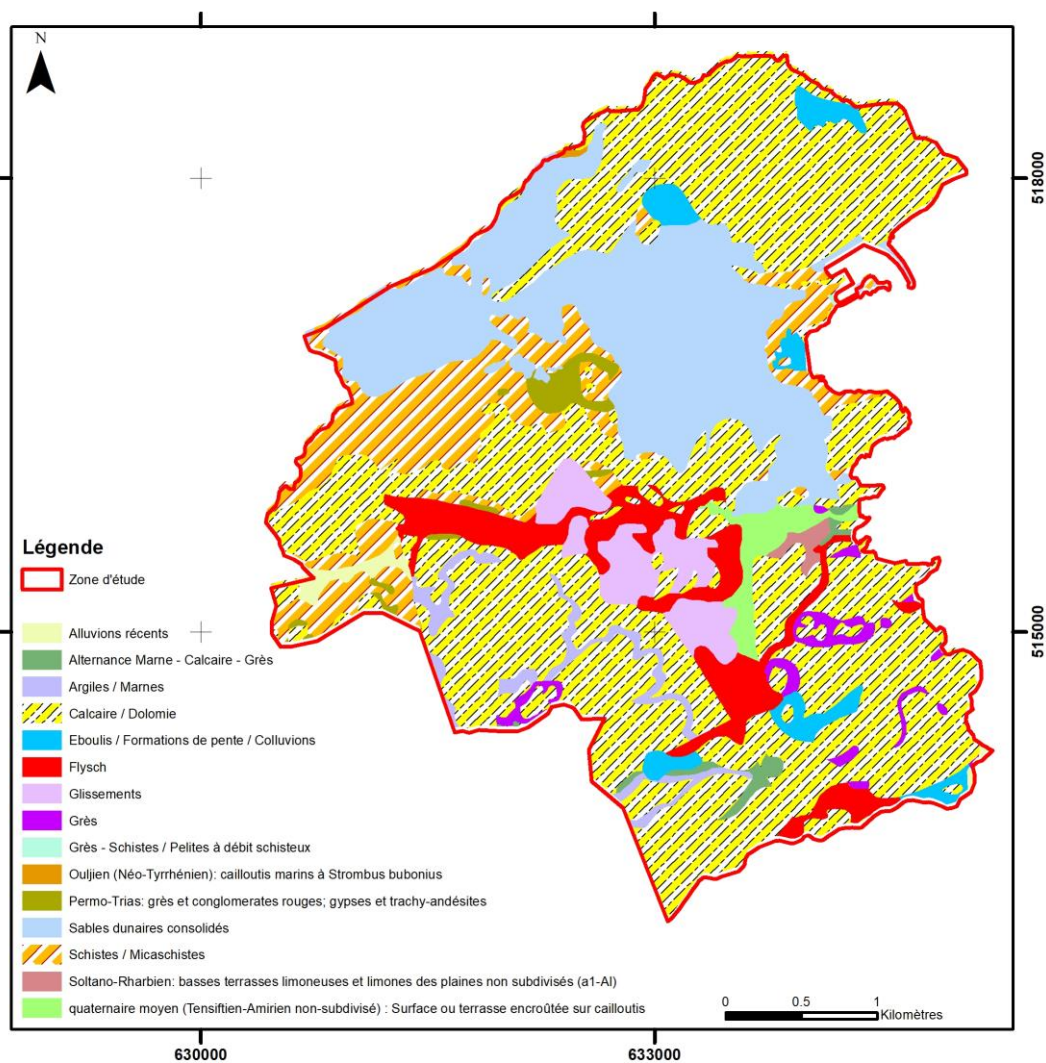


Figure 86: Lithologie simplifiée de la zone d'étude

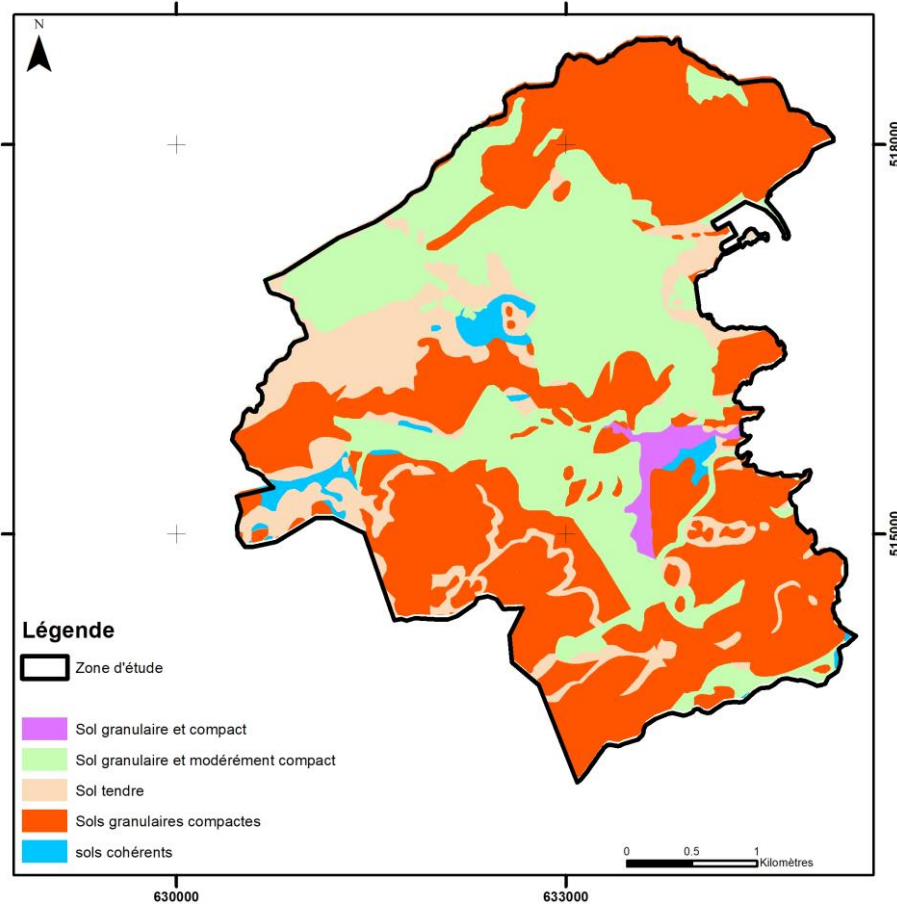


Figure 87: Caractéristiques pédologiques de la zone d'étude

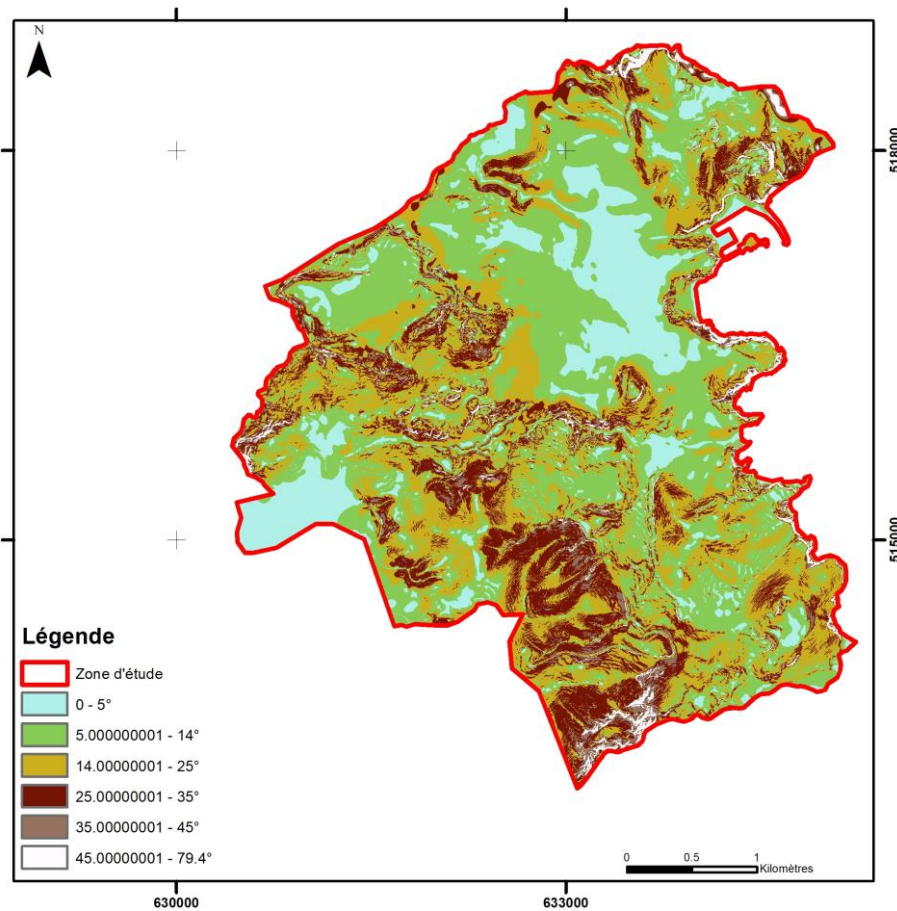


Figure 88: Carte des pentes de la zone d'étude

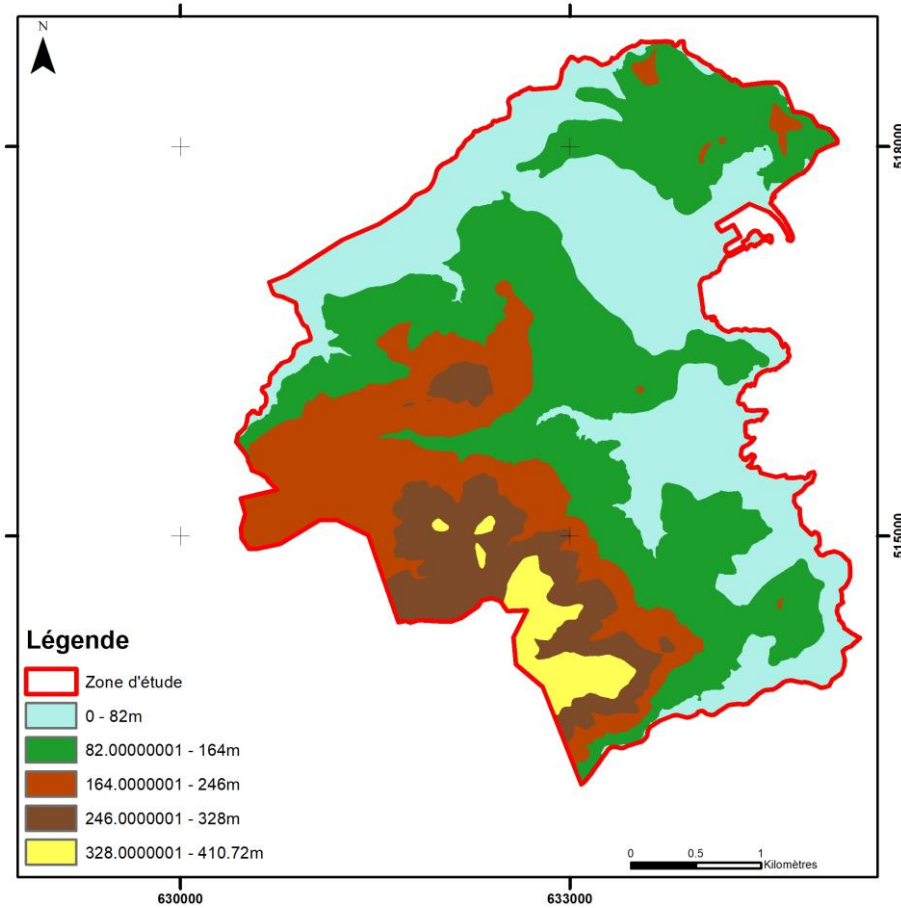


Figure 89: Carte des élévations de la zone d'étude

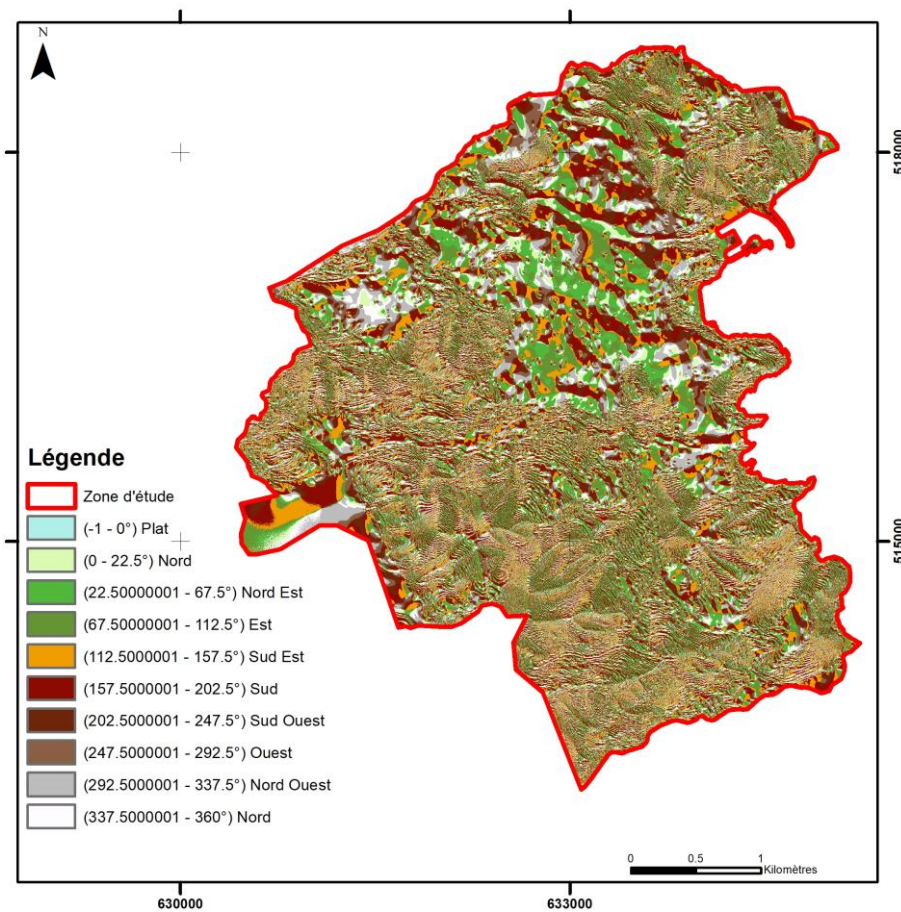


Figure 90: Carte d'exposition de la zone d'étude

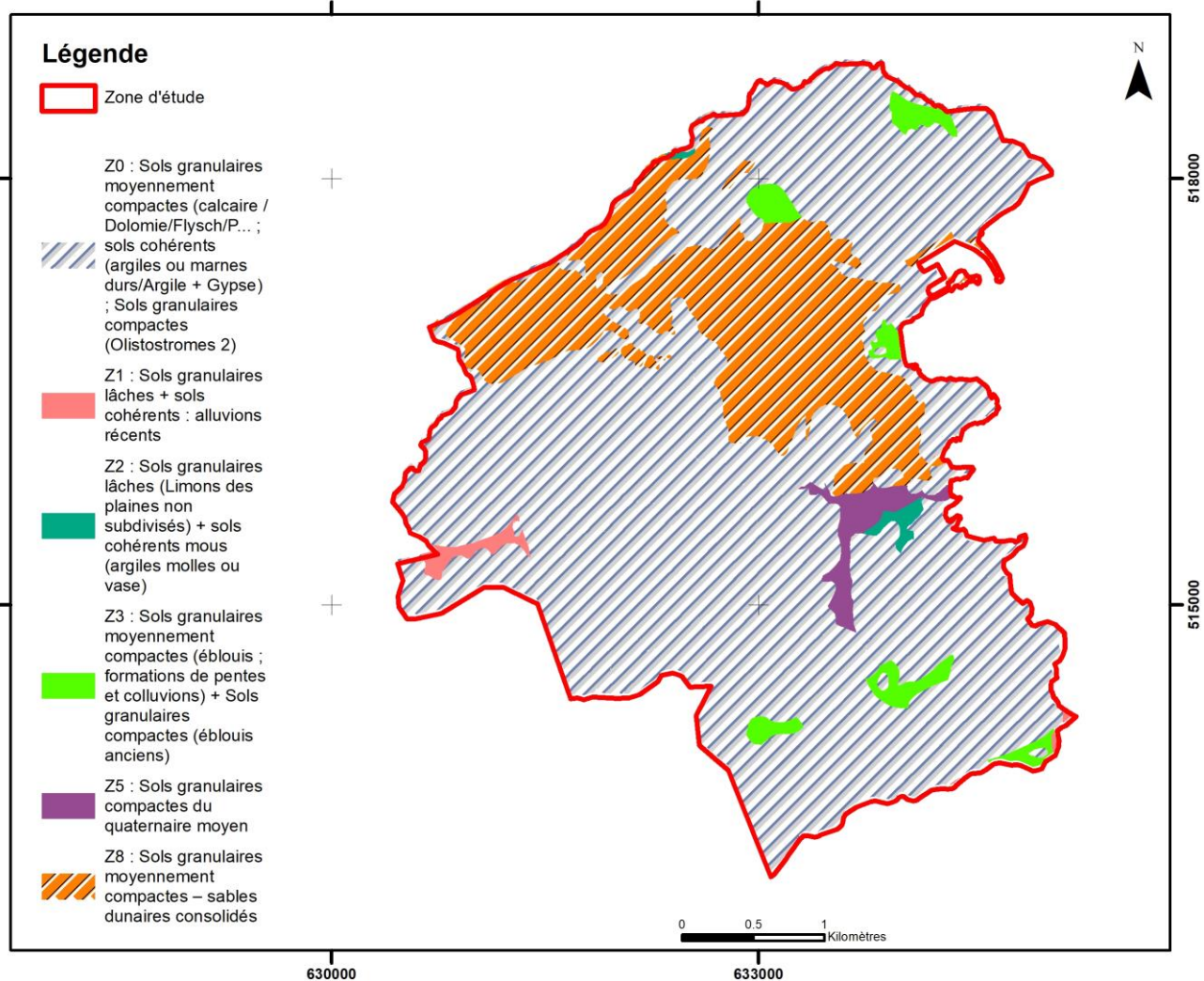


Figure 91: Carte du zonage géotechnique de la zone d'étude

4.3. Evaluation des masses en mouvement

Dans la présente étude, les facteurs de prédisposition à l'instabilité sont au nombre de 9 : la géologie, les types de formations, la pente, les altitudes, l'exposition, l'occupation du sol, la distance des failles, la distance du réseau hydrographique et le zonage géotechnique. Il est considéré que les facteurs sont responsables du déclenchement des instabilités dans la zone.

En employant l'analyse factorielle multivariée, nous pouvons établir la relation entre les instabilités déclenchées dans le passé et les facteurs causatives.

L'approche utilisée est basée sur l'évaluation des poids de chaque facteur et son effet sur le phénomène d'instabilité en :

- Organisant les facteurs causatifs en classes de valeurs ;
- Mettant en place la carte des instabilités inventoriées dans la zone ;

L'évaluation de la susceptibilité au mouvement de terrain est une simple analyse bivariée qui vise la détermination de l'importance de chaque variable causative de l'instabilité. L'influence de chaque paramètre est quantifiée, en valeur de poids, par calcul de la densité du paramètre suivant l'équation ci-dessous (Süzen et al., 2004) :

$$W_{ij} = 1000 \times \left(\frac{A_{ij}^*}{A_{ij}} \times \frac{A^*}{A} \right) \quad (2)$$

W_{ij} Est le poids de la classe i du paramètre J ;

A_{ij}^* Est la surface des instabilités inventoriées dans la classe i du paramètre j ;

A_{ij} Est la surface de la classe i du paramètre j ;

A^* Est la surface des instabilités inventoriées dans la totalité de la zone ;

Après le calcul des poids, la susceptibilité au mouvement de terrain est obtenue par l'équation suivante :

$$\text{Susceptibilité} = \sum_i \sum_{j=1}^9 W_{ij} \quad (3)$$

5. Résultats et discussion

Nous avons identifié 56 zones d'instabilités, totalisant une surface de 0.95 km² (soit 5.9% de la zone). Ils sont caractérisés par le déclenchement en cas généralement isolés, des fois en groupes, en zones de pentes et en proximité des zones d'écoulement. Les terrains constitués des flyschs et calcaires représentent le plus grand nombre d'instabilités.

Après la cartographie des instabilités, la base de données SIG et les facteurs de prédisposition sont mis en place. Les poids calculés pour chaque facteur de prédisposition sont donnés dans le **tableau 13** ci-dessous.

Tableau 13: Poids d'influence des facteurs de prédisposition calculés par la méthode d'analyse bivariée

Facteur	Classe	W_{IJ}	Facteur	Classe	W_{IJ}
<i>Occupation du sol</i>	Broussailles	7.6109	<i>Elévations</i>	0 – 82m	6.2989
	Equipement	0		82 – 164m	5.8259
	Clôture	0.0521		164 – 246m	2.3057
	Foret	0.1906		246 – 328m	0
	Jardin	0		328 – 410.7m	0
	Bâtiment résidentiel	0.1160	<i>Pente</i>	0 - 5°	1.5923
	Arbre	0.3095		5 - 14°	3.1412
	Surface d'eau	0		14 -25°	5.8124
Sol nu	6.6831	25 - 35°		7.7397	
<i>Distance du réseau hydrographique</i>	0 – 50 m	49.2266		35 – 45°	1.6765
	50 – 100 m	44.1737		45 - 79.4°	3.0284
	100 – 150 m	45.5576	<i>Type de sol</i>	Roche très cohérente	3.4143
	150 – 200 m	41.6648		Roche cohérente	1.0928
	200 – 834 m	13.4317		Sol cohérent	0.4350
	0 – 50 m	5.5192		Sol compact et granulaire	0
<i>Distance des failles</i>	50 – 100 m	6.3388		Sol moyennement compact et granulaire	4.9291
	100 – 150 m	4.4507		Sol tendre	8.4232
	150 – 200 m	3.6953	Flat	0	
	200 – 908 m	2.4244	North	3.6273	
<i>Zonage géotechnique</i>	Z0	13.1380	<i>Orientation de pente</i>	Northeast	3.7299
	Z1	1.8346		East	3.2446
	Z2	0		Southeast	3.1026
	Z3	0.7045		South	3.5365
	Z5	0		Southwest	4.0432
	Z8	0.6207		West	3.8369
				Northwest	3.3855

<i>Lithologie</i>	Argile et marne	0	Radiolarite et marne	0.5127
	Flyschs	2.8357	Allusions récents	0
	Flyschs et calcaire	0.8097	Grès	5.7190
	Gravier	0	Cailloutis marins	0

Lithologie (suite)	Calcaire et dolomie	6.5251	Schiste argileux	10.7233
	Limon	0	Schiste, grès et flyschs	20.1951
	Alluvions modernes	12.6302	Dépôts de pente	0.4426

Plusieurs études considèrent l'élévation comme facteur indirect associé à d'autres paramètres (précipitation, température, occupation du sol, etc.) contribue au déclenchement des instabilités. Dans la zone d'étude, l'élévation est comprise entre 0 et 410 mètres au-dessus de la mer. Ce facteur favorise l'instabilité dans les zones montagnardes.

La relation entre l'orientation et les anciennes instabilités a été étudié auparavant mais aucune confirmation n'est donnée (Carrara et al., 1991 ; Nagarajan et al., 1998). Egalement, aucun consentement n'est explicité sur l'influence des structures tectoniques sur l'instabilité.

L'étude a permis de ressortir les résultats suivants :

- Les plus grands poids calculés entre les différents paramètres étudiés est celui du facteur de distance du réseau hydrographique ;
- La lithologie favorable au déclenchement des instabilités de terrain correspond aux alluvions modernes, schistes, grès et flyschs ;
- Les zones géotechniques Z0 est les plus favorables ayant le poids le plus élevé ;
- Le sol moyennement compact et granulaire constitue la classe de sol ayant le poids le plus élevé dans le déclenchement du phénomène ;
- Les pentes comprises entre 25 et 35° influence considérablement l'instabilité des terrains.

Les paramètres : orientation, distances des failles, occupation de sol, correspondent aux facteurs ayant les poids les plus faibles.

Après le calcul des poids des différents paramètres/classes, la carte de susceptibilité au mouvement de terrain est créée par l'application de l'équation (2). La comparaison de la carte de susceptibilité résultante à la carte des instabilités inventoriées a permis d'établir la courbe de la **figure 92**.

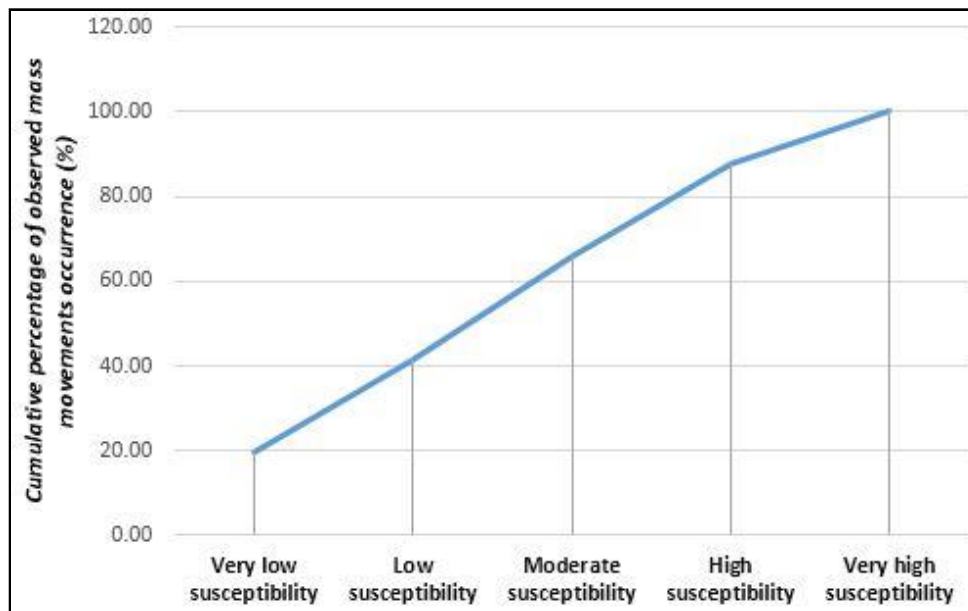


Figure 92: Valeurs cumulées des pourcentages des instabilités (inventoriées) comparées aux valeurs de classes de susceptibilité au mouvement de terrain

La classification de la carte de susceptibilité au mouvement de terrain en 5 classes d'intensité est représentée à la **figure 93**.

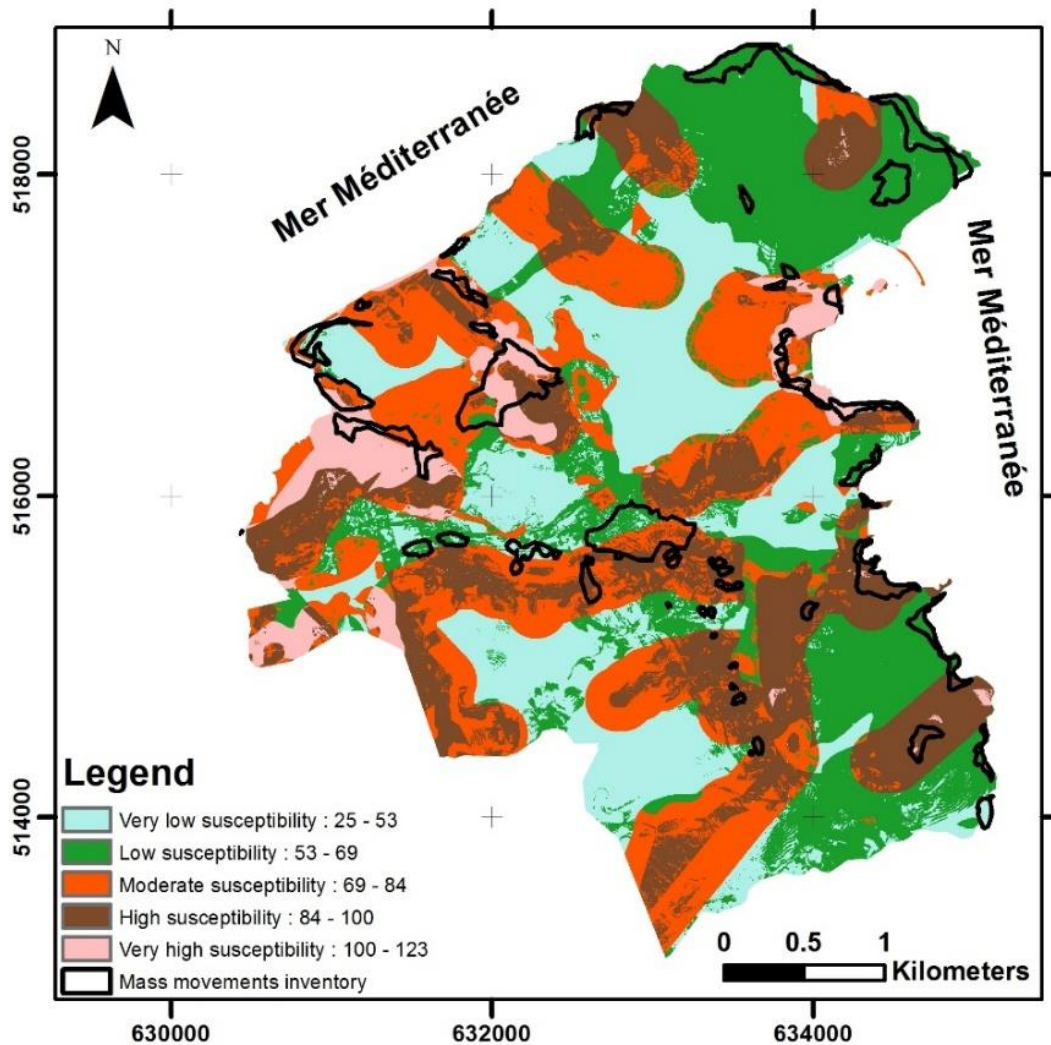


Figure 93: Carte de susceptibilité au mouvement de terrain obtenue par analyse bivariée

La carte finale produite à l'échelle 2000^e est une représentation maillée de 1 mètre de résolution. Selon les résultats retrouvés, les susceptibilités moyennes, fortes et très fortes représentent 68% de zone d'étude. Les surfaces de chaque classe sont résumées dans le **tableau 14** ci-dessous.

Tableau 14: Classes de susceptibilité au mouvement de terrain

Classes de susceptibilité	Valeurs extrêmes	Surface (km ²)	Pourcentage de surface
Très faibles susceptibilité	25 to 53	2.41	15
Faible susceptibilité	53 to 69	2.63	17
Susceptibilité moyenne	69 to 84	2.54	16
Susceptibilité forte	84 to 100	2.31	14
Susceptibilité très forte	100 to 123	6.03	38

La validation de la carte de susceptibilité est faite par comparaison terrain et par croisement avec les zones d'instabilité inventoriées précédemment (Remondo et al., 2003 ; Guzzetti, 2006 ; Zorn et al., 2007). Pour l'évaluation de la carte obtenue, on considère la prédiction bonne si les zones d'instabilités sont situées majoritairement dans les classes de susceptibilité moyenne, forte et très forte. Cette considération est vérifiée pour notre cas d'étude avec un pourcentage de 60.7% des zones d'instabilité (**Tableau 15**).

Tableau 15: Synthèse des résultats de la prédiction de susceptibilité

Nombre des instabilités observées				Surface d'instabilité correspondante			
Bons		Mauvais		Bonne		Mauvaise	
Nombre	%	Nombre	%	Km ²	%	Km ²	%
45	80.4	11	19.6	0.56	60.7	0.36	39.3

Pour évaluer la vulnérabilité des enjeux exposés aux mouvements de terrain à l'échelle de la zone, la méthodologie utilisée considère deux catégories d'index urbains : physiques et socioéconomiques (**Figure 94**). La vulnérabilité socioéconomique concerne les facteurs sociaux et économiques de la zone (Carreno et al., 2007). Dans la présente étude, la démarche développée par Safeland (Safeland, 2012) a été utilisée en intégrant des adaptations pour se conformer aux conditions de la ville d'Al Hoceima.

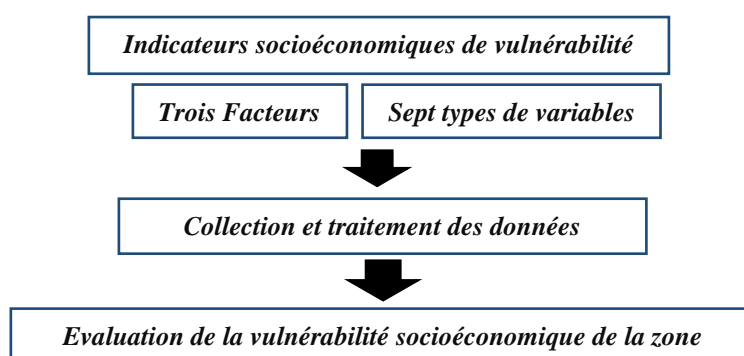


Figure 94: Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité socioéconomique de la zone

Le modèle proposé et adapté permet d'évaluer les facteurs démographiques, économiques et la préparation aux désastres. Les variables retenues sont : la densité de population, type d'habitat, nombre d'employés exposés, etc. (**Tableau 16**). La préparation des variables repose sur un travail d'enquête et des résultats de recensement et sondages. La carte de vulnérabilité socioéconomique de la zone est présentée par la **figure 95**.

Tableau 16 : Variables retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité socioéconomique et ordre d'importance des classes

Facteurs de la vulnérabilité socioéconomique		Ordre d'importance des classes		Poids
		Ordre	Description	
Facteur démographique et social DSI (Demographic and Social Index) (33.33%)	Nombre d'employés exposés	1	= < 5	0
		2	> 5	1/9
	Densité de population	1	Densité faible	1/27
		2	Densité moyenne	2/27
		3	Densité forte	1/9
	Type d'habitat	1	Appartements et maisons	1/9
2		Bâtiment d'équipement et autre	1/18	
Facteur de déclenchement secondaire STI (secondary-damage-triggering index) (33.33%)	Présence d'équipement public	1	Oui	1/15
		2	Non	0
	Réseau de voirie	1	Très bien développé	1/15
		2	Bien développé	2/45
		3	Peu développé	1/45
	Réseau d'électricité et télécommunication	1	Bien développé	1/15
2		Peu développé	1/30	
PRI (preparation and response index) (33.33%)	Sécurité perçue, nombre de médecins, financement, etc.	Le poids attribué est égal à 1/6 en raison de l'étendu restreint de la zone étudié		

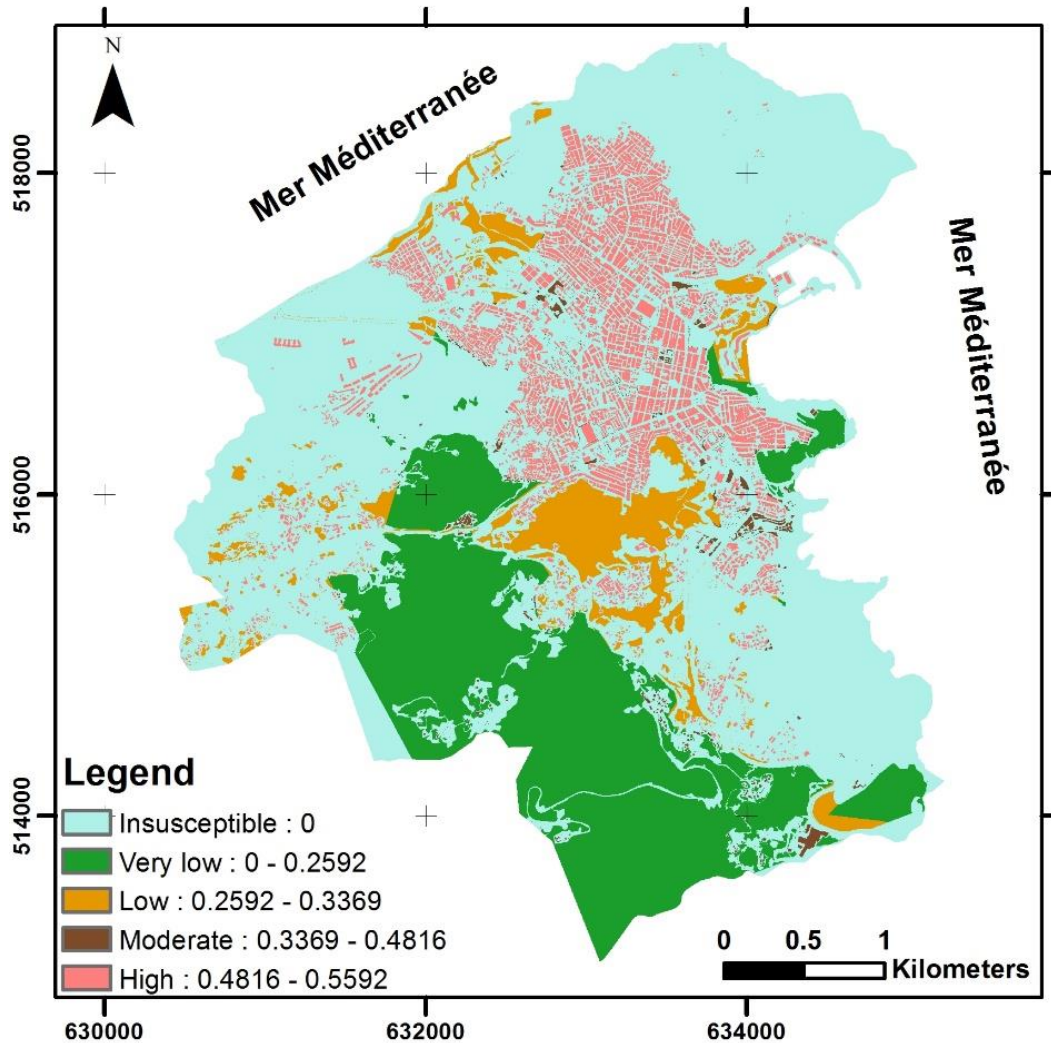


Figure 95: Carte de la vulnérabilité socioéconomique de la ville d'Al Hoceima

La carte de vulnérabilité socioéconomique élaborée distingue cinq niveaux, le niveau 1 représente des zones non vulnérables (zones dégagées et non engagées dans le tissu urbain) ; le niveau 2 caractérise les zones à vulnérabilité très faible qui coïncident avec les zones à vocation naturelle (forêt, espaces de promenade, zones de boisement) ; le niveau 3 est celui ayant une vulnérabilité faible, calculée sur un espace plus fréquenté par les citoyens et aménagé : jardin, Park et aires de jeux, etc. ; le niveau 4 représente une vulnérabilité modérée expliquée par la présence des équipements publics et privés d'intérêt général ; la vulnérabilité forte est distingué par le niveau 5 qui couvre les bâtiments et les foyers des ménages (zones à différents enjeux : enjeu socioéconomique).

6. Conclusion

La zone d'Al Hoceima connaît de nombreuses instabilités, causées par la combinaison de plusieurs facteurs. L'évaluation de l'aléa mouvement de terrain, sa gestion et prévention s'inscrit dans le cadre du besoin des pouvoirs publics et la communauté des scientifiques de mettre en place des modèles et démarches adaptées à la problématique.

La présente étude a permis d'identifier 56 zones d'instabilité, totalisant 0.95 km² (Soit 5.9 % de la zone), les instabilités inventoriées ont été cartographiées par relever GNSS et photo-interprétation des images aériennes de la zone.

La méthode d'analyse bivariée a été utilisée pour évaluer la susceptibilité de la zone étudiée au mouvement de terrain. Elle permet de mettre en relation les interactions entre facteurs causatifs et les zones d'instabilités observées (la géologie, les types de formations, la pente, les altitudes, l'exposition, l'occupation du sol, la distance des failles, la distance du réseau hydrographique et le zonage géotechnique).

L'ensemble des données de l'étude ont été intégrées dans une base de données SIG, structurées, harmonisées et combinées suivant les équations (1) et (2). Les facteurs les plus significatifs dans le déclenchement des instabilités sont :

- La distance du réseau hydrographique ;
- La lithologie constituée des alluvions modernes, schistes, grès et flyschs ;
- Les zones géotechniques Z0 ;
- Le sol moyennement compact et granulaire ;
- Les pentes comprises entre 25 et 35°.

La carte de susceptibilité aux mouvements de terrain correspond à 5 classes de susceptibilité : très faible, faible, moyenne, forte et très forte. Plus de 10 instabilités (19.51%) localisées dans la classe de susceptibilité très forte, 12 instabilités (21.95%) localisées dans la classe de susceptibilité forte, 13 instabilités (24.39%) localisées dans la classe de susceptibilité moyenne, 6 instabilités (12.20%) localisées dans la classe de susceptibilité très faible.

Les résultats obtenus démontrent que la méthode d'analyse bivariée est très adaptée à la cartographie des aléas naturels et peut être adaptée et reproduite sur d'autres cas d'étude et zones à risque.

Pour atténuer l'effet de l'aléa sur les enjeux exposés, il est opportun de respecter certaines recommandations :

- Interdiction de construction et installation des citoyens dans les zones à risque ;
- Intégration des citoyens dans les stratégies de gestion et prévention des risques ainsi que le développement de la réponse des individus aux moments de crises ;
- Aménagements et constructions adaptés techniquement ;

Pour évaluer la vulnérabilité des enjeux exposés aux mouvements de terrain à l'échelle de la zone, la méthodologie utilisée considère deux catégories d'index urbains : physiques et socioéconomiques (Figure 86). La vulnérabilité socioéconomique concerne les facteurs sociaux et économiques de la zone (Carreno et al., 2007). Dans la présente étude, la démarche développée par Safeland (Safeland, 2012) a été utilisée en intégrant des adaptations pour se conformer aux conditions de la ville d'Al Hoceima.

Le modèle proposé et adapté permet d'évaluer les facteurs démographiques, économiques et la préparation aux désastres. Les variables retenues sont : la densité de population, type d'habitat, nombre d'employés exposés, etc. (Tableau 14). La préparation des variables repose sur un travail d'enquête et des résultats de recensement et sondages.

Notre démarche d'évaluation de la vulnérabilité combine les facteurs physiques, sociaux, économiques et environnementaux. Chaque détail cartographique est décrit par les composantes de la vulnérabilité socioéconomique (Variables du **tableau 16**). La composante sociale permet de mettre en lumière les zones à présence humaine, en nombre et en densité (habitants et employés ; présence en journée, nuit ou permanente) ; La composante économique place les aménagements urbains au niveau de la zone d'étude au premier rang, nous pouvons distinguer les trois catégories suivantes : équipements publics, le réseau de voirie et l'infrastructure du télécom ; du fait que leur présence est indispensable pour le bon déroulement des activités humaines ; La troisième composante qualifie le territoire en matière de réponse à un événement majeurs (sinistre) par les moyens de santé à mobiliser : équipes de soin, fond à mobiliser, etc.

La cartographie réalisée caractérise les éléments exposés à la manifestation de l'aléa mouvement de terrain à l'échelle du projet, en exploitant les plans d'occupation du sol de la ville obtenus par photogrammétrie aérienne.

Le niveau de vulnérabilité de la zone étudiée dépend ainsi du :

- Degré d'exposition des éléments du territoire : en densité ;
- Nombre des éléments vulnérables exposés : en nombre ;
- Valeur ou importance stratégique du détail exposé ;
- Sensibilité des éléments exposés ;
- Préparation humaine, monétaire et logistiques à l'évènement

CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE GLISSEMENTS DE TERRAIN AU QUARTIER BOUJIBAR – A GRANDE ECHELLE – ECHELLE LOCALE

1. Introduction

L'étude et la cartographie du risque « glissements de terrain » constituent l'intérêt des spécialistes et des experts en risques naturels. Pour réussir cet objectif, il est nécessaire d'évaluer les deux grandeurs : niveau d'aléa et enjeux humains ou la vulnérabilité des éléments exposés (MATE/METL, 1999). L'aléa est défini par son niveau d'intensité, qui dépend de facteurs de prédisposition et de facteurs déclenchants (Crurent et al., 1996), alors que l'enjeu dépend principalement des typologies d'occupation du sol existantes.

Les risques naturels constituent l'un des principaux enjeux d'aménagement, en particulier dans la région du Rif oriental marocain, zone caractérisée par des paramètres de prédisposition au risque. Cette étude a été initiée à partir d'un constat terrain et un intérêt scientifique initié par des travaux de recherches antérieurs. Les mouvements de terrain dans le Rif ont fait l'objet de plusieurs travaux, dont ceux de (Millies-Lacroix, 1968) qui demeure l'un des pionniers dans l'étude de ces mouvements. Dans d'autres travaux [Margua, 1994 ; Talhaoui, 1999] ; Mastere et al. 2015 ; El Hamdouni et al. (2018) ; Elmoulat et Ait Brahim (2018) ; Ait Brahim et al. (2018) ; Bousta et Ait Brahim (2018) ; Jemmah et Ait Brahim (2018) ; El Fahchouch et al. (2018) ; El Hamdouni et Aitbrahim (2018) ; Elmoulat et al. (2021) ; El Hamdouni et al. (2022)], consacrés à des régions précises du Rif, ont invoqué la combinaison de plusieurs facteurs provoquant cette instabilité. L'objectif principal de la présente étude est de mettre en évidence les relations entre des paramètres de susceptibilité (conditions géologiques, topographiques locales...) et les enjeux existants à l'échelle d'une zone urbanisée du Rif menacées par le risque de glissement de terrain. L'étude est réalisée par l'application de l'analyse bivariée, qui est considérée comme un modèle statistique spatialisé d'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain.

2. Site d'étude

La zone d'étude est située à l'ouest de la ville d'Al Hoceima (Figure 96), elle s'étend sur une superficie approximative de 1 800 000 m² et elle appartient au Rif oriental, une chaîne montagneuse dont la structure est chevauchante avec une superposition de nappes (divisées en plusieurs domaines : les Ghomarides, les Sebtides et la dorsale calcaire).

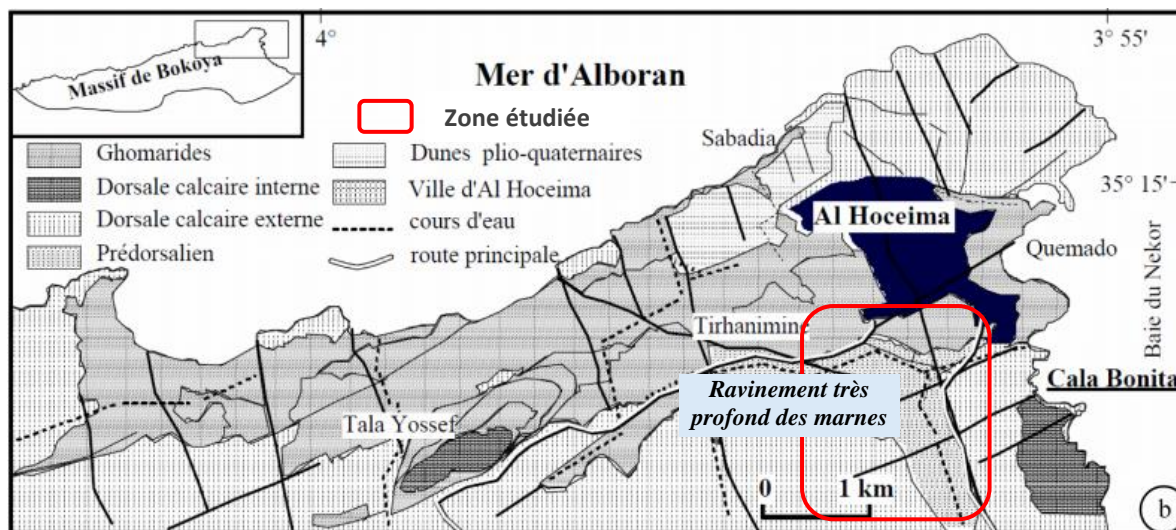


Figure 96: Carte géologique et structurale montrant la structuration en damier du horst d'Al-Hoceima (d'après Azzouz et al. (2002) [6])

Le secteur est marqué par l'affleurement des calcaires et des marnes avec un relief accidenté allant jusqu'à 70° de pente. La zone est caractérisée également par une activité sismique remarquable. Plusieurs séismes ont secoués la région, notamment celui de 1994, 2004 et les derniers de 2016. Le climat dominant la région est de

nature semi-aride avec une moyenne de précipitations de 300 mm/an et une température moyenne annuelle égale à 18°C. Plusieurs facteurs ont favorisé le développement du réseau hydrographique dans la zone (formations géologiques, pente du terrain et surface de drainage).

3. Description du phénomène d'instabilité et dommages reconnus

Du point de vue lithostratigraphique, le quartier est formé principalement par des calcaires et des formations marneuses affectées par un réseau intense de ravinelements et fractures. Ces calcaires sont intercalés par des niveaux conglomératiques friables. La zone de BOUJIBAR est marquée par une grande instabilité manifestée par des glissements de terrain de différentes intensités comme en témoigne les photos ci-dessous (**Figure 97**). La nature lithologique du quartier favorise le développement à l'intérieur de celle-ci de plusieurs phénomènes qui sont à l'origine de cette instabilité à savoir :

- La dissolution des grés - calcaires suite à la percolation des eaux le long des zones de faiblesse ;
- L'érosion du niveau conglomératique par l'eau de ruissellement comme par l'eau qui s'infiltre de la surface en entraînant les particules fines et en vidant une partie de son squelette solide, ce qui a provoqué en quelques endroits le détachement des blocs de la barre supérieure suite à une position de porte à faux ;
- La fracturation qui se développe sur les grés découpant celle-ci en une série de blocs plus ou moins disloqués ;



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 97: (a) Surface de glissement ; (b) rejets des eaux dans le milieu naturel ; (c) et (d) : Photos des ravinelements dans les marnes

La **figure 98** représente l'emplacement des sondages, les principaux relevés topographiques, les désordres identifiés et les coupes géologiques réalisées.

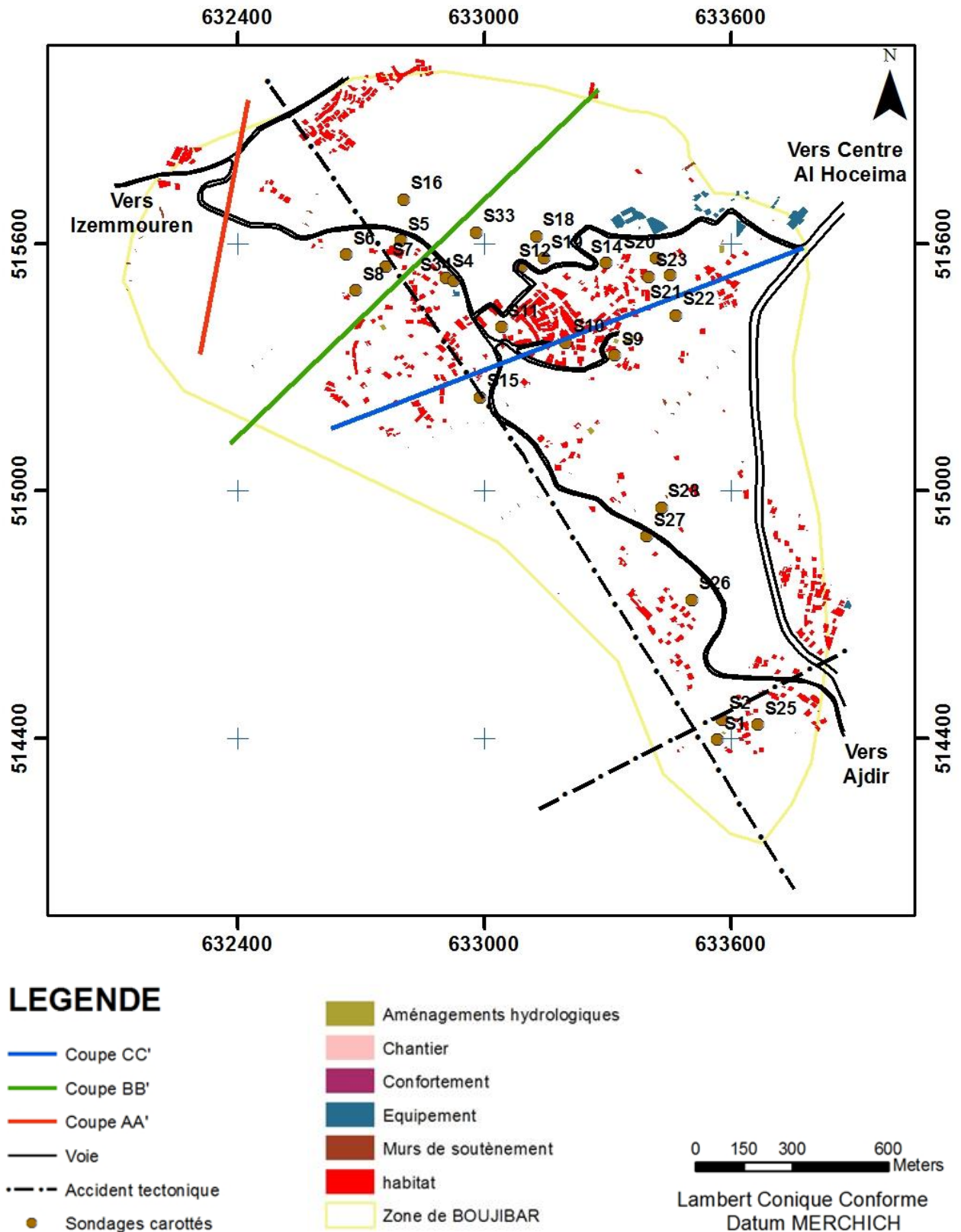
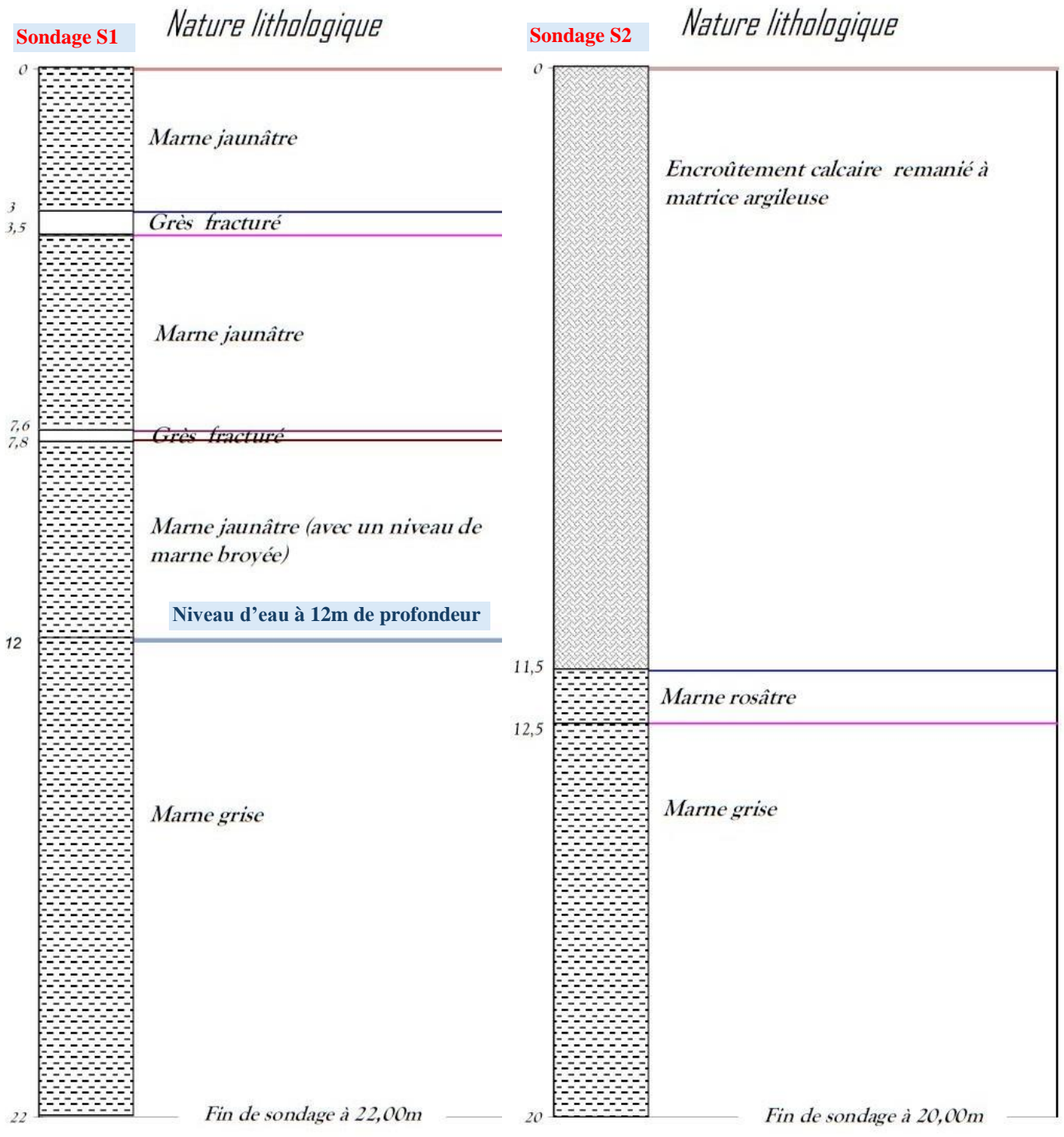


Figure 98 : Emplacement des sondages, principaux relevés topographiques, désordres identifiés et coupes géologiques réalisées

4. Etude géotechnique

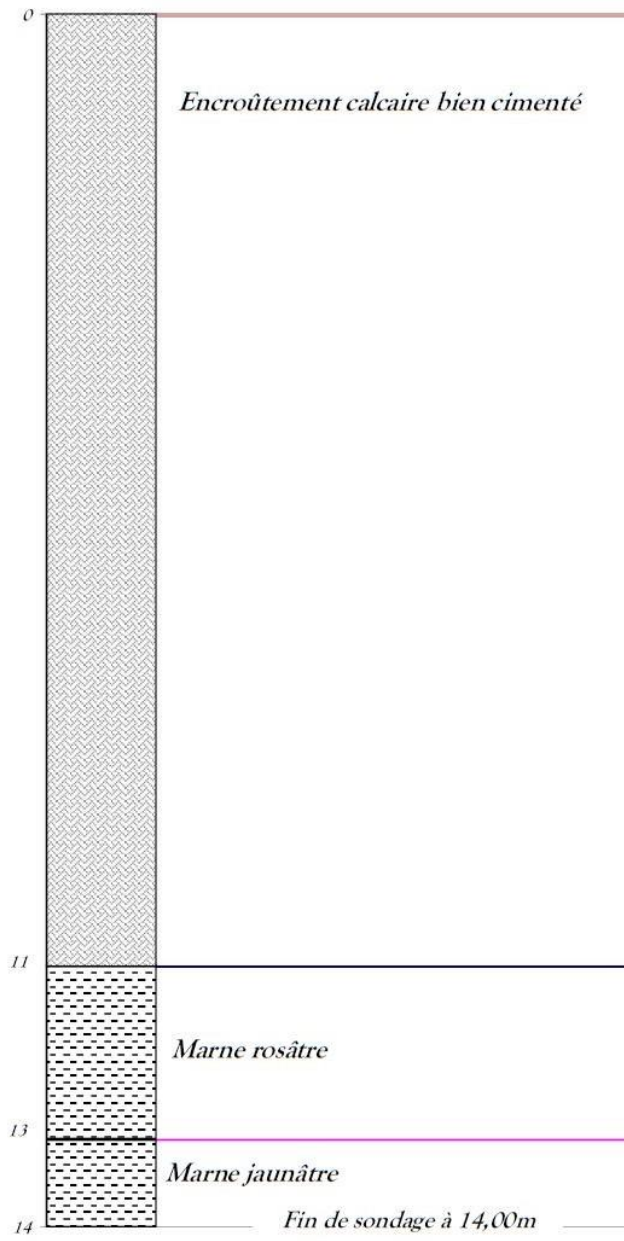
Afin d'identifier les formations de la zone et de comprendre leur comportement mécanique, une étude géotechnique faite qui consiste à exécuter une reconnaissance par sondages carottés, essais d'identification et de compressibilité. Des coupes lithologiques de quelques sondages carottés du secteur d'étude sont présentées Ci-dessous (**Figure 99** : sondages S1, S2, ..., S10).

Le niveau est retrouvé aux emplacements des sondages S1, S7 et S9, respectivement à une profondeur de 12, 13 et 17m. Le sondage S7 se situe en zone très proche d'une fontaine (Voir coupe BB' – **Figure 100-B**)



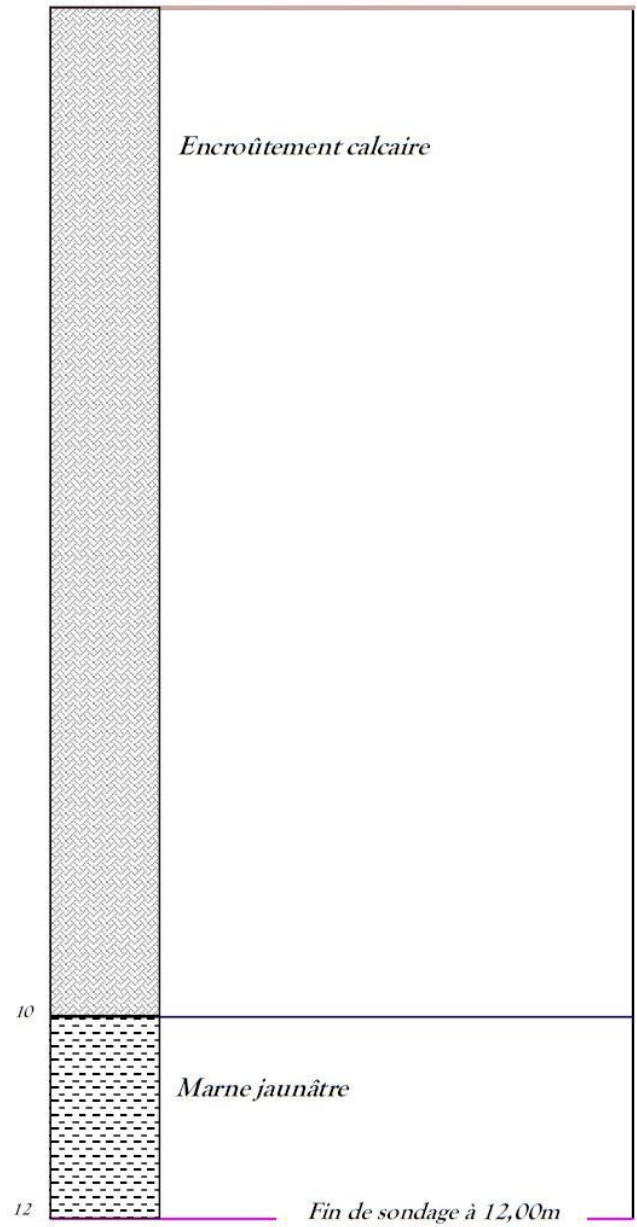
Sondage S3

Nature lithologique



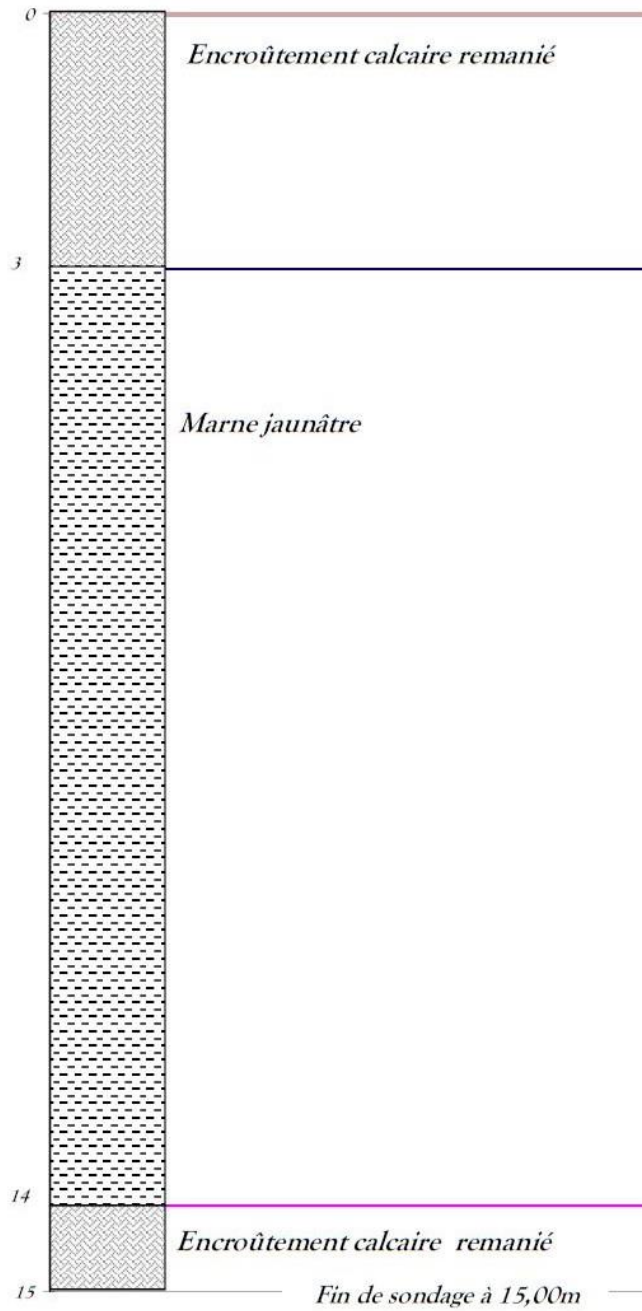
Sondage S4

Nature lithologique



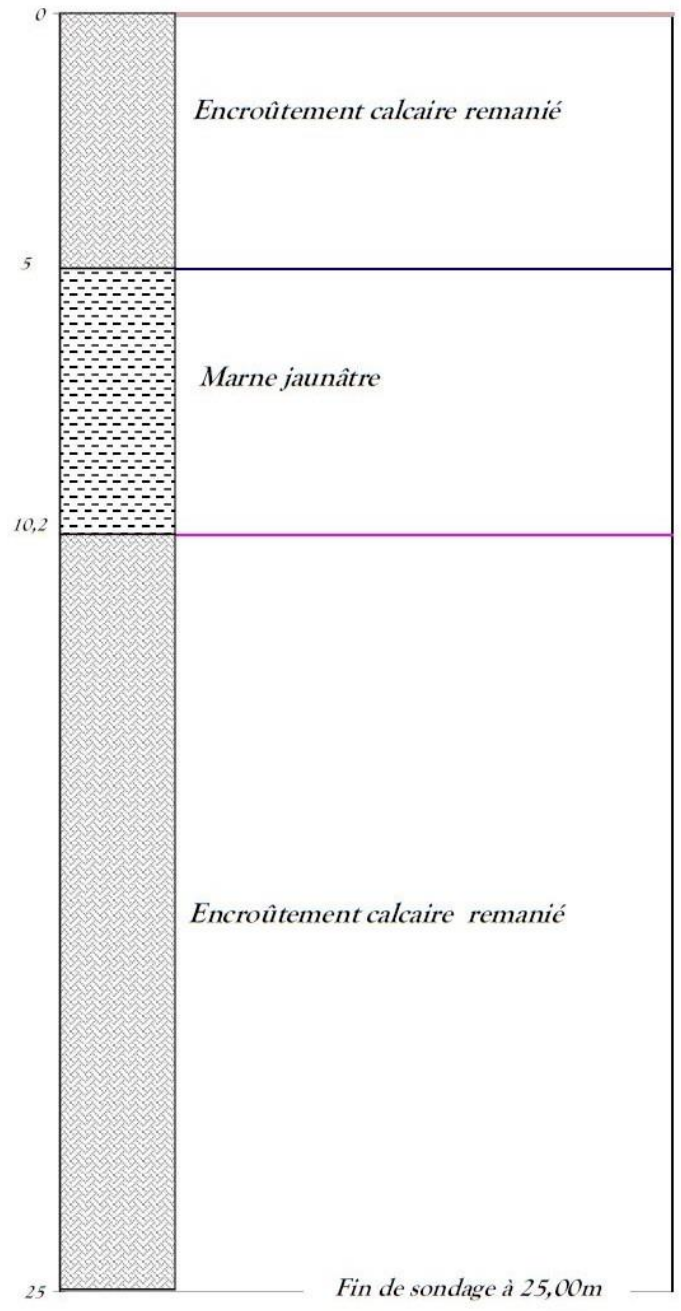
Sondage S5

Nature lithologique



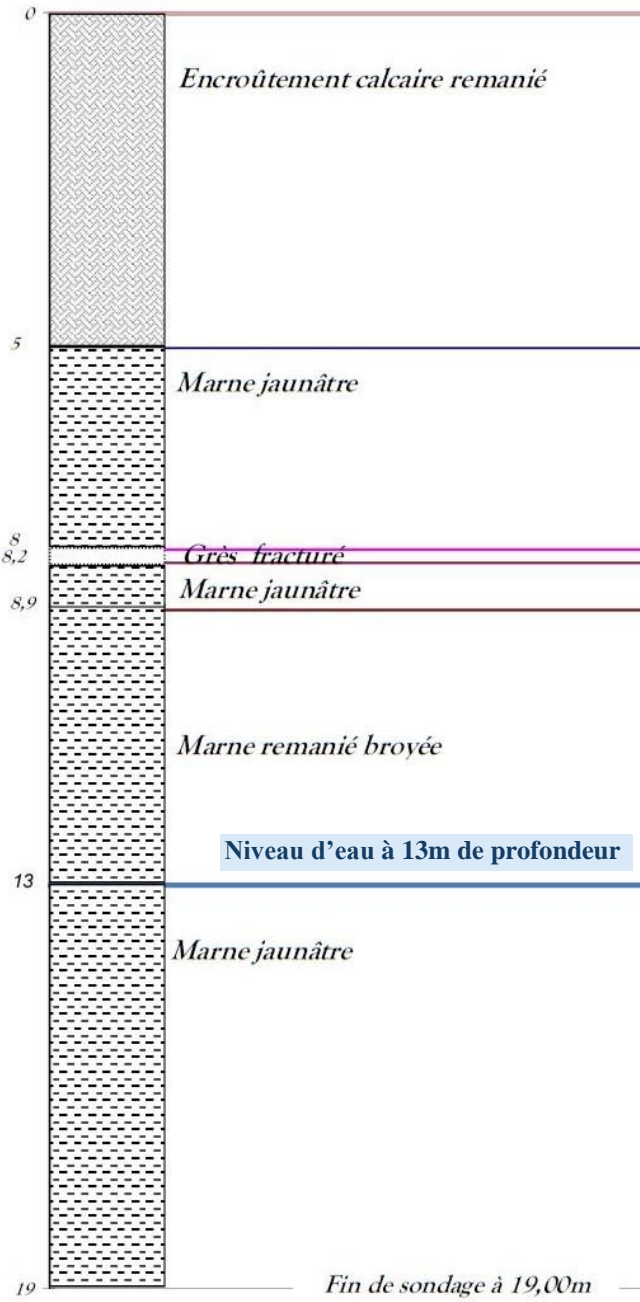
Sondage S6

Nature lithologique



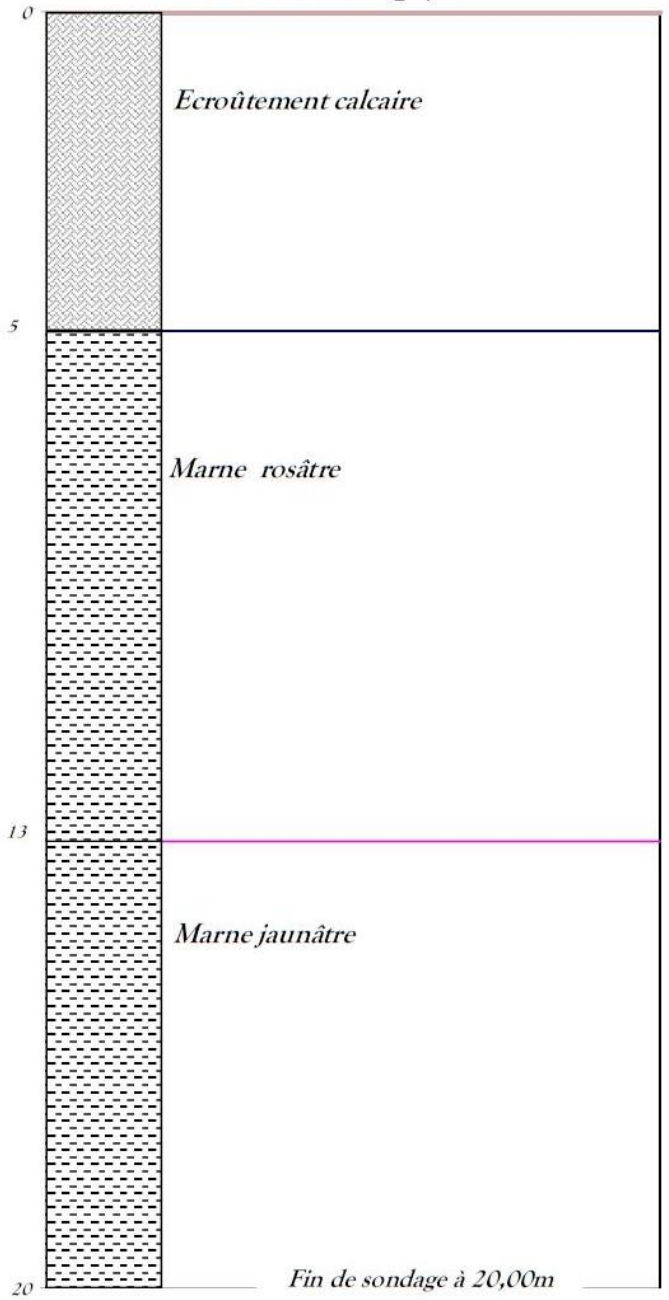
Sondage S7

Nature lithologique



Sondage S8

Nature lithologique



S7

S8

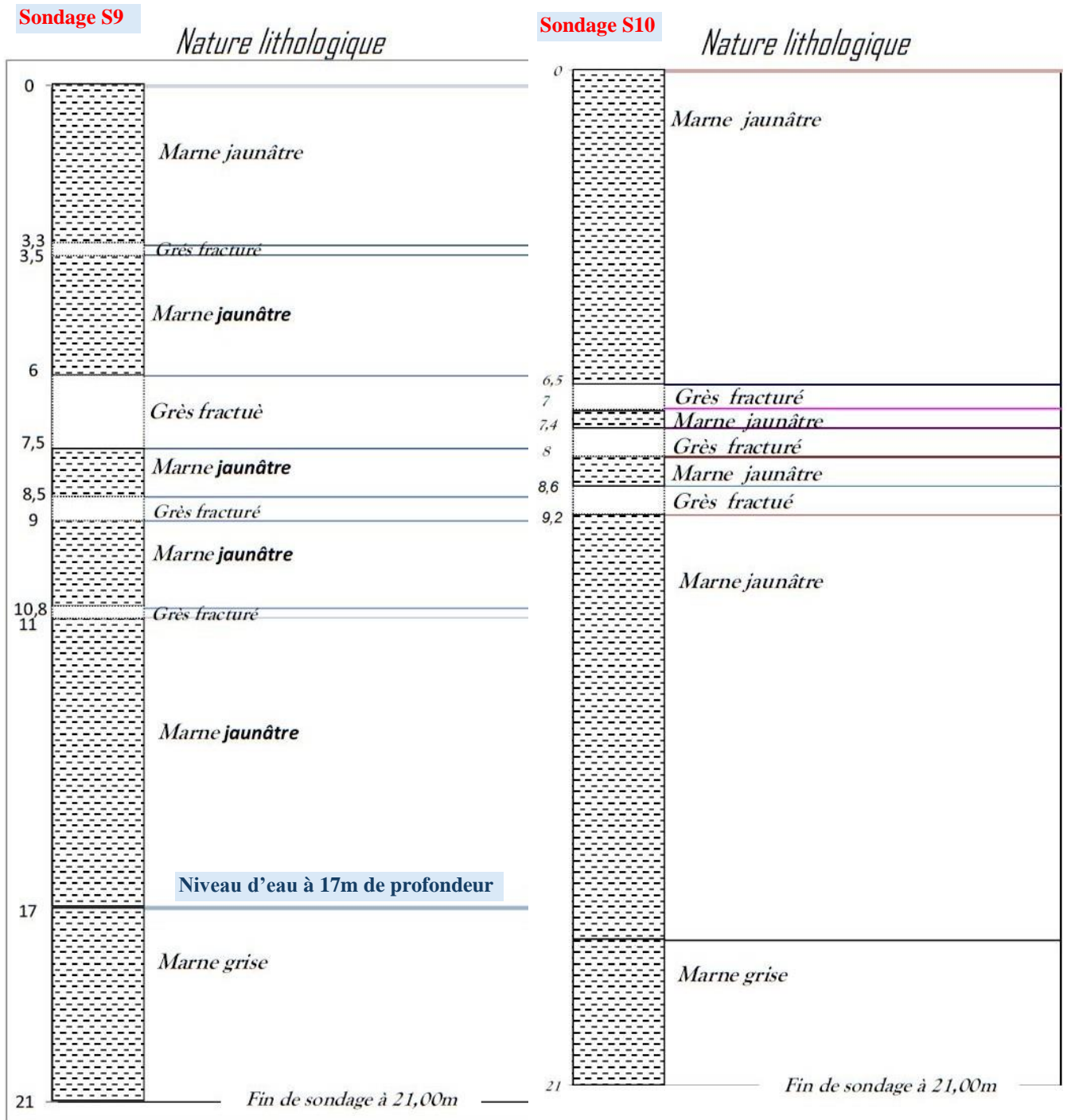


Figure 99: Sondages carottés (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9 et S10). Voir la carte d'implantation des sondages (Figure 98 ci-dessus).

Trois coupes structurales du quartier BOUJIBAR ont été réalisées (**Figure 100A, 100B et 100C**). Elles montrent l'évolution de la structure de ce secteur qui est en général une structure en nappes de charriage. Les marnes et grès du Tertiaire de la nappe d'AJDIR se trouvent, systématiquement, surmontés par des terrains carbonatés du Paléozoïque (coupes AA' et BB') et du Mésozoïque (coupes CC'). Les contacts entre ces différentes formations sont anormaux. Les formations tendres qui constituent la zone de BOUJIBAR, et qui se trouvent fréquemment masquées par des encroûtements calcaires, apparaissent ainsi, en fenêtre tectonique sous ces massifs carbonatés.

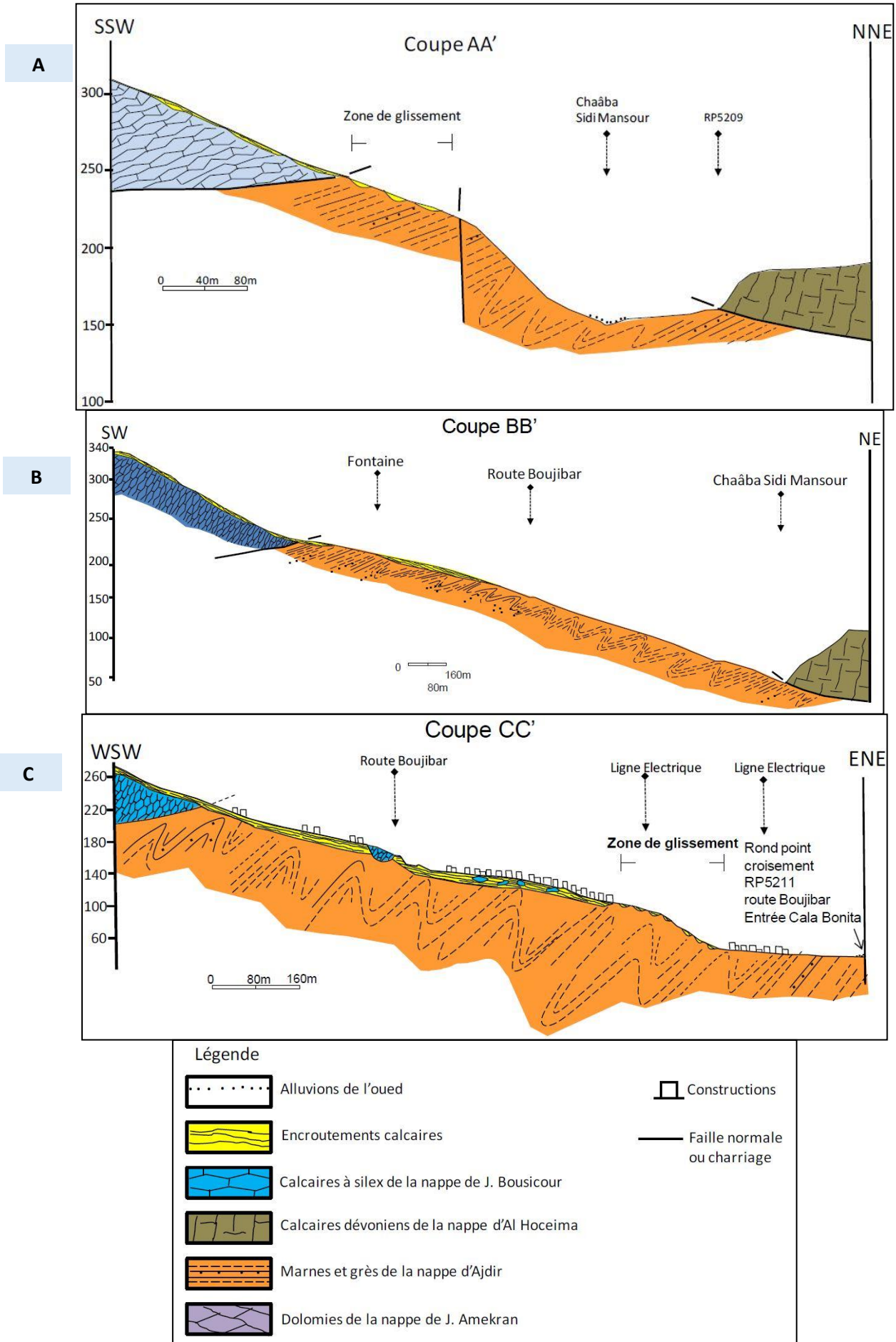


Figure 100: Coupes géologiques réalisées au niveau du la zone de BOUJIBAR (A : Coupe AA', B : Coupe BB', C : Coupe CC')

5. Hydrologie et hydrogéologie du secteur de BOUJIBAR

Vu la complexité géologique de la région de BOUJIBAR, le réseau hydrographique est plus ou moins développé. En effet, sur les calcaires à silex le réseau est peu développé contrairement aux marnes tertiaires. La plupart des cours d'eau sont intermittents et ne fonctionnent qu'à la suite de pluies abondantes et continues. Les longueurs du réseau hydrographique sont de quelques kilomètres.

Les cours d'eau au niveau de la zone représentent des caractères d'écoulement méditerranéen (profil en long à pente forte). Ils présentent le flux énergétique le plus important, dans la mesure où l'eau descend des secteurs situés à plus de 800 m d'altitude. Ces flux constituent une réponse instantanée aux pluies tout en déclenchant une action érosive généralisée sur des pentes raides et fragiles.

Sur le secteur d'étude des sources existent, néanmoins elles ont presque toujours un faible débit. Le seul potentiel aquifère intéressant de cette région semble être constitué par les sous-écoulements des oueds qui drainent les calcaires. Compte tenu de la faible perméabilité des terrains, de la forte pente et du régime des pluies, les émergences (sources) sont très limitées et de très faible débit.

Le secteur est dominé également par une Dorsale calcaire interne qui repose localement par un contact de faible pendage sur la formation des calcaires à silex liasique de la Dorsale calcaire externe.

Les pluies s'infiltrent en partie dans le massif calcaire ou se déversent rapidement en mer par les ravins à caractère torrentiel. Les averses ont un pouvoir érosif remarquable dans les marnes tertiaires du Prédorsalien qui abondent dans les environs de BOUJIBAR. Les phénomènes de ravinement l'emportent souvent sur les instabilités profondes.

En contradiction de ces faibles quantités de pluies, durant les années de sécheresse 1991–1994, le séisme du 26 mai 1994 a provoqué un écoulement anormal qui a surpris la population installée à proximité des cours d'eau du massif de Bokoya. Les sources et les points d'eau ont manifesté une augmentation nette de leur débit. Cela prouve que l'allure de karst très évolué (Paléokarst), que laisse supposer ce massif, est trompeuse (Maurer, 1968), puisqu'il continue à renfermer d'importantes réserves en eau et que l'instabilité sismique peut modifier l'écoulement dans le réseau des conduits karstiques.

Les matériaux carbonatés lapiazés et très fracturés, encore appelée croûte carbonatée, augmentent la perméabilité et l'infiltration des eaux ; mais cette infiltration reste lente comparée à d'autres systèmes karstiques du Rif. Ces eaux infiltrées restent souvent piégées dans la zone Epikarstique, et peuvent constituer de véritables nappes phréatiques perchées au-dessus des niveaux marneux imperméables qui jalonnent les contacts de faible pendage à la base des différentes nappes. Ces eaux engendrent dans les marnes tertiaires des pressions interstitielles supérieures à la résistance au cisaillement, permettant le développement des forces motrices nécessaires à leur déplacement.

6. Inventaire géomorphologique des glissements

Si les calcaires dévoniens et les calcaires à silex du Lias, représentent de par leur cohésion les couches les plus stables de la région, les différentes assises tertiaires, en position de soubassement des deux formations susvisées montrent une superposition de couches, qui se révèlent particulièrement sensibles aux conditions hydrogéologiques et climatiques au déclenchement de mouvement de terrain, de par leur composition et leurs propriétés mécaniques.

En effet, la grande majorité des couches du Tertiaire est composée de roches meubles (argiles et marnes) entre lesquelles s'intercalent quelques niveaux cohérents gréseux (**Figure 101**). Elles sont, compte tenu de leurs propriétés physiques et mécaniques et de la pente, sujettes à des instabilités, et peuvent ainsi générer de nouveaux mouvements de terrain.



Figure 101: série marno-gréseuse d'âge Tertiaire déformée

Ces argiles et marnes du Tertiaire sont sensibles à l'eau et sont capables de l'absorber en grande quantité, ce qui les rend très peu cohérentes et en fait un niveau privilégié pour le développement de surface de rupture.

La saturation en eau des terrains ne se produit que si une grande partie d'eau des pluies s'infiltré au lieu de ruisseler. Les fentes de dessiccation provoquées par la sécheresse estivale et les fissures liées aux déformations profondes favorisent l'infiltration de l'eau qui exerce alors une pression hydrostatique qui peut faire atteindre aux matériaux argileux la limite de plasticité nécessaire au fluage. Pour cela, les températures élevées apparaissent propices à la fissuration et les secousses sismiques produisent des forces horizontales qui s'ajoutent aux événements décrits précédemment, sans modifier la résistance au cisaillement des terrains. Aussi, les séismes sont-ils souvent à l'origine du déclenchement de glissements de terrain.

Par ailleurs, il existe une formation de pente dans la partie ouest du quartier de BOUJIBAR et au pied des calcaires à silex du Lias, qui est constituée de roches issues du dépôt et la sédimentation marines au niveau du versant, remaniées et consolidées par une matrice carbonatée formant une croûte calcaire d'une épaisseur variante entre 0,5 mètres et plusieurs mètres.

Lors de fortes précipitations, les eaux circulant dans les calcaires à silex du lias s'infiltrent à travers la croûte carbonatée fissurée et peuvent humecter fortement et rapidement les marnes tertiaires qui sont en position de soubassement et provoquer des mouvements de terrain.

Plusieurs glissements actifs ont été cartographiés sur le quartier de BOUJIBAR (**Figure 102**). La délimitation des glissements se fait par :

- Photo-interprétation des images aériennes (orthophotos de la zone de dates différentes) ;
- Reconnaissance sur site ;
- Recueil des indices de glissements ;
- Documents d'archive ;
- Rapports techniques et sondages élaborés dans le cadre des études techniques pour la construction des projets ;

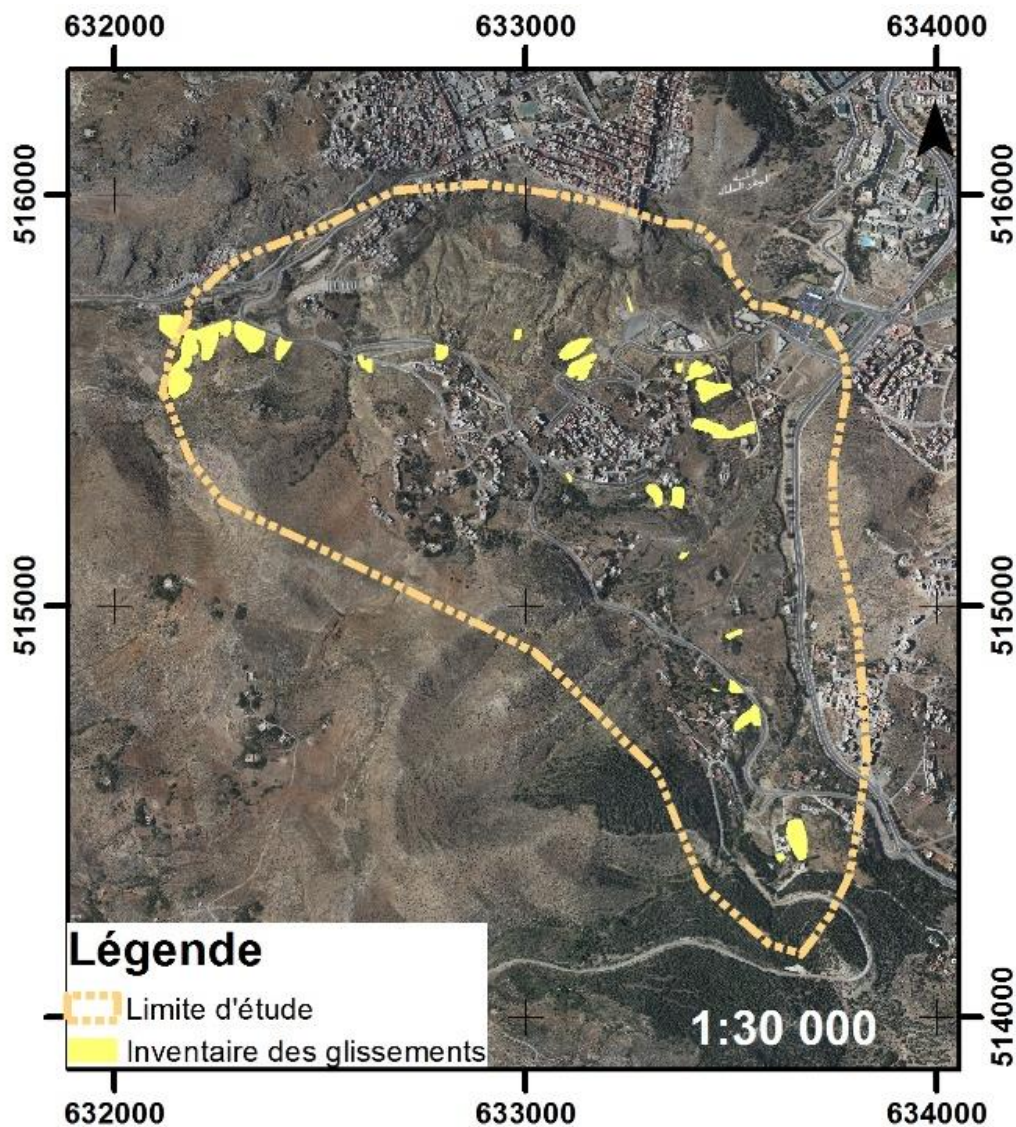


Figure 102: Carte de l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs

7. Données de base

Les données collectées pour l'analyse de la susceptibilité peuvent être regroupées en cinq groupes de variables (**Tableau 17**) : inventaire géomorphologique des glissements de terrain observés, pente topographique, géologie, formations superficielles, hydrographie et occupation du sol.

Tableau 17 : Données analysées pour l'évaluation de la susceptibilité

Variable dépendante/explicative		Source
Vd	Glissement de terrain (GT)	Observations, restitutions photogrammétriques.
Ve	Pente (PE)	Modèle numérique de terrain.
	Lithologie (LI)	Carte géologique et rapports.
	Formations superficielles (FS)	
	Réseau hydrographique (HY)	Restitutions photogrammétriques et modèle numérique de terrain.
	Occupation du sol (OS)	Restitutions photogrammétriques.

Ces données sont construites à partir de bases de données existantes, de la mise en forme des restitutions photogrammétriques issues de photographies aériennes, d'interprétation de documents, et d'observations de terrain. Les données sont spatialisées grâce à l'outil SIG ; les cartes de variables sont au format raster, avec une maille carrée de 1m. Les paramètres géométriques des versants sont dérivés d'un modèle numérique de terrain (**Figure 103**) issu de la génération à partir des orthophotos au 1/2 000^e. La carte de pentes est générée en exploitant les fonctionnalités d'analyse spatiale du SIG (**Figure 104**).

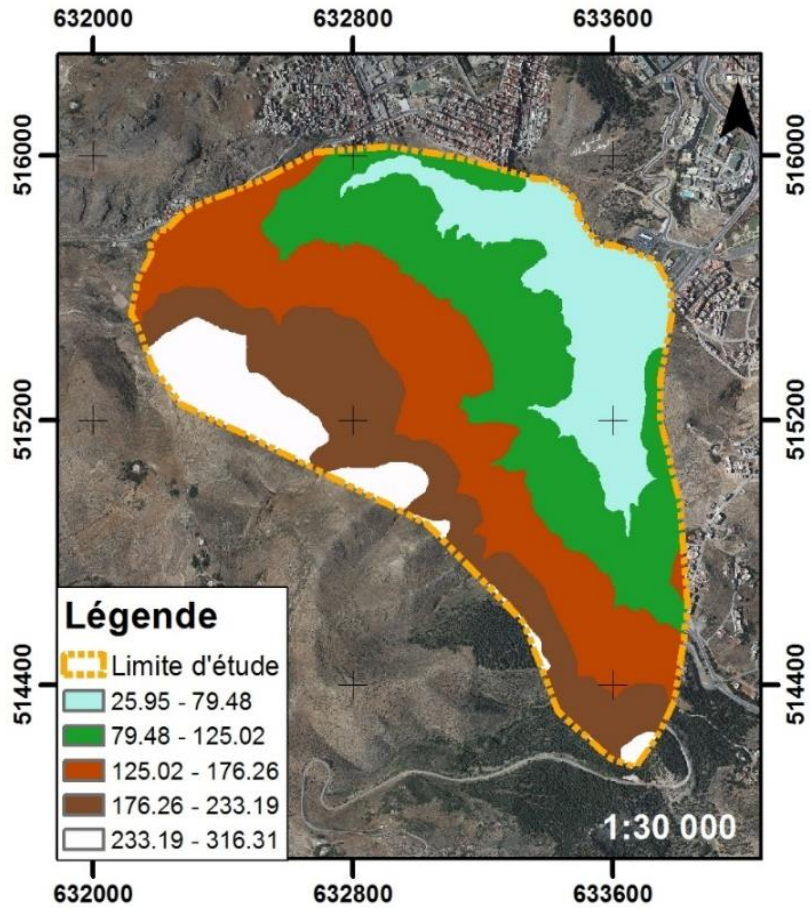


Figure 103: Carte des élévations (MNT) de BOUJIBAR (en m)

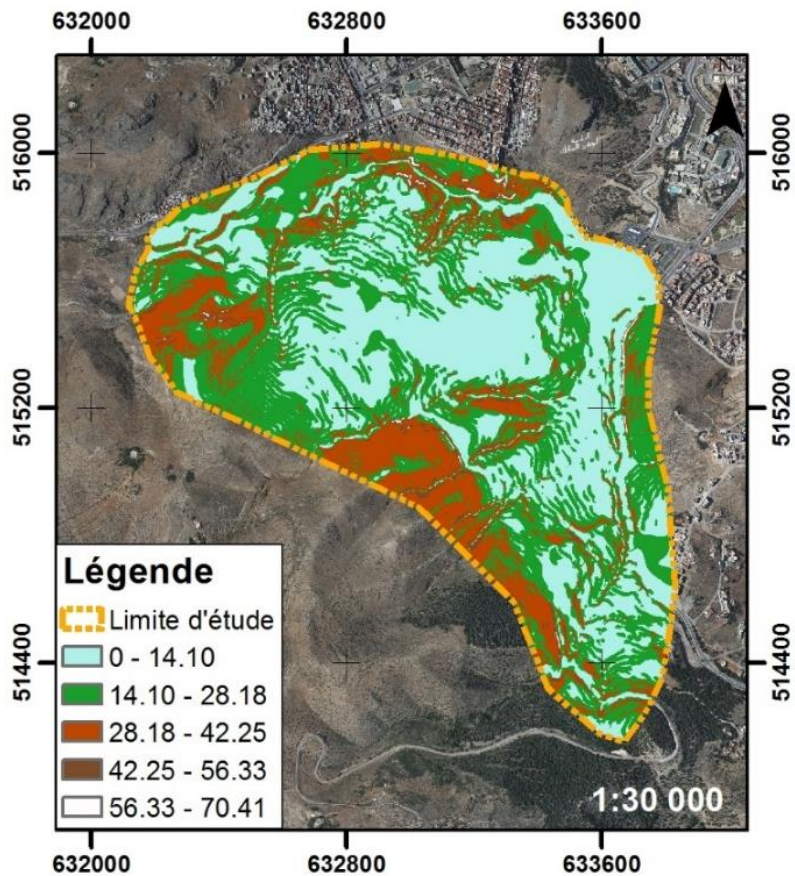


Figure 104: Carte des gradients de pente de BOUJIBAR (en degrés)

Les variables prédictives relatives à la géologie sont la lithologie et les formations superficielles. Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été extraites de la carte géologique au 1/50 000e, complétée par des sondages et observations terrain (**Figure 105**).

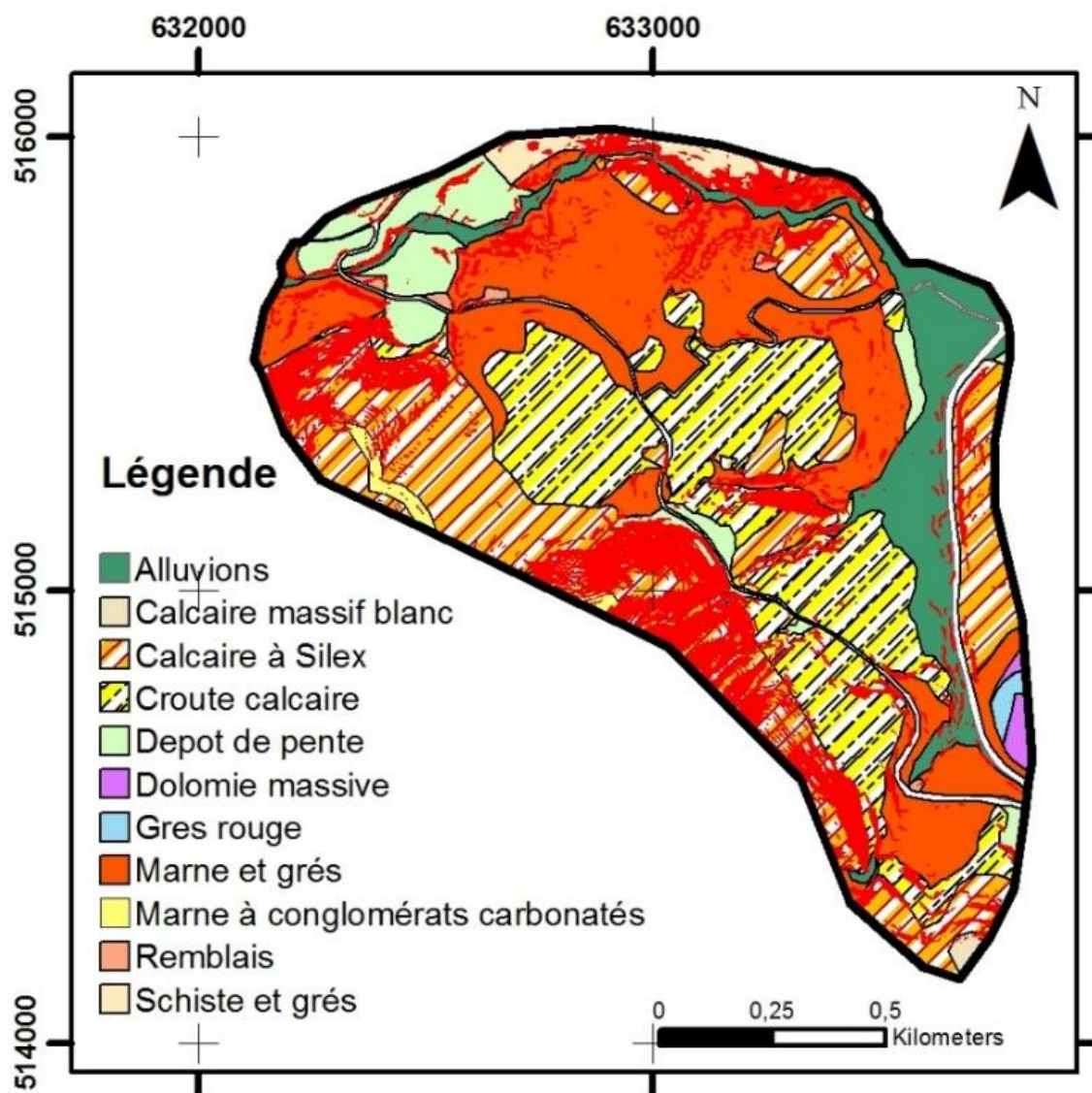


Figure 105: Carte des formations superficielles de la zone d'étude

La carte d'occupation du sol et le réseau hydrographique sont issus de la mise en forme des restitutions photogrammétriques de la zone à une échelle du 1/2 000^e. L'intégration des données hydrographiques est expliquée par l'action érosive des cours d'eau.

8. Approche d'analyse du risque employée

8.2. Concepts de l'approche

- L'évaluation de l'ampleur du risque glissement de terrain consiste à exprimer le lien entre la susceptibilité et les conséquences du risque sur les enjeux exposés ;
- La susceptibilité est la probabilité spatiale qu'un glissement de terrain se produit sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Les techniques d'analyse spatiale (Guzzetti et al., 1999 ; Van Westen, 2000) permettent d'identifier des zones susceptibles selon deux approches : directe (qualitative) et indirecte (probabiliste). L'approche indirecte est la plus objective et permet d'obtenir des cartes de susceptibilité plus fiables et réalistes. Elle est retenue dans le cadre de ce travail.

- Le principe de l'approche indirecte « bi-variée » consiste à définir les relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (Variables indépendantes) et l'occurrence spatiale du glissement (variable dépendante).
- La définition des conséquences du risque consiste à évaluer une valeur d'endommagement pour chaque élément exposé.
- Le calcul du risque est effectué par croisement, à l'aide d'un tableau à double entrées (Ko Ko, 2004), des classes de susceptibilité et les classes de conséquences potentielles simulées.

8.3. Cartographie de la susceptibilité

Elle consiste à :

- Etablir un inventaire cartographique des zones d'occurrence des glissements ;
- Tester l'indépendance conditionnelle (test χ^2) entre les cinq variables indépendantes pour un seuil de signification $\alpha = 0.05$ (Bonham-Carter, 1994) ;
- Définir les combinaisons entre les variables indépendantes (au sens statistique). Suivant le protocole défini par (Thiery et al., 2004) ;
- Valider statistiquement la combinaison employée en introduisant les 2/3 de la population totale des glissements de terrain, à partir d'un tirage aléatoire ;
- Caler le modèle obtenu en utilisant le 1/3 de la population des glissements restante ;
- Interpréter les résultats du modèle sous forme de 5 classes de susceptibilité (S). Le choix des classes est établi par discrétisation manuelle, basée sur l'existence de seuils naturels visibles sur la courbe cumulative des valeurs de susceptibilité.

8.4. Cartographie de conséquences

L'évaluation est faite par identification des catégories des enjeux existants (structurels, corporels et fonctionnels) et par attribution des coefficients d'endommagement potentiel (CEP) à chaque détail exposé à l'enjeu. La valeur du coefficient est comprise entre 0 et 1 (**Tableau 18**).

Tableau 18: Enjeux identifiés au niveau de la zone et valeurs du coefficient d'endommagement (CEP) attribués

ENJEU CORPOREL ET STRUCTUREL (E1)	
Type de zone	CEP
Urbaine	1,0
Naturelle	0,3
Affleurement rocheux et sol nu	0,1
ENJEU FONCTIONNEL (E2)	
Type de l'infrastructure	CEP
Route principale	1,0
Route secondaire	0,8
Piste	0,6
Aménagement hydraulique	1,0
Confortement	1,0
Murs de soutènement	1,0

La combinaison des valeurs du CEP pour les enjeux étudiés (E1 et E2) permet de déduire 5 classes de dommages.

8.5. Cartographie du risque total

Cette cartographie est obtenue par le croisement des classes de la carte de susceptibilité et de conséquences potentielles suivant une matrice à double entrée (**Tableau 19**).

Tableau 19: Croisement de la carte de susceptibilité et la carte de dommages

CLASSES DE SUSCEPTIBILITES					
S3	S2	S1	S0		
R3	R3	R2		C4	CLASSES DE CONSEQUENCES POTENTIELLES
R3	R2	R1		C3	
R2	R2	R1		C2	
R2	R1	R1		C1	
				C0	

9. Résultats et interprétation

9.1. Carte de susceptibilité finale modélisée

Les tests effectués pour le calage des variables indépendantes indiquent que la meilleure combinaison est celle qui regroupe les cinq variables, par ordre hiérarchique, la pente, la lithologie, l'occupation du sol, la géologie et la distance aux cours d'eau (FS + LI + OS + PE + HY).

Une combinaison de trois variables seulement (FS, LI et OC) produit une erreur relative sur les surfaces modélisées de 40% (**Figure 106**). L'ajout des variables PE et HY permet une réduction de 29% d'erreur.

La cartographie de la susceptibilité finale en cinq classes a finalement été retenue. Elle identifie respectivement des aires de susceptibilité de 96 000 m², 664 000 m², 983 000 m² et 57 000 m² pour S0, S1, S2 et S3 (**Figure 107**) :

- Susceptibilité forte (S3) : coïncide avec des terrains marneux de pentes moyennes et forts exposés à l'action des eaux de surface (3% de l'aire d'étude) ;
- Susceptibilité modérée (S2) : correspond généralement à des formations marneuses et des encroutements calcaires ayant des pentes moyennes (55% du secteur) ;
- Susceptibilité faible (S1) et nulle (S0) coïncide avec des terrains de faibles pentes occupant 42%.

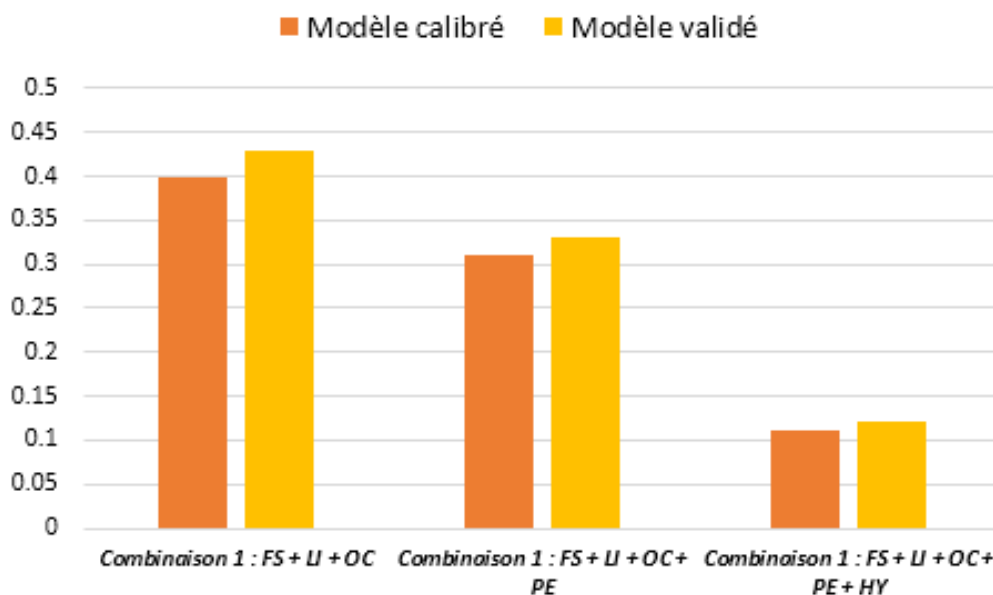


Figure 106: Combinaison des paramètres de prédispositions au risque et résultats du modèle retrouvés

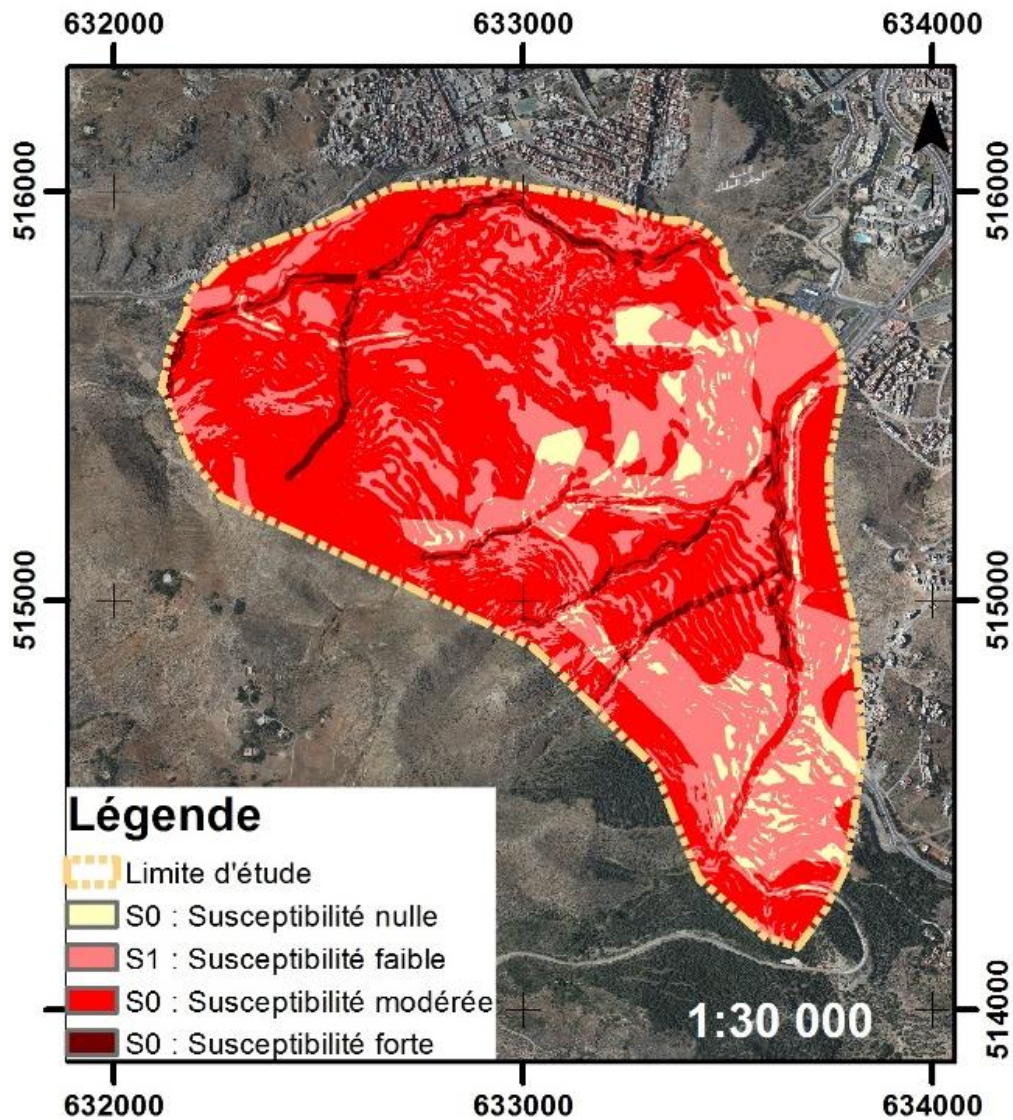


Figure 107: Carte de susceptibilité aux glissements de terrain

9.2. Carte des conséquences potentielles

La carte de dommage met en évidence des enjeux liés aux infrastructures et réseau du transport existant, les zones urbanisées et en urbanisation progressive. La carte identifie respectivement des aires de conséquences potentielles de 927 000 m², 4 000 m², 733 000 m², 1 000 m² et 135 000 m² pour les classes C0, C1, C2, C3 et C4 (**Figure 108**).

9.3. Carte du risque total

Le croisement des cartes de susceptibilité et de conséquences potentielles indique que les zones de risque fort (R3) sont très peu développées sur le territoire étudié (**Figure 109**). Les zones R3 correspondent à des secteurs en urbanisation ayant une pente forte combinée à un écoulement de l'eau de ruissèlement. Le niveau de risque négligeable représente 60% de la zone (1 081 000 m²) et correspond aux zones non engagées dans des activités d'aménagement. Cependant, le risque faible et modéré se concentre à l'intérieur de la zone d'étude et ils représentent respectivement 406 000 m² et 294 000 m².

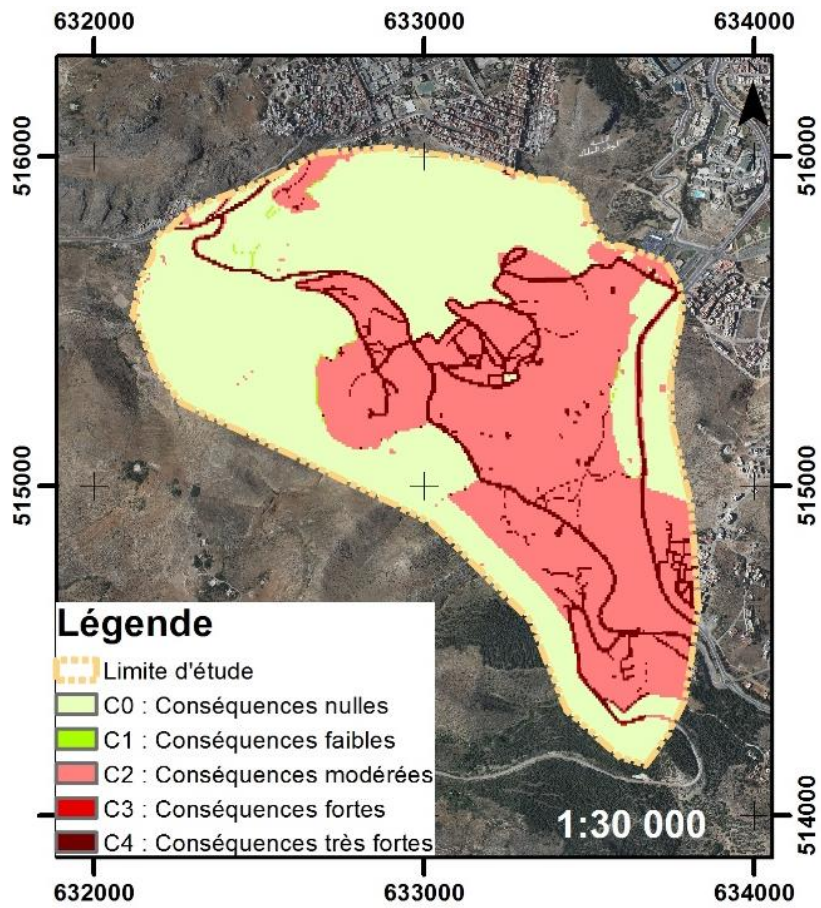


Figure 108 : Carte de conséquences aux glissements de terrain

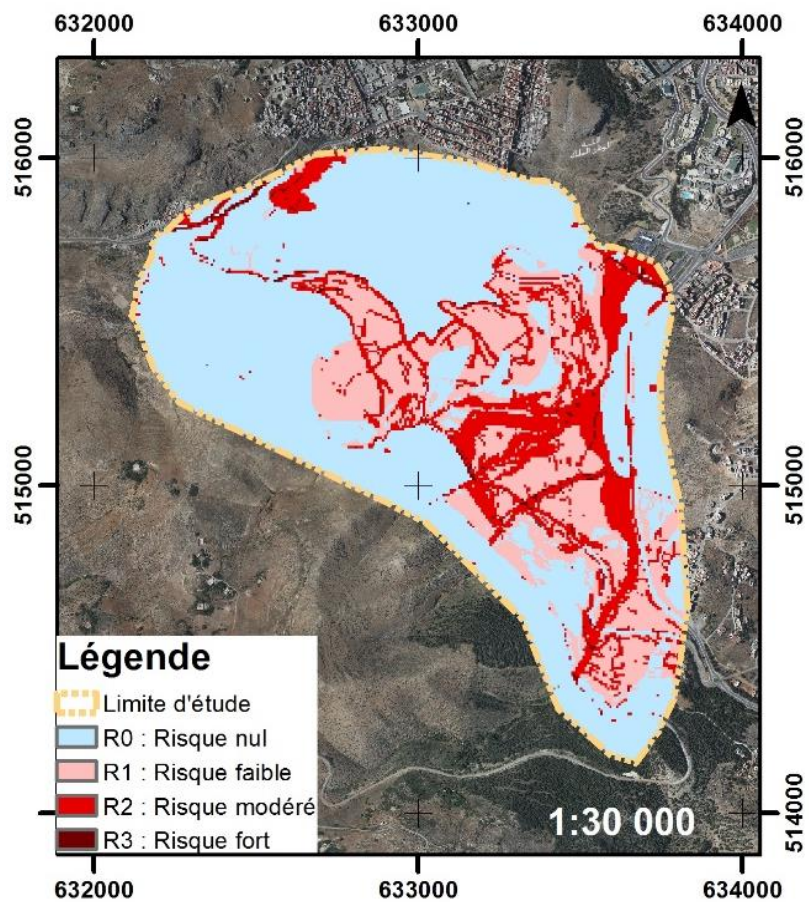


Figure 109 : Carte du risque global des glissements de terrain

10. Conclusion

Cette étude s'inscrit dans le cadre de l'analyse du risque « glissement de terrain » et l'évaluation probabiliste de son intensité à l'échelle d'une zone située à l'ouest de la ville d'Al Hoceima. L'étude démontre des niveaux de risques variables déterminés par les techniques d'analyse spatiale. A partir d'une démarche en 3 étapes, le risque est identifié et cartographié en associant plusieurs modèles d'analyse : (1) la susceptibilité de la zone au glissement de terrain est analysée par un modèle probabiliste bi-varié de la théorie d'évidence ; (2) les conséquences potentielles sont estimées par approche semi-empirique ; (3) le risque est évalué en combinant la carte de susceptibilité et celle des conséquences potentielles.

La cartographie du risque de glissement nécessite un inventaire géomorphologique des glissements au niveau de la zone. C'est un travail qui nécessite une bonne connaissance du terrain, une exploitation des rapports techniques disponibles et la mise en place d'une base de données utiles. Le bon modèle retrouvé par analyse probabiliste a démontré des résultats satisfaisants et une bonne adéquation aux particularités du secteur d'étude

CHAPITRE IX : CARTOGRAPHIE DES RISQUES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN AU VERSANT QUEMADO – A GRANDE ECHELLE – ECHELLE LOCALE –

1. Introduction

Les mouvements de terrain au Rif ont fait l'objet de plusieurs travaux, dont ceux de (Millies-Lacroix, 1968) qui demeure l'un des pionniers dans l'étude de ces mouvements. Dans d'autres travaux (El Fellah, 1994; El Fellah et al., 1996; Margua, 1994; Talhaoui et al., 1999) consacrés à des régions précises du Rif, ont invoqué la combinaison de plusieurs facteurs provoquant l'instabilité de terrain. Cependant des études sur les mouvements dans les pentes signalent que le facteur sismique peut être à l'origine des surpressions interstitielles (Moriwacki et al., 1985).

L'objet de la présente étude est de mettre en évidence la conjonction entre divers facteurs déclencheurs d'instabilité à l'échelle de la zone côtière QUEMADO, l'évaluation de sa vulnérabilité au risque de mouvement de terrain par l'emploi de deux approches d'étude qualitative et quantitative ayant fait l'objet d'études antérieures (Levasseur, 2003 ; Léone, 1996 ; Malet et al., 2006) et l'analyse de mouvement fera l'objet également d'une étude de reconnaissance terrain.

2. Terrain d'étude

2.1. Cadre géologique

La région d'Al Hoceima appartient à la zone interne des unités structurales du Rif résultantes de l'orogénèse de la chaîne alpine. Le Rif interne se compose d'un ensemble d'unités allochtones alpines, empilées les unes sur les autres et séparées par des contacts anormaux (Blumenthal, 1937). Parmi ces unités on trouve la dorsale calcaire externe qui supporte, sous forme de klippe tectonique, les terrains de la dorsale calcaire interne et ceux de la nappe paléozoïque Ghomarides. Ces unités reposent sur les terrains de la dorsale prédorsalienne (semelle tertiaire). L'ensemble de ces formations chevauchent vers le sud les flyschs de Tisirène (Andrieux, 1971 ; Mouriet, 1982 ; Azzouz, 1992) (**Figure 110**). La situation de la zone est présentée par rapport à la feuille topographique d'AL HOCEIMA (**Figure 111**).

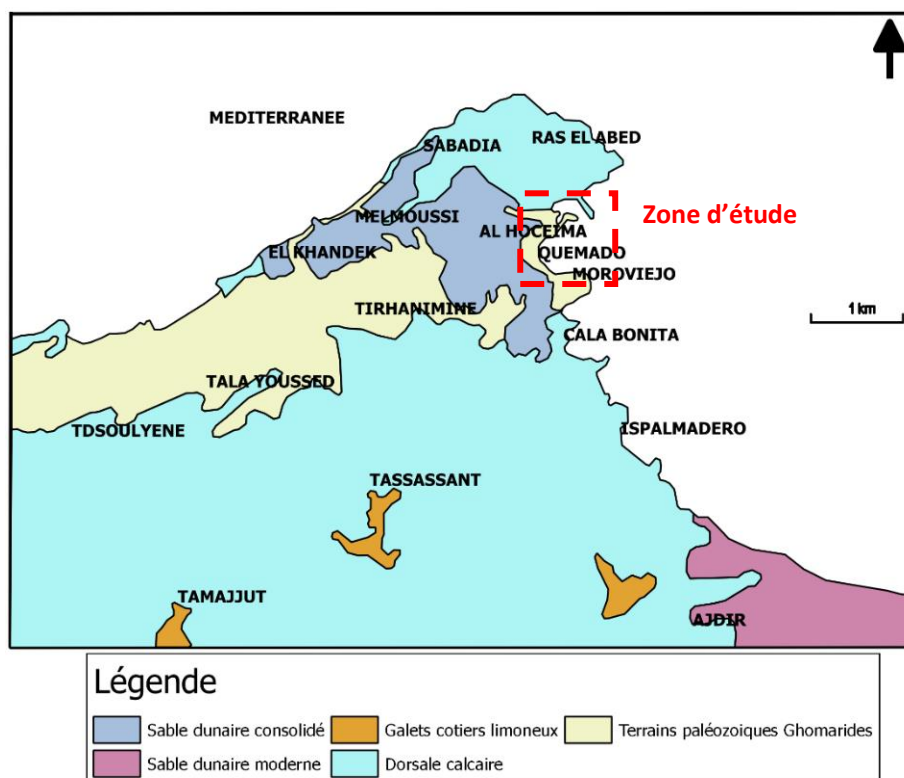


Figure 110: Cadre géologique régional d'Al Hoceima

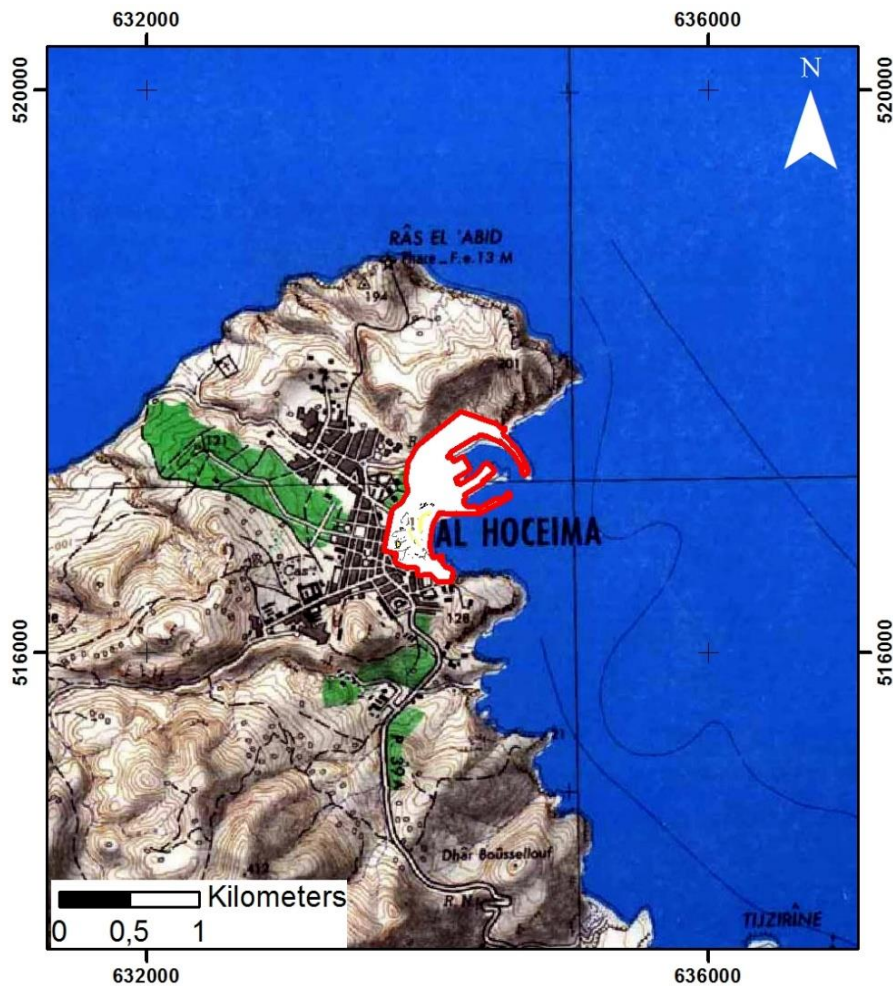


Figure 111: Carte de situation de la zone d'étude sur fond de la carte topographique d'Al Hoceima au 50 000e

Les affleurements carbonatés rigides (les calcaires à silex et dolomie) de la dorsale calcaire externe formant des reliefs remarquables (BOUSSEKKOUR, RAS EL ABED et JBEL ASSAGUASAGUANE) suivis des terrains paléozoïques Ghomarides dénommés localement la Klippe d'Al Hoceima. Cette Klippe s'étend d'Al Hoceima à l'oued BOUSSEKKOUR à l'Ouest avec une stratigraphie en schistes satinés et noirs surmontée par des calcaires dévoniens constituant les points géomorphologiques les plus hauts (SIDI MANSOUR, TALA YOUSSEF et la zone étudiée QUEMADO).

2.2. Cadre sismique

La région d'Al Hoceima peut être présentée comme la plus sismogène au Maroc. Par conséquent, elle est parmi les zones actives les plus étudiées le long de la frontière de plaques diffuse Afrique-Eurasie dans la méditerranée occidentale. Le contrôle tectonique de l'activité sismique dans cet endroit est encore problématique. Les cartes de sismicité de la région montrent un important alignement sismique de direction NE-SW.

Plusieurs tremblements de terre ont pu être considérés dans l'histoire de la région grâce à l'ampleur des désastres qu'ils provoquèrent. Ce n'est qu'à partir du 16ème siècle que les événements majeurs au Maroc ont été documentés. Tirés d'une compilation des séismes historiques des régions magrébines, avec les dégâts humains et matériels. Les séismes ayant affecté la zone d'Al Hoceima sont ceux de 1522, 1624, 1791 et 1800-1802. Concernant la sismicité instrumentale, on compte trois événements majeurs (dont les deux premiers destructeurs), en 1994, 2004 et 2016 ayant des magnitudes modérées entre 5.9 et 6.3 et des mécanismes au foyer similaires.

2.3. Cadre géomorphologique

L'examen du site étudié montre que le versant possède un relief à pentes irrégulières (**Figure 112**), accentuée par l'existence de trois thalwegs larges et par l'action anthropique des aménagements existants et en cours, ce site est délimité au sommet par les constructions de la ville d'Al Hoceima tandis que le pied du versant abrite des bâtiments relevant d'un complexe touristique. En dénivelée, le secteur possède des pentes comprises entre la plage méditerranéenne et 65 m d'altitude, les pentes très irrégulières dont les plus fortes dépassent 40°.

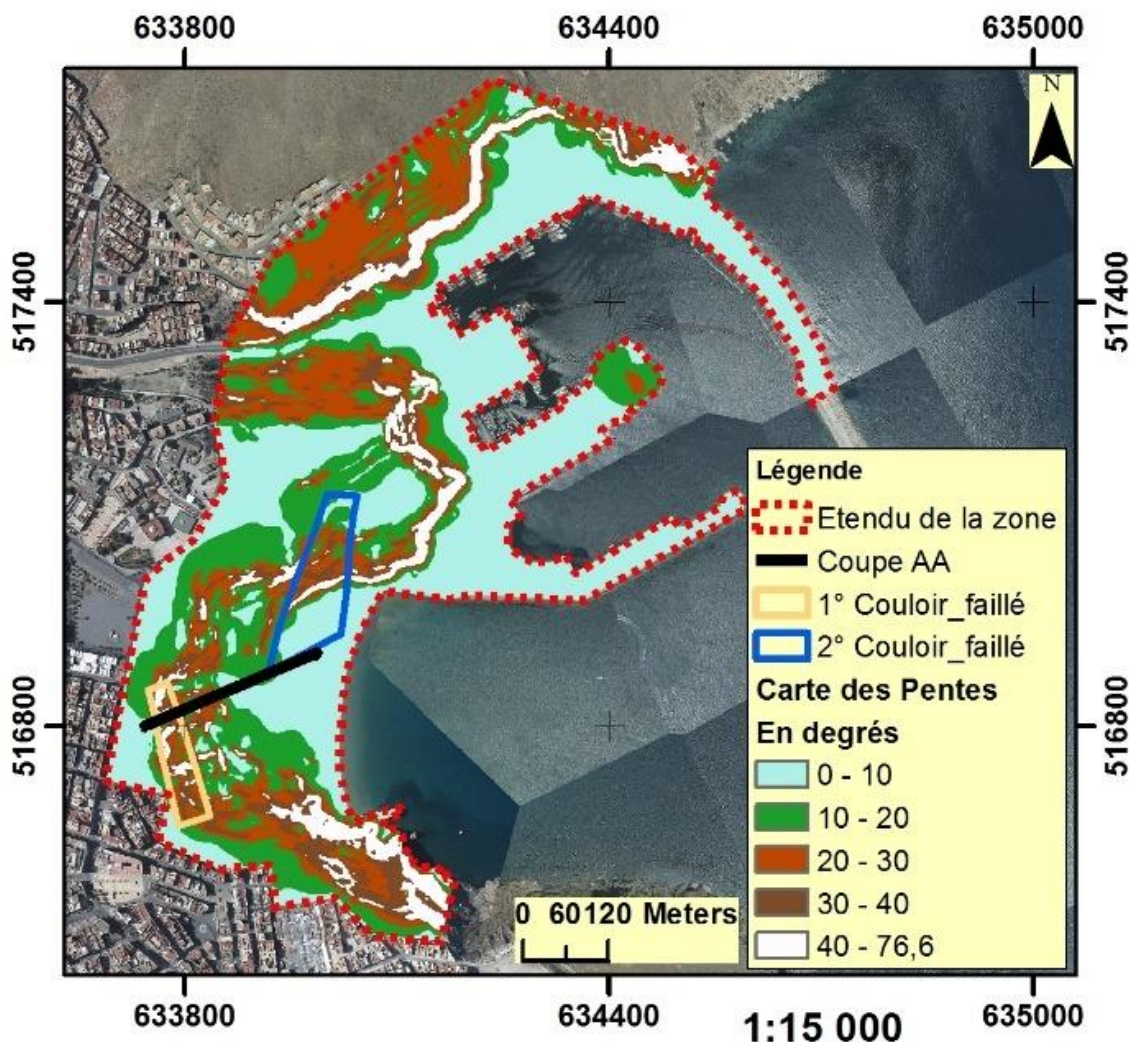


Figure 112: Cadre morphologique du secteur d'étude

2.4. Cadre litho-stratigraphique

L'examen de la zone constituée du versant, reflète l'existence des :

- Pérites schisteuses formant le substratum en profondeur ;
- Calcaires caractérisant la formation massive dans la région. Ils affleurent à la limite Sud-Est de l'emprise du secteur étudié ;
- Dépôts de couverture qui sont en matériau meuble.

A cette couverture à dominance meuble, des masses en blocs rocheux métriques ont été localisées sur le versant Sud de la zone et deux couloirs faillés à structure chaotique ont été individualisés.

Afin d'illustrer d'avantage les constatations émises précédemment, une coupe a été établie pour mettre en évidence les différentes structures et zones à risques existantes (**Figure 113**).

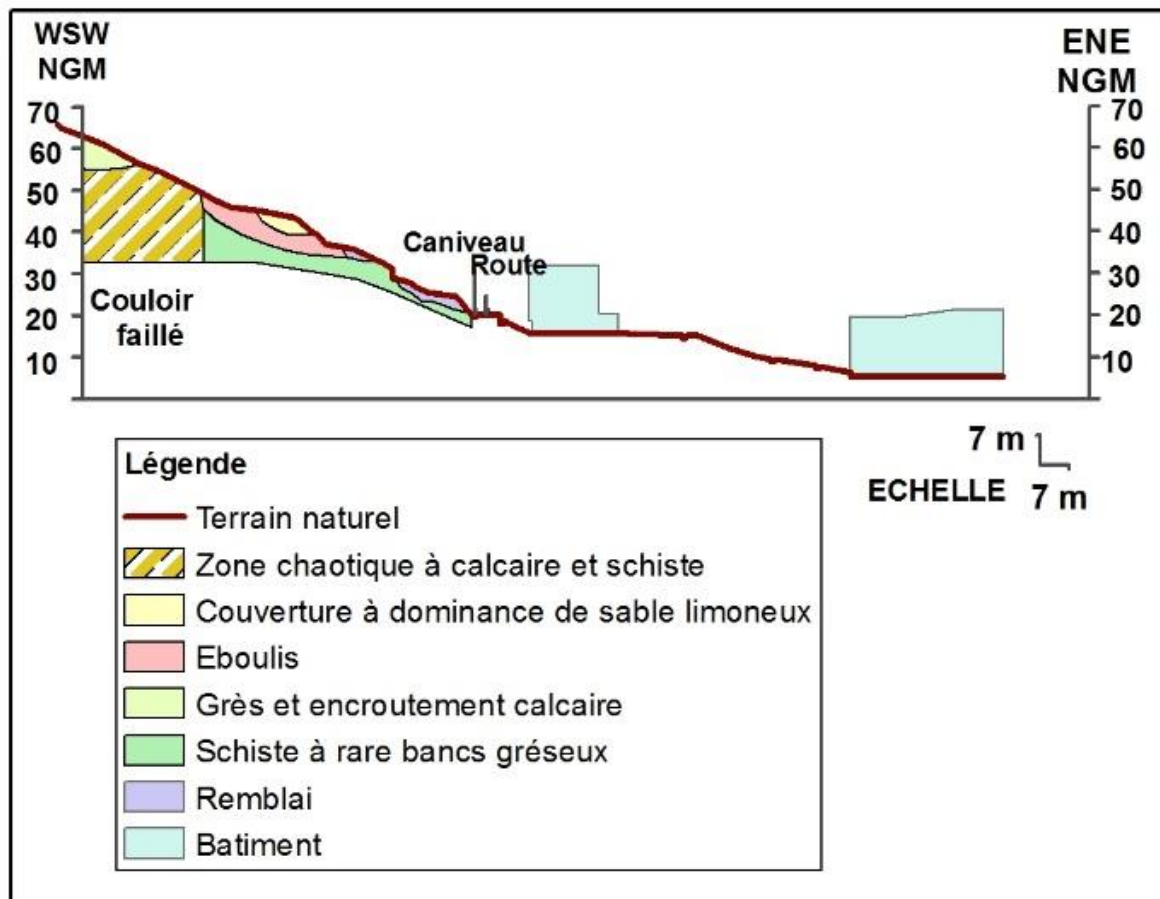


Figure 113: Structures et zones à risques existantes le long de la coupe (AA)

3. Problématique

Le Versant QUEMADO présente un cas de figure de la vulnérabilité du Rif aux risques naturels. Parmi les risques mentionnés, les mouvements de terrain qui se manifestent et prennent une place importante, notamment avec les instabilités de versant et les enjeux économiques et humains existants. Les enjeux d'instabilité de terrain dans la frange littorale sans d'autant plus importants regroupant une activité d'aménagement et fréquentation touristiques intéressante.

Le risque étudié est favorisé par la conjonction de plusieurs paramètres qui relèvent principalement des caractéristiques structurales et topographiques du versant. Les contrastes rhéologiques permettant la concentration des mouvements de terrain dans les niveaux tendres, alors que les masses rigides se fragmentent en blocs aux dépens de leur discontinuité intrinsèque et subissent un déplacement différentiel lorsque les dénivellations topographiques le permettent.

4. Objectifs de l'étude

Afin de contribuer à une meilleure connaissance du risque dans l'espace d'étude, nous avons approfondies l'investigation sur le phénomène de mouvement de terrain et son fonctionnement. Pour cela notre recherche suit une démarche transversale appuyée sur des approches permettant l'évaluation qualitative et quantitative de l'aléa. L'objectif est de comprendre le contexte de vulnérabilité du site, la caractérisation des facteurs de déclenchement et l'évaluation du risque mouvement de terrain à l'échelle de la zone d'étude.

Ainsi, il s'agit de répondre à six objectifs principaux qui sous-tendent l'étude :

- Comprendre le cadre morphologique et structurel du mouvement ;
- Déterminer les facteurs responsables de cette vulnérabilité ;
- Définir les enjeux exposés au risque ;

- Analyser les résultats retrouvés par les deux approches d'évaluation qualitative et quantitative du risque « mouvement de terrain » ;
- Confronter les résultats à une étude de reconnaissance géotechnique localisée ;
- Confronter les résultats à l'étude réglementaire de risque couvrant le secteur d'étude.

5. Hypothèses de déclenchement des mouvements de terrain

Les particularités lithologiques et géotechniques de la zone étudiée permettent de définir les sources de déclenchement des instabilités de terrain suivantes :

- Versant à pente raide et un sol très hétérogène ;
- Versant caractérisé par un substratum rocheux peu à assez profond avec des dépôts de couverture récents ;
- Présence d'écoulements d'eau divers provenant des zones aménagées situées en amont du versant ;
- Charge des constructions en amont du versant ;
- Couloirs faillés occupant la zone et sismicité régionale favorisant le développement des terrains instables.

6. Démarche de l'étude

6.2. Expertise préliminaire du risque

Pour mettre en application l'étude analytique du risque spécifique à la zone, la structuration simplifiée du raisonnement pouvant être suivi lors de l'expertise repose sur une définition de paliers successifs de réflexion et de prise de décision, au niveau desquels l'expert peut par exemple proposer des mesures graduelles de réduction du risque (**Figure 114**).

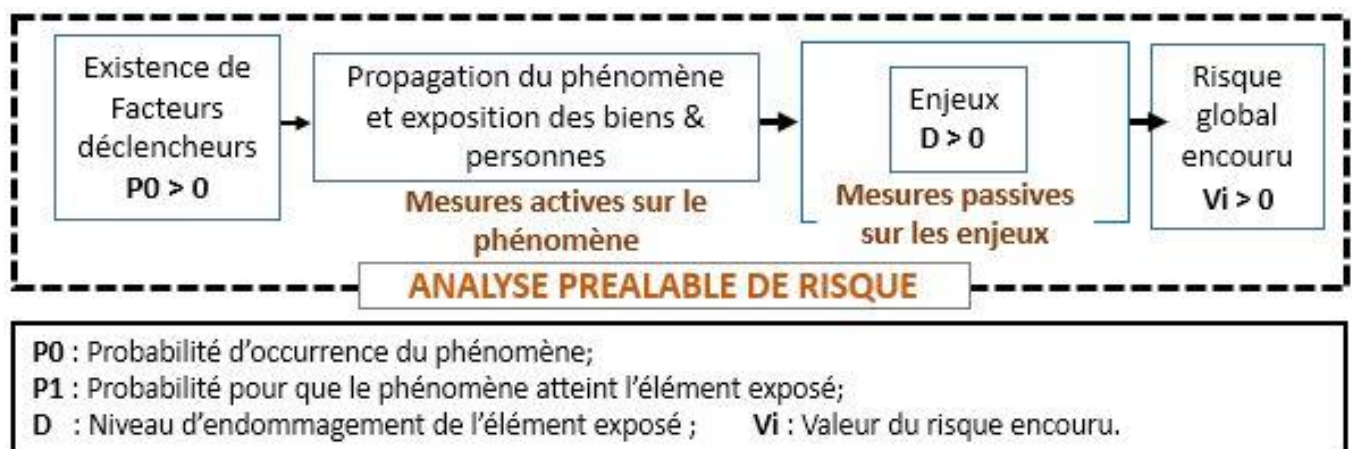


Figure 114: Démarche préliminaire d'expertise du risque

6.3. Identification des facteurs déclencheurs de risque

Pour arriver à réaliser les objectifs assignés, nous avons orienté cette étude en étapes pour appréhender les facteurs responsables du mouvement :

- L'identification et l'observation directe sur le terrain de tous les indices de mouvement et les désordres naturels observés sur le versant ainsi que les désordres affectant les constructions et ouvrages existants (murs de soutènement, caniveaux de drainage, surface de la chaussée, passages en trottoirs et bâtiments) ;
- L'investigation sur la présence des traces d'eau ou surfaces drainées ;
- Le relevé géologique du versant ;
- L'investigation géotechnique sur les caractéristiques mécaniques des matériaux dominant la zone ;

La cartographie des principaux détails existants et les surfaces de mouvement identifiées. L'analyse a été réalisée avec des outils SIG et par usage de l'ensemble des données énumérées dans la suite de la présente étude.

Le relevé des désordres à l'échelle du versant a permis de cartographier les détails des **figures 115, 116 et 117** ci-dessous.

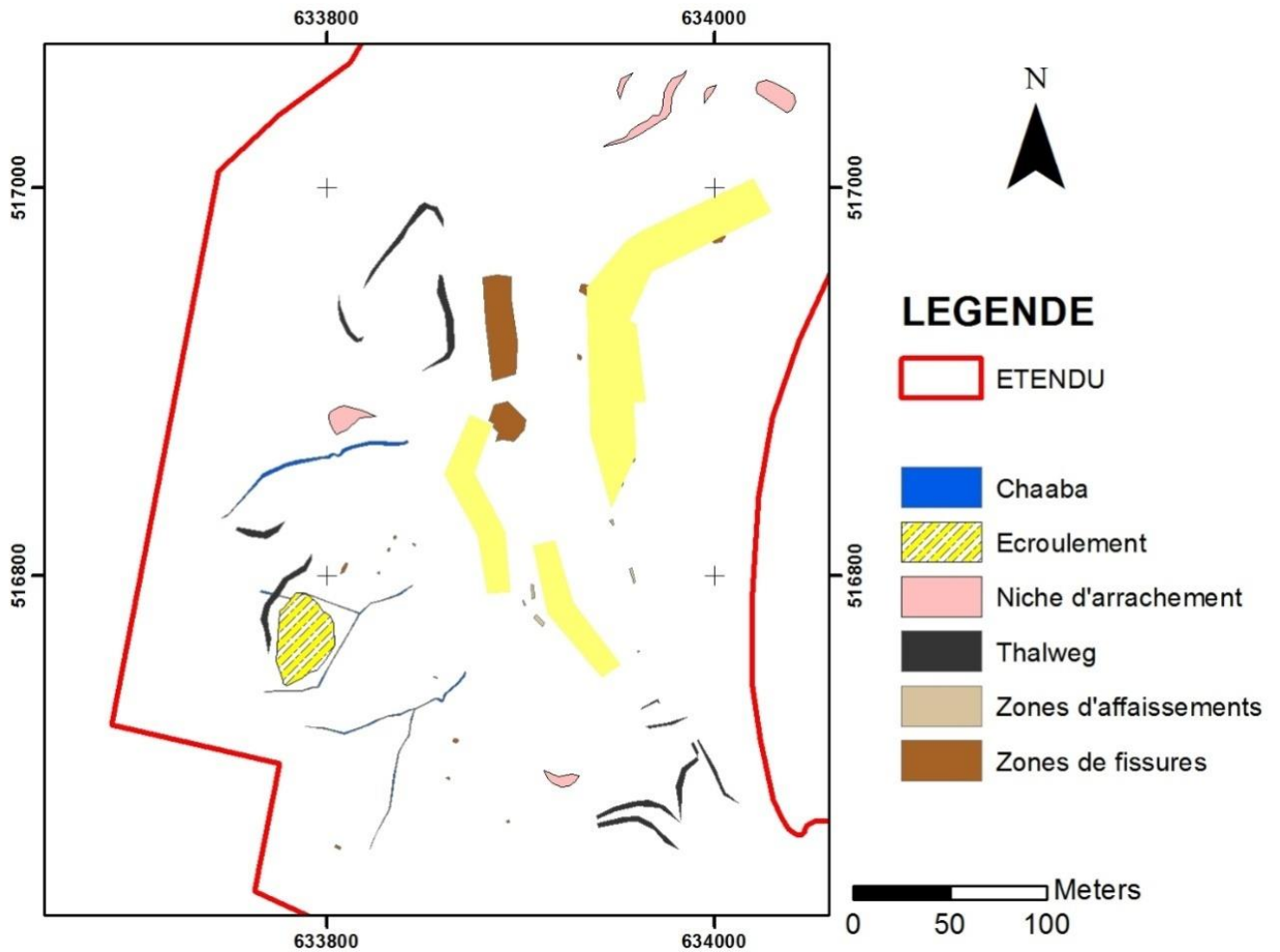


Figure 115: Relevé cartographié des désordres de la zone QUEMADO

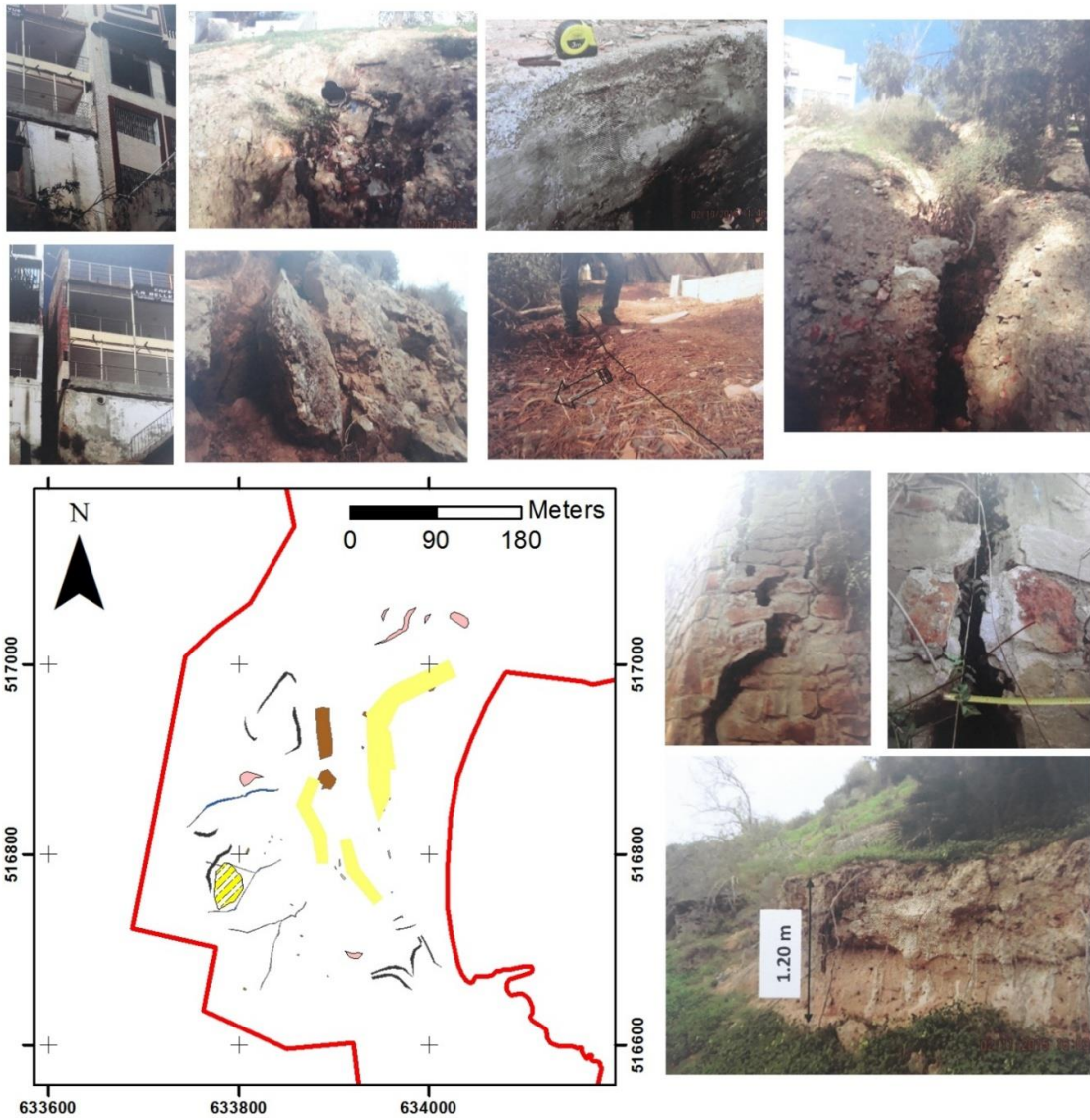


Figure 116: Relevé image des désordres de la zone QUEMADO



Figure 117: Suite du relevé image des désordres de la zone QUEMADO

6.4. Evaluation qualitative du mouvement de terrain

L'analyse et l'évaluation des risques à l'échelle urbaine est un atout des responsables politiques souhaiteront disposer d'une vision globale sur la problématique de vulnérabilité des enjeux. On peut citer quelques études de risque en milieu urbain, comme celles réalisées sur l'agglomération de Cairn en Australie (Michael-Leiba et al., 2003) ou sur la ville de Cologne (Grünthal et al., 2006).

Les trois grandes étapes de l'approche qualitative sont présentées et détaillées ci-dessous.

6.4.1. Cartographie de la susceptibilité au mouvement de terrain

Pour permettre d'évaluer et de quantifier l'impact du phénomène, il est nécessaire de prendre en compte les paramètres physiques ayant engendré l'aléa. L'intensité de chaque paramètre est exprimée suivant des niveaux. Chacun des niveaux correspond à un intervalle de valeurs numériques établi à partir de données disponibles dans la littérature et chaque paramètre est pondéré par un coefficient de poids adapté à notre cas d'étude.

Les échelles établies permettent la réalisation d'une cartographie de susceptibilité des terrains au mouvement.

6.4.2. Analyse et cartographie des enjeux

Trois catégories d'enjeux ont été prises en compte : la densité humaine, le patrimoine bâti (Bâtiments implantés et usages) et le patrimoine foncier aménagé. Cette classification est nécessaire pour permettre d'évaluer les dommages de manière cohérente par rapport aux différentes classes de susceptibilité.

A partir des données disponibles (Bases de données urbaine, photographies aériennes, contrôles de terrain) une carte est établie pour les 5 catégories d'enjeux.

6.4.3. Cartographie du risque

A l'issue des étapes précédentes, on dispose pour chaque entité géographique une classe de susceptibilité au mouvement de terrain et un niveau d'enjeu correspondant à l'endommagement qualitatif envisagé.

6.5. Evaluation quantitative du mouvement de terrain

L'approche d'évaluation quantitative du risque adaptée aux échelles urbaines est fondée sur un calcul et une hiérarchisation de la valeur (monétaire ou non monétaire) (Glade, 2003) des éléments exposés à la vulnérabilité, ainsi qu'une évaluation de la susceptibilité par la méthode de régression logistique (ou régression binomiale) (Thiery et al., 2007). Les cartes résultantes sont classifiées en échelle d'intensité et croisées pour extraire la carte de risque globale. La méthodologie d'évaluation du risque repose sur 2 étapes clés.

6.5.1. Evaluation de la susceptibilité au mouvement de terrain

Cette étape consiste à appliquer la méthode de régression logistique qui est une des méthodes quantitatives de plus en plus utilisées pour ce type d'étude. Elle est basée sur les liens établis entre les variables prédictors du mouvement en calculant sa probabilité d'occurrence pour chaque pixel de la zone d'étude, la probabilité peut prendre des valeurs entre 0 et 1, selon la formule suivante :

$$P = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (4)$$

Où z représente une combinaison linéaire des paramètres prédictors du risque X_1, X_2, \dots, X_n :

$$z = b + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n \quad (5)$$

Avec b le terme libre du modèle et les coefficients a_i de la régression.

Les paramètres prédictors retenus dans le cadre de cette étude ayant un niveau élevé de représentativité sont : la pente (X_1), l'orientation du terrain (X_2), la distance du réseau hydrographique (X_3), la distance des

désordres naturels constatés (X_4), la susceptibilité de déplacement des formations géologiques (X_5), la distance des contacts anormaux et couloirs faillés (X_6) et la distance des confortements du sol réalisés (X_7) (Margarint et al., 2011).

6.5.2. Hiérarchisation des éléments exposés

Les éléments exposés présents dans la zone d'étude sont recensés, identifiés et classés par catégories d'éléments : réseaux, occupation du sol, bâti et ouvrages. L'identification s'effectue grâce aux photos aériennes, aux cartes d'occupation du sol au 1/2000^e et au travail de terrain.

Les grands types d'enjeux sont définis. Ainsi, nous pouvons distinguer :

- Les enjeux structurels qui correspondent aux conséquences physiques sur les biens, les infrastructures, les bâtiments ou l'occupation du sol ;
- Les enjeux fonctionnels concernent les conséquences sur le déroulement des activités sociales et économiques ;
- Les enjeux corporels considèrent les hommes dans leur intégrité physique et traduisent alors la vulnérabilité humaine.

Cette hiérarchisation se fait en attribuant un indice de dommages potentiels, calculé en fonction d'une valeur quantitative monétaire ou non affectée à chaque élément exposé. Cet indice, inspiré du coefficient d'endommagement potentiel (9), définit le niveau de conséquences et de pertes potentielles en cas de mouvement de terrain. L'indice, compris entre 0 et 100, est défini grâce aux données économiques sur la valeur des éléments exposés.

7. Extraction des paramètres

7.2. Approche qualitative

L'élaboration de la carte de susceptibilité au mouvement de terrain est extraite par une équation de cartographie algébrique en utilisant les valeurs numériques des cartes paramétriques figurant au **tableau 20**.

Tableau 20: Paramètres de prédisposition au risque et pondérations attribuées

Paramètres	Intitulé du paramètre	Echelles d'intensité	Pondération
Topographie	Pente de terrain (P)	5	4
	Orientation de la pente de terrain (O)		2
Hydrographie	Distance du réseau hydrographique (H)		3
Désordres	Distance des désordres naturels constatés (D)		3
Géologie structurale	Susceptibilité au déplacement (G)		4
Structure sismique	Distance des contacts anormaux et couloirs faillés (F)		4
Confortement	Distance des confortements réalisés (C)		3

Dans le cadre de cette étude, la susceptibilité est évaluée, pixel par pixel, par l'équation.

$$S = \frac{[4 \times P + 2 \times O + 3 \times H + 3 \times D + 4 \times G + 4 \times F + 3 \times C]}{23} \quad (6)$$

L'attribution d'une pondération aux différents paramètres influençant sur la stabilité du terrain est une étape cruciale de l'évaluation du risque tributaire de notre jugement orienté par les travaux scientifiques antérieurs (Mejia Navarro et al., 1994 ; Aronoff, 1989) et les investigations terrain.

L'identification cartographique des enjeux exposés (Biens et humains) nécessite la caractérisation des données en échelle de valeurs d'endommagement. Ces échelles sont traduites en termes d'impacts sur les valeurs humaines, fonctionnelles et économiques (**Tableau 21**).

Tableau 21: Valeurs d'endommagement humaines, fonctionnelles et économiques attribuées

Carte d'enjeux	Intitulé du paramètre			Valeurs attribuées
Fonctionnelles et économiques (FE)	Patrimoine foncier	Aménagé	Aménagements structurants	3
			Voirie	2,5
			Surfaces artificielles	2
		Naturel	Terrain nu	1
			Espace vert	0.6
			Forêt	0.3
	Patrimoine bâti	Habitat		5
		Equipements		4,5
		Installations touristiques		4
		Dépendances		2
Humaines (H)	Densité humaine	Forte	5	
		Moyenne	9/2	
		Faible	4	

Deux cartes d'enjeux résultantes ont été combinées pour extraire la carte des enjeux exposés classifiée par la suite en cinq classes d'enjeux (Très faibles, faibles, moyens, forts et très forts).

$$E = \frac{[FE + H]}{2} \quad (7)$$

Le croisement systématique de ces cartes permet ensuite d'évaluer le niveau de risque, par catégorie d'enjeu et classe de susceptibilité (**Tableau 22**) en multipliant les valeurs de classes ($E_i \times S_i$).

Tableau 22: Croisement des cartes de susceptibilité et d'enjeux

	S1 : Très faible	S2 : Faible	S3 : Moyenne	S4 : Forte	S5 : Très forte
E1 : Très faibles	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible	Très faible
E2 : Faibles	Très faible	Très faible	Très faible	Faible	Faible
E3 : Moyens	Très faible	Très faible	Faible	Faible	Moyen
E4 : Forts	Très faible	Faible	Faible	Moyen	Fort
E5 : Très forts	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort

7.3. Approche quantitative

Un réseau de points répartis sur le secteur d'étude a permis de retrouver les coefficients du modèle ($b, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$), les valeurs calculées correspondent aux poids de chaque paramètre prédicteurs du mouvement. La pertinence du modèle a été validée par un test statistique Chi2 et les valeurs de susceptibilité ont été classifiées en 5 classes de probabilités comprises entre 0 et 1 : Très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

Les valeurs monétaires des typologies d'occupation du sol existantes et les valeurs hiérarchisées correspondantes aux catégories des éléments exposés (structurels, fonctionnels et corporels) au mouvement sont résumées au tableau ci-dessous (**Tableau 23**).

Tableau 23: Valeurs attribuées des enjeux

	Enjeu structurel (ES)	Enjeu fonctionnel (EF)	Enjeu corporel (EC)
	Valeur monétaire en MAD/m ² (Valeur hiérarchisé)	Valeurs attribuées	Valeurs attribuées
<ul style="list-style-type: none"> • Aménagements structurants ; • Voirie ; • Surfaces artificielles. 	600 (8) 400 (5,3) 200 (2,7)	60 70 50	50 60 45
<ul style="list-style-type: none"> • Espace vert ; • Forêt ; • Eau ; • Sol nu. 	150 (2) 200 (2,7) 100 (1,3) 700 (9,3)	20 40 30 20	30 25 15 30
<ul style="list-style-type: none"> • Plancher habitable ; • Plancher d'équipement ; • Plancher touristique. 	5500 (73,3) 4000 (53,3) 7500 (100)	100 90 80	100 70 80

8. Résultats

8.1. Approche qualitative

La carte de susceptibilité au mouvement de terrain qualitative est extraite par l'usage des paramètres prédictifs de risque avec des poids relatives. La classification de la carte résultante a mis en évidence 5 classes de susceptibilité (Figure 118).

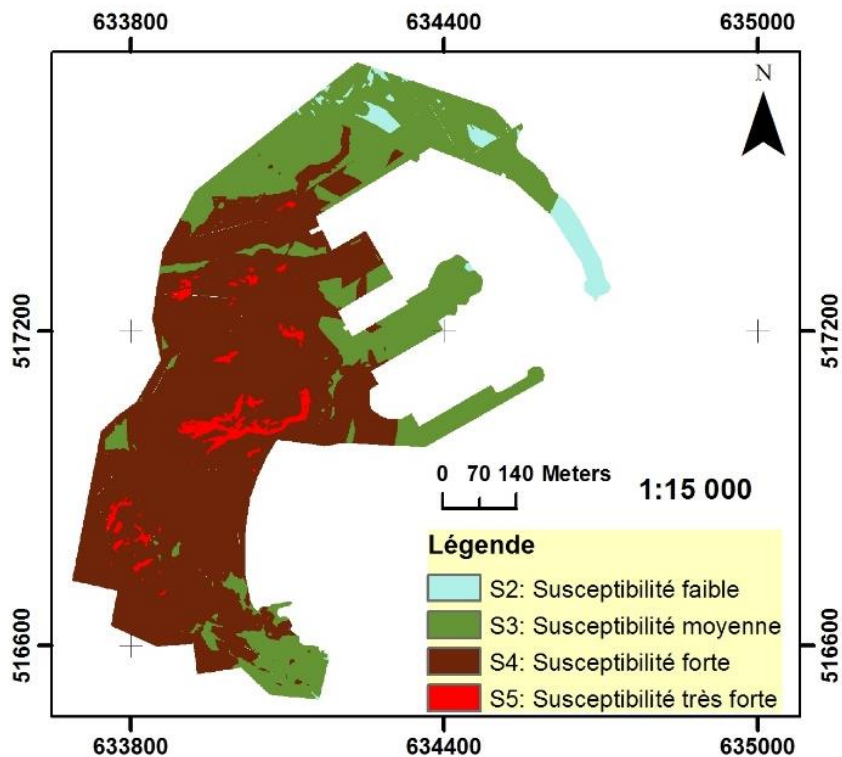


Figure 118: Carte de susceptibilité qualitative aux mouvements de terrain

La transformation des enjeux exposés au risque mouvement de terrain (Fonctionnels/économiques FE et humains H) en valeurs significatives et la combinaison des cartes d'enjeux a permis d'extraire la carte d'enjeux relative à la zone d'étude (Figure 119).

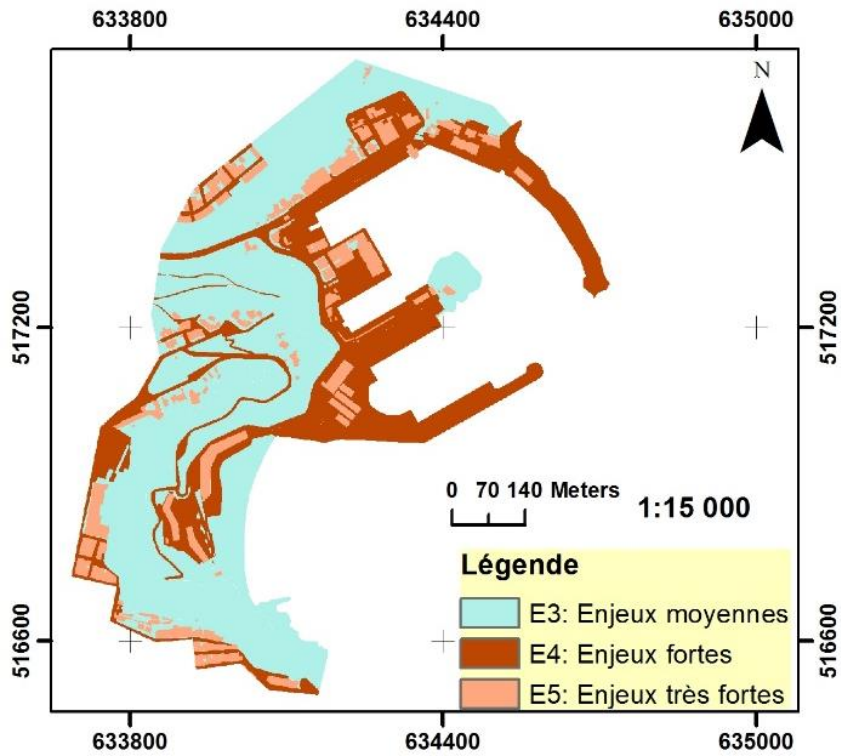


Figure 119: Carte des enjeux qualitatifs exposés aux mouvements de terrain

La carte de risque globale (Figure 120) est retrouvée par croisement des cartes classifiées de susceptibilité et enjeux qualitatives.

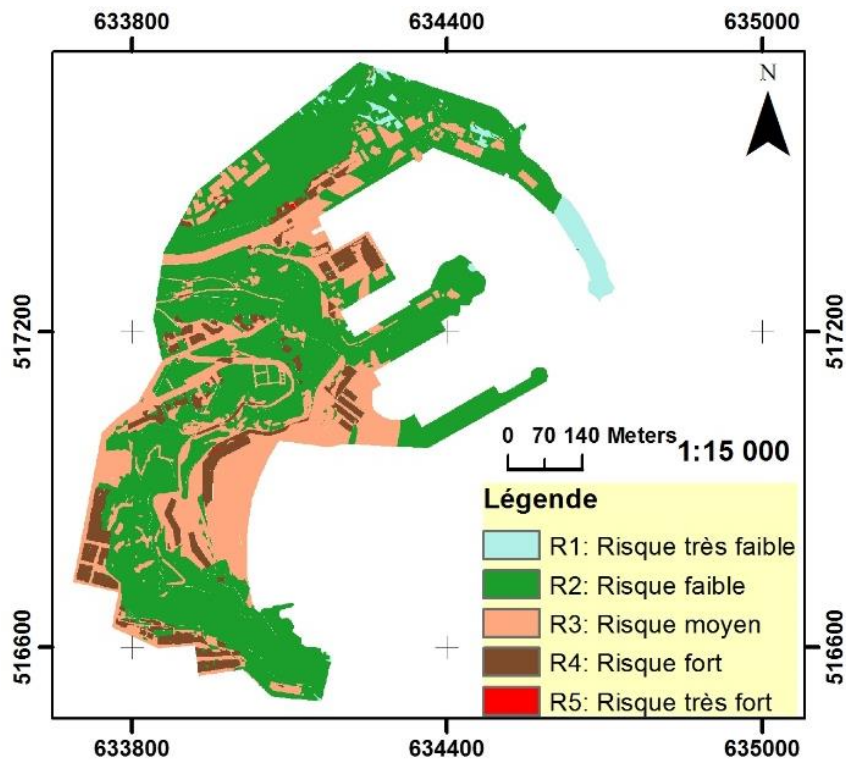


Figure 120: Carte du risque global qualitatif des mouvements de terrain

8.2. Approche quantitative

Le réseau binaire de points obtenu pour le secteur d'étude contient un nombre de points sensiblement équivalent à 18494. Comme la régression logistique permet de choisir les paramètres prédictifs ayant les degrés significatifs de représentativité. La probabilité d'occurrence des mouvements de terrain a été déterminée par les paramètres de prédisposition choisis précédemment en calculant leurs poids (**Tableau 24**). Les pourcentages de la classification correcte des surfaces prédites avec mouvement de terrain et zones sans mouvement, pour une valeur de coupe de 0,5 sont donnés au **tableau 25**.

Tableau 24: Calcul des poids des paramètres de prédisposition

Variable (Identifiant du modèle)	Valeur	Erreur	e^{a_i}	Intervalle de confiance à 95% pour e^{a_i}	
				Inférieur	Supérieur
Pente a_1	0,088	0,002	1,092	1,088	1,096
Orientation de la pente a_2	0,000	0,000	1,000	1,000	1,000
Distance du réseau hydrographique a_3	0,005	0,001	1,005	1,004	1,006
Distance des désordres naturels a_4	-0,011	0,000	0,989	0,988	0,990
Géologie : Susceptibilité au déplacements a_5	0,255	0,025	1,291	1,230	1,354
Distance des contacts anormaux et couloirs faillés a_6	0,004	0,000	1,004	1,004	1,005
Distance des confortements a_7	-0,002	0,000	0,998	0,997	0,998
Constante du modèle (b)	-2,238	0,105	0,107		

Tableau 25: Calcul des valeurs de validation de la classification

	Valeurs de classification	
	Présence prédite	Absence prédite
Mouvement de terrain	93,6	6,4
Sans mouvement	50,9	49,1

L'application du modèle retrouvé a permis d'extraire la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain classifiée en 5 classes d'intensité (**Figure 121**).

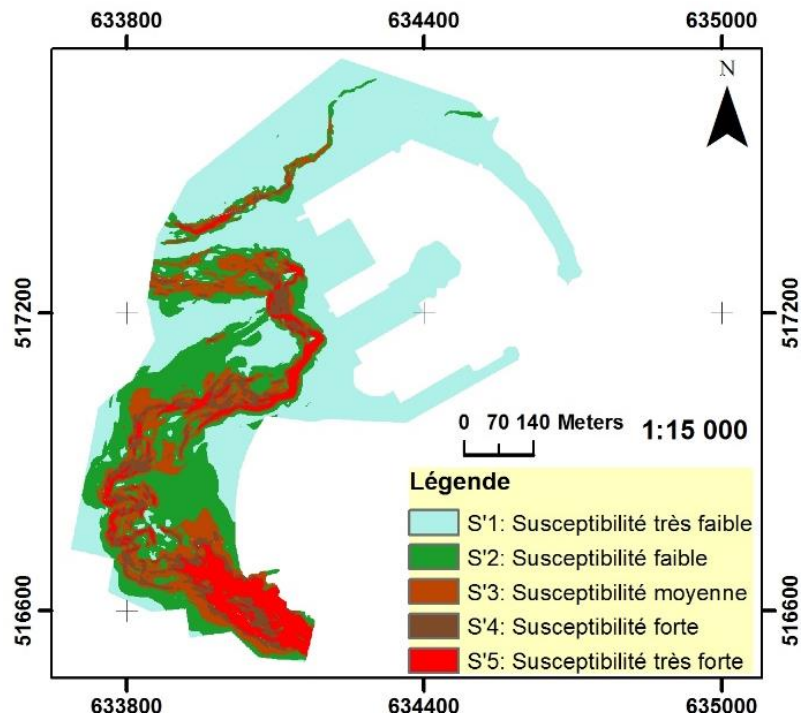


Figure 121: Carte de susceptibilité quantitative aux mouvements de terrain

La carte des enjeux (E') relative au secteur d'étude a été extraite en suivant une règle définie qui consiste à retenir la valeur de dommage la plus haute parmi les valeurs des enjeux structurels, fonctionnels et corporels, ainsi La classification de la carte est faite en 5 classes de valeurs (**Figure 122**).

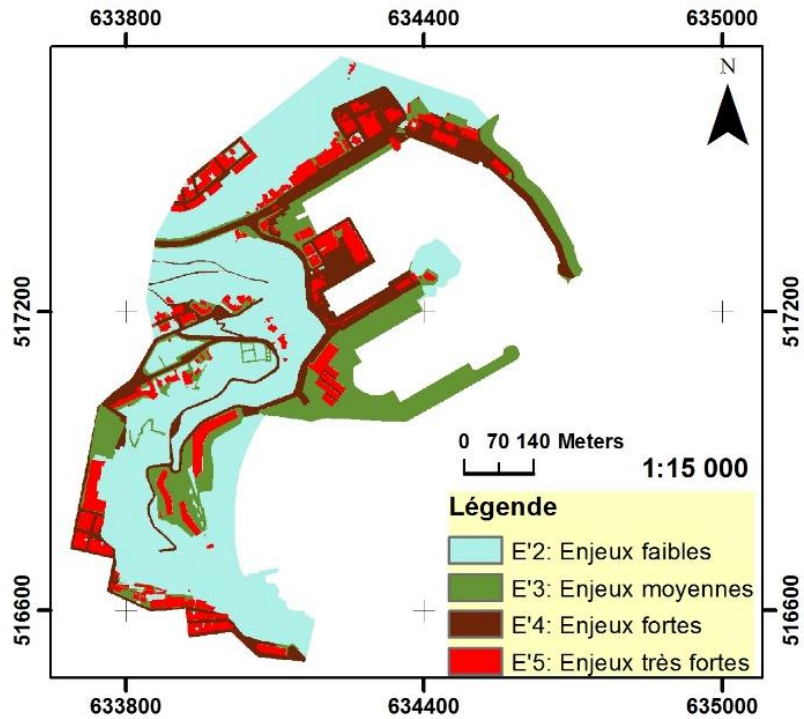


Figure 122: Carte des enjeux quantitatifs exposés aux mouvements de terrain

Le croisement des deux cartes permet ensuite d'évaluer le niveau de risque et de retrouver la carte de risque globale (**Figure 123**).

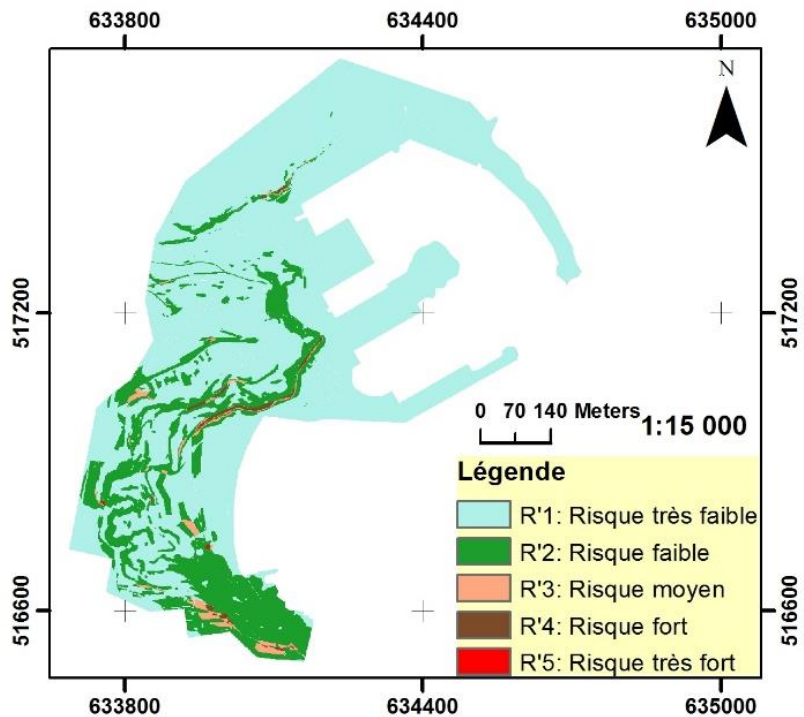


Figure 123: Carte du risque global quantitatif des mouvements de terrain

9. Discussion

La zone d'étude est sujette au risque de mouvement de terrain vue son contexte géologique et morphologique. A cet effet, l'étude a nécessité l'introduction des paramètres prédicteurs du risque (La pente du terrain, la distance du réseau hydrographique, la distance des désordres naturels, la sensibilité de la géologie structurale au déplacement, la distance des contacts anormaux et des couloirs faillés et la distance des confortements réalisés).

L'affectation des poids à chaque paramètre de prédisposition est une étape décisive dans la perception de l'aléa et exige impérativement une connaissance des particularités de la zone et le jugement de l'expert. La comparaison des pondérations intégrées dans le modèle qualitatif aux coefficients calculés par la régression logistique remet en lumière le rôle essentiel que jouent les formations géologiques et la pente topographique dans la répartition des mouvements de terrain à région d'Al Hoceima (Talhaoui et al., 2005) (**Tableau 26**).

Tableau 26: Coefficients de pondération retrouvés par les deux approches

Paramètres de prédispositions	Coefficients de pondération retrouvés par régression	Coefficients de pondération introduits qualitativement
Pente	0,088	4,0
Orientation de la pente	0,000	2,0
Distance du réseau hydrographique	0,005	3,0
Distance des désordres naturels	-0,011	3,0
Susceptibilité géologique	0,255	4,0
Distance des contacts anormaux et couloirs faillés	0,004	4,0
Distance des confortements	-0,002	3,0

En étudiant individuellement les coefficients de la régression liés à chaque variable explicative, au risque de 5 %, nous constatons que la pente et la géologie semblent jouer dans le sens positif un rôle important au déclenchement des instabilités de terrain. Le succès de la régression logistique repose justement sur la possibilité d'analyser de façon fine et mettre en évidence les facteurs qui pèsent réellement sur la susceptibilité au risque.

A propos des classes enjeux correspondantes à la susceptibilité, il faut préciser que la carte d'enjeux issue de l'approche quantitative présente des valeurs faibles généralement.

Les résultats acquis par application des démarches présentées au paragraphe précédent (démarche qualitative et quantitative de cartographie du risque total) ont permis d'établir deux cartographies ayant des proportions du risque « mouvement de terrain » différentes en s'appuyant sur les fonctionnalités offertes par les SIG. Le risque quantitatif est très faible à moyen sur 99,3 % de l'aire d'étude

A cette analyse, une mission d'investigation terrain a été exécutée pour évaluer la pertinence des démarches d'étude du risque. L'expertise comporte des relevés géologiques et une reconnaissance par sondage. Les constatations ont permis de soulever les conclusions suivantes :

Les mouvements de terrain au niveau de la zone nous ramènent à subdiviser celle-ci en 2 grandes catégories spatiales (**Figure 124**) :

- Catégorie 1 (Susceptibilité fort) : L'emprise des talwegs situés en amont des projets touristiques que connaît des signes d'instabilité plus ou moins prononcés (désordres naturels, couloirs faillés, venues d'eau de l'amont et caractéristiques mécaniques faibles du sol) avec des pentes raides et moyennes ;

- Catégorie 2 (Susceptibilité faible) : La partie reliant les talwegs à la limite du versant qui a une apparence relativement stable avec des pentes faibles et un aménagement contribuant à la stabilisation du terrain.

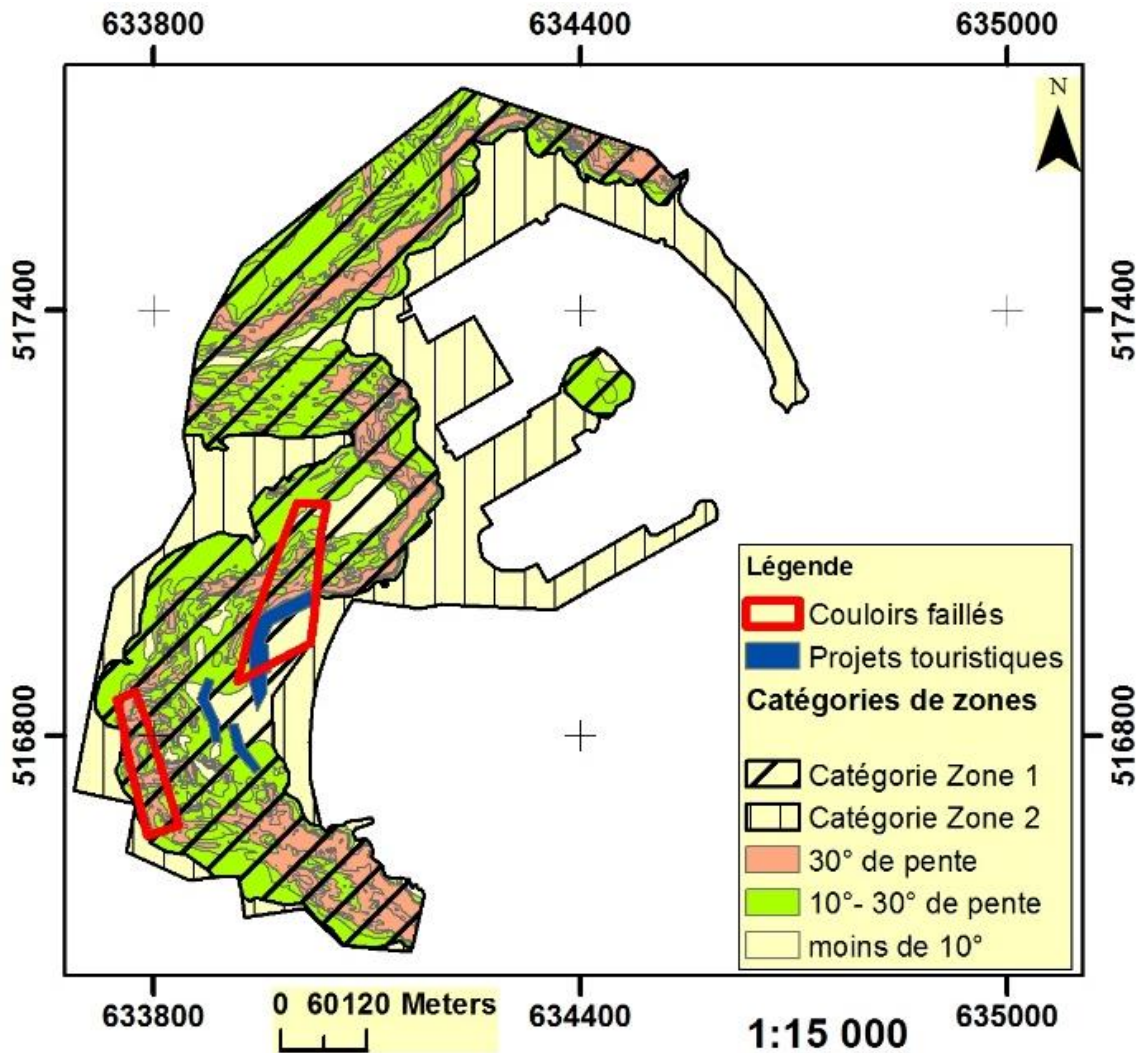


Figure 124: Constatations et catégories spatiales de risque par investigations terrain

La confrontation des deux catégories de susceptibilité spatialisées (**Figure 124**) aux cartes de susceptibilité extraites précédemment (**Figures 118 et 121**) montre que l'approche quantitative est plus proche en résultats, offre un zonage plus fin et des poids objectifs attribués à chaque paramètre de prédisposition.

La contribution de la topographie de la zone (pente) et sa géologique dans la perception de la susceptibilité est très significative ce qui est expliqué par les poids de régression logistique retrouvés, d'autant plus que, les hypothèses de déclenchement du phénomène ont été vérifiés par l'introduction des paramètres de pente, géologie, action des eaux de drainage et l'existence de structures sismiques.

10. Conclusion

Les mouvements de terrain du versant QUEMADO sont favorisés par la combinaison de plusieurs paramètres qui relèvent principalement des caractéristiques géologiques et structurales, la pente raide, l'action anthropique et les traces de désordre naturel identifiés (traces de drainage, affaissements, fissures ...). A cela s'ajoute une contribution significative du contexte sismique de la zone du Rif et son effet déclencheur.

Comme il a été décrit dans des travaux antérieurs (Margua, 1994), la répartition des mouvements de terrain se concentre à proximité des falaises ou le long des versants accidentés des principaux cours d'eau. L'examen du secteur d'étude montre que cette donnée se manifeste clairement et coïncide également avec une proximité des principales failles de la région.

Les approches d'évaluation du risque mouvement de terrain appliquées montrent l'intérêt particulier de disposer le territoire d'un zonage continu permettant d'apprécier l'intensité des phénomènes naturels. Les modèles qualitatifs et quantitatifs ont été choisis dans des contextes variés, selon le type, le nombre et la qualité des données existantes, mais l'effort d'évaluer la pertinence de l'une des approches nécessite plus d'intérêt scientifique.

L'approche qualitative nécessite l'adaptation des coefficients attribués à chaque paramètre de façon à exprimer sa contribution, contrairement à l'approche quantitative (régression logistique binaire) qui est plus objective (calcul des poids de façon probabiliste et qualification des enjeux à la base des valeurs réel des enjeux exposés) et fournit des résultats qui se confirment par les investigations terrain, les relevés géologiques et l'identification des désordres naturels.

La cartographie quantitative du risque mouvement de terrain appliquée au versant QUEMADO est faite en combinant la méthode de régression logistique pour l'extraction de la susceptibilité et l'approche intégrant des considérations de valeurs des objets exposés pour l'obtention de la carte des enjeux. L'échelle de production des cartes élaborées dans le cadre de l'étude est locale (2000^e, échelle des données de base).

CHAPITRE X : ANALYSE COMPARATIVE DES RESULTATS

I. RESULTATS COMPARES AUX ETUDES SIMILAIRES EN MATIERE DE VULNERABILITE

L'étude de la vulnérabilité sismique faite par (Cherif S. et al. 2017) repose sur le calcul de l'indice de vulnérabilité introduit par le projet RISK-UE. Elle nécessite l'attribution des coefficients à chaque détail exposé à l'aléa selon trois composantes : V_i en fonction de son type ; $\sum V_{MJ}$ en fonction de la performance sismique des bâtiments (degré de maintenance, nombre d'étage, irrégularité en plan et en hauteur), morphologie du site, etc.) et en fonction d'un paramètre régional ΔM_R (équivalent à 0 pour des zones restreintes ; cas de l'étude). Cette approche appliquée par Cherif S. et al. 2017, ressemble de point de vue algébrique à ceux utilisées dans le cadre de nos travaux de recherche.

La zone étudiée par l'étude de Cherif S. et al. 2017 couvre exactement celle objet de notre deuxième cas d'étude, à l'échelle de la ville d'Al Hoceima. Elle nécessite la classification des enjeux exposés à l'aléa sismique sous forme de catégories ayant des caractères similaires : villa (construction unifamiliale), maison traditionnelle, maison moderne, maison rurale ... ceci pour faciliter l'attribution des valeurs des trois composantes : V_i (décrivant le type du bâtiment) (Tableau 30) ; $\sum V_{MJ}$ caractérisant le comportement structural en fonction de plusieurs paramètres : matériaux de construction, état de maintenance, nombre d'étages, géométrie 2D, irrégularité en élévation, ...) (Tableau 27)

Tableau 27: Valeurs V_i pour le calcul de l'index de vulnérabilité pour des types de structures selon le projet RISK-UE

Typology	Description	V_i representative values				
		$V_{I,BTM}^{min}$	$V_{I,BTM}^-$	$V_{I,BTM}^*$	$V_{I,BTM}^+$	$V_{I,BTM}^{max}$
M1.1	Rubble stone, fieldstone	0.62	0.81	0.873	0.98	1.02
M1.2	Simple stone	0.46	0.65	0.74	0.83	1.02
RC1	Concrete Moment Frames	-0.02	0.047	0.442	0.8	1.02
RC2	Concrete shear walls	-0.02	0.047	0.386	0.67	0.86
RC3.1	Regularly infilled walls	-0.02	0.007	0.402	0.76	0.98
RC3.2	Irregular frames	0.06	0.127	0.522	0.88	1.02
S1	Steel Moment Frames	-0.02	0.467	0.363	0.64	0.86
S2	Steel braced Frames	-0.02	0.467	0.287	0.48	0.7
W	Wood structures	0.14	0.207	0.447	0.64	0.86

Tableau 28: Valeurs V_m pour le calcul de l'index de vulnérabilité pour chaque bâtiment selon le projet RISK-UE

Vulnerability Factors		Code Level		
		Pre or Low	Medium	High
Code Level		+0.16	0	-0.16
Bad Maintenance		+0.04	+0.02	0
Number of floors	Low (1,2)	-0.04	-0.04	-0.04
	Medium (3,4,5)	0	0	0
	High (6 or more)	+0.08	+0.06	+0.04
Plan Irregularity	Shape	+0.04	+0.02	0
	Torsion	+0.02	+0.01	0
Vertical Irregularity		+0.04	+0.02	0
Short column		+0.02	+0.01	0

Bow windows		+0.04	+0.02	0
Aggregate buildings (insufficient aseismic joint)		+0.04	0	0
Foundation	Beams	-0.04	0	0
	Connected beams	0	0	0
	Isolated footing	+0.04	0	0
Soil Morphology	Slope	+0.02	+0.02	+0.02
	Cliff	+0.04	+0.04	+0.04

La cartographie résultante de la vulnérabilité par application de l'approche du projet RISK-UE présente des valeurs entre 0.2 et 0.9 avec une moyenne de 0.49, la zone la plus vulnérable correspond aux quartier MERADOR BAS, MIRADOR HAUT et MOROVIEKHO, alors que les valeurs les moins vulnérables se trouvent sur les zones de SIDI ABED (RAS EL ABED), BADES et CALABONITA.

D'autres cartes produites par Cherif S. et al. 2017 au sens physique, démographique et financier par approche statistique et approche probabiliste. Nous pouvons confirmer les résultats en faisant référence à l'âge et la structure des bâtiments par quartier, pourtant près de la moitié de la zone correspond à une zone non résidentielle, d'après Cherif S. et al. 2017, selon les anciennes données d'occupation du sol de l'époque (entre 2000 et 2004) et les données du RGPH 2004) en plus d'une classification par ilot qui ne remonte pas à l'échelle du détail/projet/enjeu.

La vulnérabilité des enjeux exposés aux mouvements de terrain, évaluée dans le cadre de notre étude (premier cas d'étude à une échelle moyenne), se base sur le calcul des indexes urbains : physiques (composante humaine et démographique) et socioéconomiques.

La démarche développée par (Safeland, 2012) a été utilisée en intégrant des adaptations pour se conformer aux conditions de la ville d'Al Hoceima. Les indexes calculés et cartographiés sont énumérés ci-dessous (**Figure 125**).

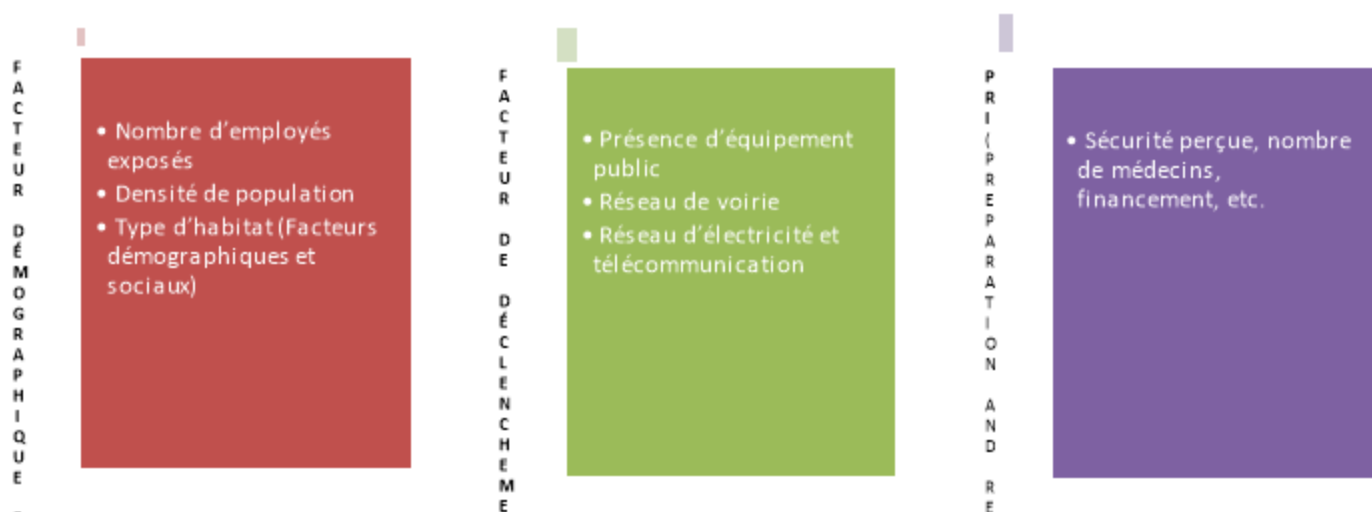


Figure 125: Indexes de la démarche développée par (Safeland, 2012) pour l'évaluation de la vulnérabilité

Notre cartographie élaborée à très grande échelle se distingue par la prise en considération de façon conjointe de la dimension physique, sociale et économique, ainsi nous pouvons confirmer que notre approche est globale au sens des détails cartographiés (bâtiments, voirie, équipements, réseaux d'énergie et électricité ; population, densité, catégorie des bâtiments, ressources allouées, etc.) et plus précise en intégrant le plan de ville à l'échelle 2000°, ainsi nous pouvons représenter des détails de l'ordre de 40cm en représentation continue (toute la surface de la ville hiérarchisée et pondérée).

Les **figures 126, 127, 128 et 129** représentent la carte de vulnérabilité sismique élaborée par Cherif et al. (2017) et la **figure 130** correspond à celle élaborée dans le cadre de notre travail de recherche (Quatrième partie : chapitre IV).

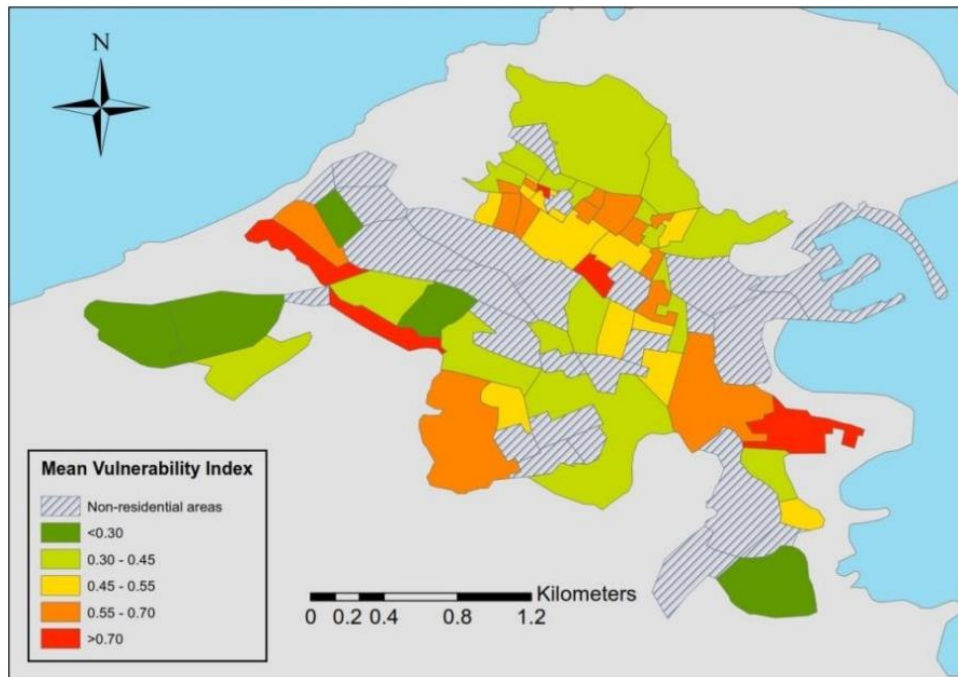


Figure 126: Carte des index de vulnérabilité sismique de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)

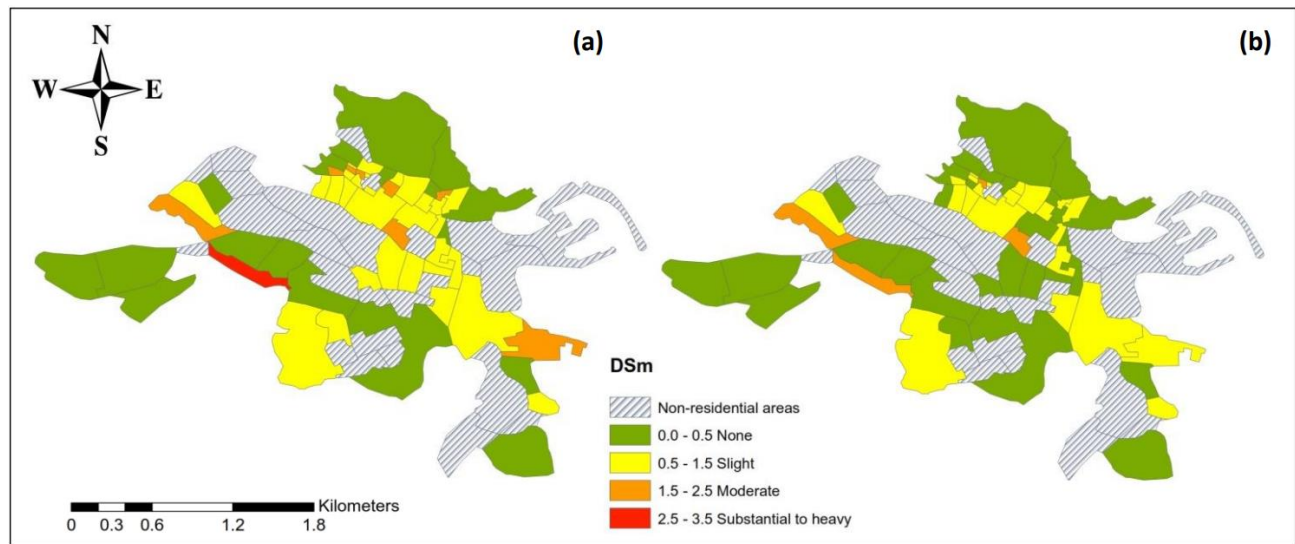


Figure 127: Carte des dommages physiques au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)

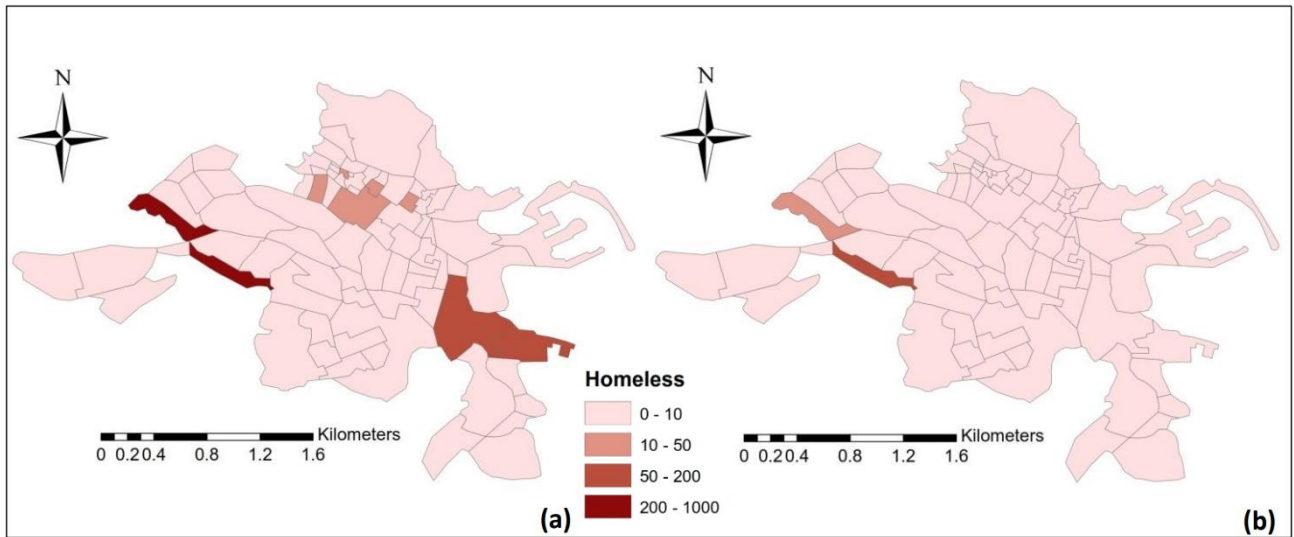


Figure 128: Carte des habitants sans abri au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)

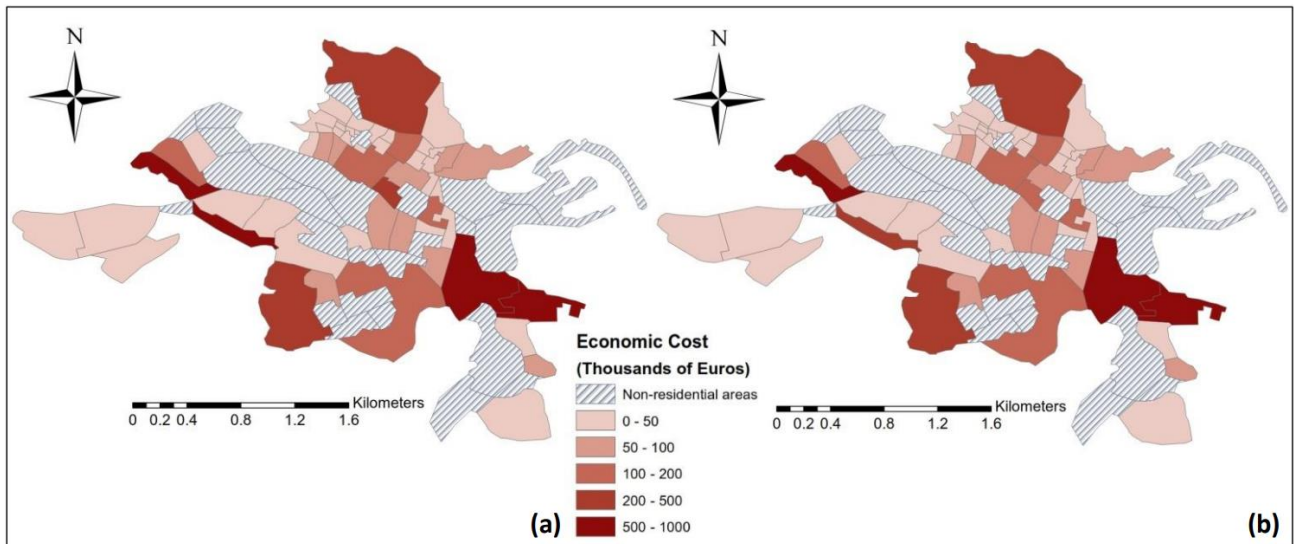


Figure 129: Carte des pertes financières au sens déterministe (a) et probabiliste (b), de la ville d'AL HOCEIMA élaborée par Cherif et al. (2017)

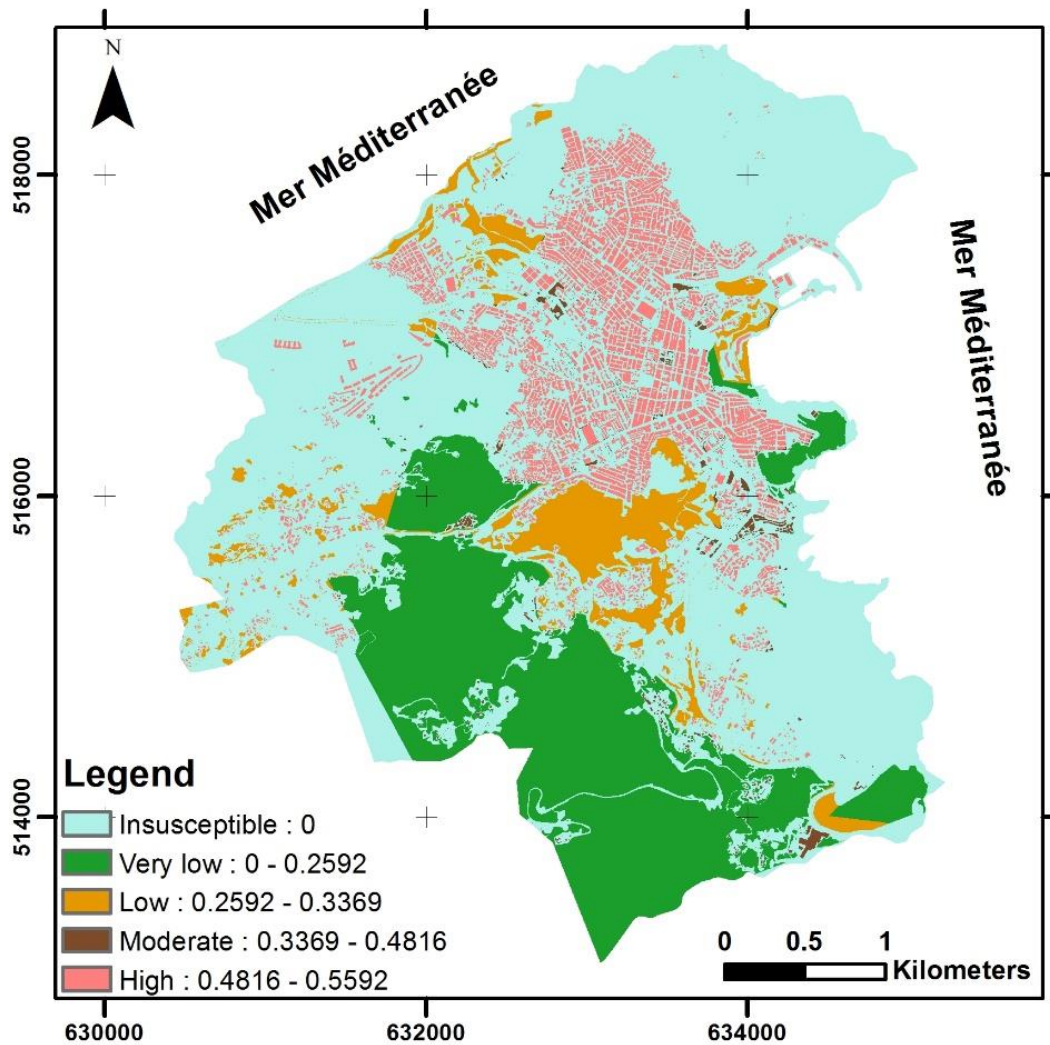


Figure 130: Classes des zones de vulnérabilité au sens physique et socioéconomique au niveau de la ville d'AL HOCEIMA, en appliquant la démarche développée par (Safeland, 2012)

La vulnérabilité évaluée à l'échelle de la ville d'AL HOCEIMA (Chapitre II) et à l'échelle du quartier BOUJIBAR (Chapitre III) est faite par identification des catégories des enjeux existants (structurels, corporels et fonctionnels) et par attribution des coefficients d'endommagement potentiel (CEP) à chaque détail exposé à l'enjeu (valeur comprise entre 0 et 1). Pour le chapitre IV (4^{ème} cas d'étude), appliqué au versant instable de QUEMADO, nous avons présenté un cas parfait de la vulnérabilité au sens quantitatif, par cartographie de 3 composantes : enjeux structurels (ES), enjeux fonctionnels (EF) et enjeux corporels (EC). Des valeurs monétaires attribuées à l'occupation du sol existantes (structurels et fonctionnels) et les enjeux humains. Cette approche permet de définir la valeur des dommages les plus hautes parmi les enjeux du territoire.

II. RESULTATS EN MATIERE DE SUSCEPTIBILITE

L'étude des instabilités faite par El FAHCHOUCH et al. (2015) en appliquant l'approche bivariée par théorie de l'évidence à l'échelle de la zone d'Al Hoceima (**Figure 131**) au 50.000° a permet de cartographier l'aléa sur un territoire de 283 km², à la base de 5 paramètres de prédisposition (lithologie, densité des fractures, pente, exposition et précipitations).

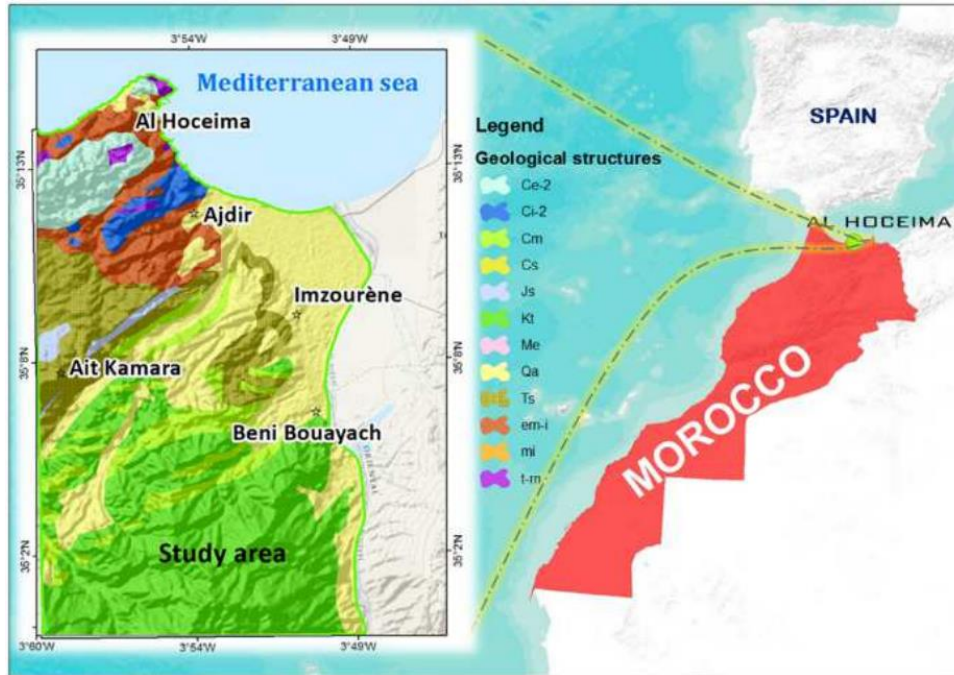


Figure 131: Zone d'étude des instabilités de terrain objet de la publication d'El FAHCHOUCH et al. (2015)

La même approche a été utilisée dans le troisième cas d'étude sur la ville d'Al Hoceima, à une surface de 16 km² seulement (à l'échelle du quartier), en intégrant 9 paramètres de prédisposition : géologie, type de sol, pente, altitude, exposition, occupation du sol, distance des failles, distance du réseau hydrographique et zonage géotechnique.

L'approche bivariée consiste à déterminer la meilleure combinaison des paramètres de prédisposition et les classes des paramètres ayant le plus d'influence au déclenchement des mouvements de terrain. L'étude d'El FAHCHOUCH A.N et al. 2015 a montré une dépendance de 12/20 classes par rapport aux sites d'instabilité, ceci pour 5 paramètres de prédisposition (Lithologie, pente, exposition, fractures et précipitations). L'étude a permet de tester les combinaisons des paramètres de prédisposition (**Tableau 29**). Celles avec les valeurs de la courbe de succès meilleure tiennent compte des combinaisons dépendantes : Hydrographie (HYD) et exposition (AS)/99% de dépendance ; Pente (S) et sismicité (SS) /99% de dépendance ; Exposition (AS) et sismicité (SS) /84% de dépendance (**Tableau 29**).

Tableau 29: Combinaisons des paramètres de susceptibilité testées par El FAHCHOUCH et al. (2015)

Modèle	Combinaison	Observation
M1	Pente (S) + Densité des fractures (FRD) + Sismicité (SS) + Lithologie (LTH) + Hydrographie (HYD) + Exposition (AS) + Occupation du sol (LU)	Combinaison de tous les paramètres indépendamment de la valeur de dépendance
M2	FRD + LTH + HYD + LU + SS	Combinaison indépendante 1

M3	FRD + LTH + HYD + LU + S	Combinaison indépendante 2
M4	FRD + LTH + AS + LU + S	Combinaison indépendante 3

L'application de la régression logistique (WEIGHTS OF EVIDENCE) en suivant les combinaisons précédentes (**Tableau 29**) a permis de cartographier la susceptibilité au sens quantitatif, avant de les classifier par la méthode des quantiles et valider le choix par le calcul de la courbe ROC.

Les quatre combinaisons permettent d'avoir de bonnes valeurs prédictives, particulièrement la 4^{ème} combinaison : Densité des fractures, lithologie, exposition, occupation du sol et pente (AUC plus de 73.95%) (**Figure 132 et 133**).

L'étude d'El FAHCHOUGH et al. (2015) présente une classe qualifiée de forte susceptibilité qui coïncide avec des zones soumises à de fortes pentes, une lithologie dégradée et ravinée en plus d'une fracturation importante du sol.

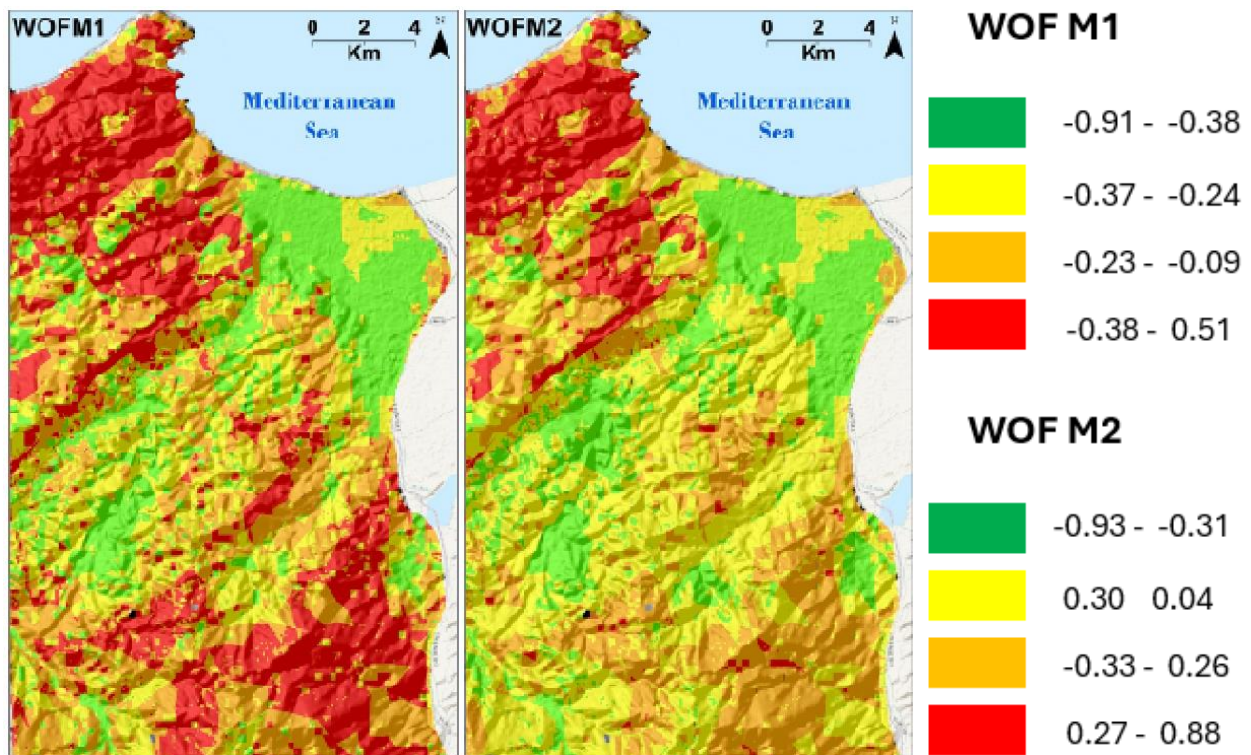


Figure 132: Cartes de susceptibilité classifiées par méthode de quantile selon la première combinaison (WOF M1) et la deuxième combinaison (WOF M2) ; élaborées par EL FAHCHOUGH et al. (2015)

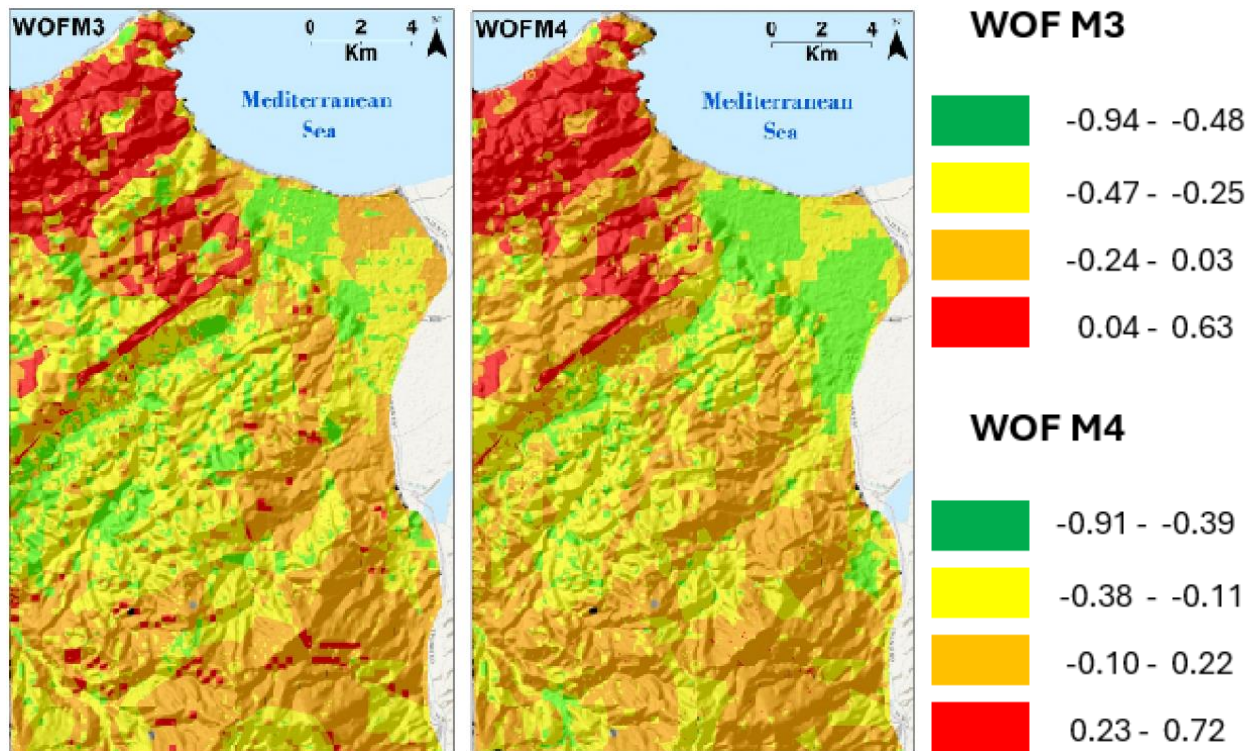


Figure 133: Cartes de susceptibilité classifiées par méthode de quantile selon la troisième combinaison (WOF M3) et la quatrième combinaison (WOF M4) ; élaborées par EL FAHCHOUCH et al. (2015)

Notre étude similaire, appliquée à l'échelle de la ville d'Al Hoceima (partie nord de la zone étudiée par El FAHCHOUCH A.N et al. 2015) a fait ressortir 42/51 classes pour 9 paramètres de prédisposition retenus (2 paramètres ajoutés : géologie et élévations). La carte à moyenne échelle confirme une forte prédisposition des :

- Alluvions modernes, schistes, grès et flysch ;
- Poids important de la distance du réseau hydrographique ;
- Sol moyennement compact et granulaire ;
- Classe de pentes comprises entre 25 et 35°

Les 4 paramètres : géologie, type du sol, importance du réseau hydrographique et pentes, influencent considérablement l'instabilité des terrains à l'échelle de la ville. En matière de correspondance entre l'échantillon des zones instables et la carte de susceptibilité obtenue, la validation consiste à croiser le jeu des zones d'instabilité inventoriées précédemment et la carte résultante. Pour l'évaluation de la carte obtenue, on considère la prédiction bonne si les zones d'instabilités sont situées majoritairement dans les classes de susceptibilité moyenne, forte et très forte. Cette considération est vérifiée pour notre cas d'étude avec un pourcentage de 60.7% des zones d'instabilité et 45/56 sites instables (soit 80.4%).

En plus de notre cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain, nous avons évalué la vulnérabilité des enjeux exposés à l'échelle de la zone, la méthodologie utilisée considère deux catégories d'indices urbains : physiques et socioéconomiques, approche développée par Safeland (Safeland, 2012) et adaptée par nous pour se conformer aux conditions de la ville d'Al Hoceima.

L'étude comparative des instabilités faite par El FAHCHOUCH et al. (2018) en appliquant deux méthodes : l'analyse bivariée (théorie de l'évidence) et l'analyse multivariée (régression logistique). Le choix des paramètres de prédisposition (au nombre de 6) est tributaire de l'échelle d'étude et la disponibilité des données : occupation du sol, densité de fractures, lithologie, pente, exposition, réseau hydrographique, zones

de sismicité identifiée par KEEFER (2002). La méthode d'analyse multivariée ne nécessite pas un test préalable d'indépendance entre paramètre et permet l'usage des données quantitatives et/ou qualitatives. Concernant l'analyse bivariée, les combinaisons retenues en faisant le test d'indépendance donnent des résultats satisfaisants : 73.95% de réussite par la 4^{ème} formule avec le jeu de données : densité de fractures, lithologie, exposition, occupation du sol et pente. La méthode multivariée a été utilisée avec les mêmes paramètres des 4 combinaisons retenues dans l'autres approches et les résultats obtenus étaient satisfaisant pour la première (6 paramètres en jeu) et troisième formule (densité de fractures, lithologie, hydrographie, occupation du sol et pente), par des taux de réussite respectivement de 78% et 75%.

Nous avons appliqué la méthode multivariée (par régression logistique) pour cartographier les instabilités de terrain reconnues au versant QUEMADO à une échelle locale. Le site est caractérisé par un relief à pentes irrégulière, accentuée par l'existence de trois thalwegs larges et par l'action anthropique de l'aménagement existant. Les 7 paramètres retenus sont la pente, l'exposition, la distance des écoulements, distance des désordres naturels, lithologie, distance des anomalies et couloirs faillés, en plus de la distance des confortements et soutènements. Les poids positifs les plus significatifs sont ceux de la lithologie, la pente et les fractures ; alors que la distance des désordres naturels et les confortements représentent des poids négatifs, puisqu'ils agissent inversement sur l'instabilité.

OBJECTIF DU TRAVAIL

L'objectif principal de ce travail de recherche était de développer les connaissances relatives à la gestion et prévention des risques mouvement de terrain, à la connaissance des composantes aléa, vulnérabilité et risque total, dans un contexte marqué par la conjonction de plusieurs facteurs (géologie, géomorphologie, topographie, hydrographie, climat et sismicité) qui contribuent au déclenchement des instabilités et prédisposition à l'aléa. Les dimensions sociales et économiques sont prises en compte par le recours à des démarches d'expertise en vulnérabilité.

SYNTHESE GENERALE

Les démarches méthodologiques adoptées dans ce travail de recherche ont été appliquées à la province d'Al Hoceima selon une petite échelle, à la ville d'Al Hoceima selon une moyenne échelle, et les deux zones de BOUJBAR et QUEMADO, situées à l'intérieur de la ville suivant une approche à échelle locale/grande échelle.

Le bassin d'étude fait partie du rif oriental du Maroc, et se distingue par sa prédisposition à un nombre important des aléas naturels et des enjeux humains et matériels, à cela s'ajoute l'intérêt particulier des pouvoirs publics et des scientifiques d'entreprendre des études de risque et équiper le territoire en question par des résultats approfondis. Les événements sismiques survenus à Al Hoceima confirment ce constat, on cite les exemples des secousses sismiques de 1994, 2004 et 2016, les inondations de 2003 et 2008, les instabilités de terrain au niveau des versants de CALABONITA, QUEMADO, falaise du port d'Al Hoceima, etc.

L'étude bibliographique de la zone d'Al Hoceima et la revue des travaux antérieurs initiés par les pouvoirs publics et d'autres inscrites dans le cadre académique, ont permis de mettre en évidence les principales limites des résultats obtenus, et d'apporter une bonne connaissance sur les facteurs et les enjeux de la zone.

L'ensemble des données recueillies sur les secteurs étudiés ont été intégrées sous un environnement SIG, organisé, et représenté le plus souvent par des présentations cartographiques. Les résultats scientifiques et pratiques obtenus au terme de ce travail de recherche peuvent être synthétisés comme suit :

CONTEXTE GENERAL

La zone d'Al Hoceima est caractérisée par une géologie et topographie favorables au déclenchement des phénomènes d'instabilité à cela s'ajoute une sismicité très importante qui est à l'origine des surpressions interstitielles dans les masses du sol. La présente étude met en évidence la conjonction entre les divers facteurs déclencheurs d'instabilité à l'échelle de certaines zones à risque de glissement et mouvement de terrain ainsi que des évaluations d'aléa, vulnérabilité socioéconomique et risque par l'emploi des approches d'ordre qualitatives et quantitatives.

GÉOLOGIE, TOPOGRAPHIE ET HYDROLOGIE

La zone d'Al Hoceima appartient au domaine interne de la chaîne rifaine consécutive de l'orogénèse alpine. Elle est marquée par un empilement de plusieurs unités structurales séparées les unes des autres par des contacts anormaux. Parmi ces unités, on trouve la dorsale calcaire externe qui supporte, sous forme de klippe tectonique, les terrains de la dorsale calcaire interne et ceux des nappes paléozoïques Ghomarides. Ces unités reposent sur les terrains de la zone prédorsalienne (semelle tertiaire). L'ensemble de ces formations chevauche vers le Sud les flyschs de Tisirène. Le cadre géologique synthétique des différentes formations quaternaires et anciennes du secteur de la ville d'Al Hoceima (siège de trois études menées) exprime des

affleurements de formations carbonatés rigides (calcaire à silex et dolomie) de la dorsale calcaire externe formant des reliefs remarquables, on citera particulièrement la pointe de Ras El Abed.

La zone se distingue par un climat semi-aride marqué par une alternance de saisons sèches (juin à septembre) et de saisons humides (octobre à mai). Toutefois, sur les hauts versants du Sud (arrière-pays), ce climat est de type subhumide. En examinant les cartes topographiques, on peut s'apercevoir rapidement que le relief est très accentué et contrasté.

Sur le plan hydrologique, la province d'Al Hoceima est bien drainée par un réseau hydrographique très dense et bien hiérarchisé. Deux domaines hydrogéologiques se distinguent : la zone amont caractérisée par des précipitations importantes et surtout par des infiltrations facilitées par les bancs gréseux fracturés. La zone aval est marquée par des précipitations et des infiltrations moins importantes, sauf dans les vallées.

SISMICITE

La zone peut être présentée comme la plus sismogène au Maroc. Par conséquent, elle est parmi les zones actives les plus étudiées le long de la frontière de plaques diffuse Afrique-Eurasie dans la méditerranée occidentale. Le contrôle tectonique de l'activité sismique dans cet endroit est encore problématique. Les cartes de sismicité de la région montrent un important alignement sismique de direction NE-SW.

Plusieurs tremblements de terre ont pu être considérés dans l'histoire de la région grâce à l'ampleur des désastres qu'ils provoquèrent. Les séismes ayant affecté la zone d'Al Hoceima sont ceux de 1522, 1624, 1791 et 1800-1802. Concernant la sismicité instrumentale, on compte trois événements majeurs (dont les deux premiers destructeurs), en 1994, 2004 et 2016 ayant des magnitudes modérées entre 5.9 et 6.3 et des mécanismes au foyer similaires.

RESULTATS

Les démarches proposées dans le cadre de ce travail se composent d'une étape d'analyse de l'aléa (instabilité) suivie d'une appréhension des facteurs en cause, une modélisation de l'aléa et d'une cartographie de l'aléa, les enjeux et le risque associé. Les études de cas particuliers choisis permettent d'aller plus loin dans la caractérisation des aléas, notamment les instabilités et particulièrement la définition des facteurs de prédispositions et de déclenchement d'une instabilité ainsi que la détermination des modèles convenables pour l'évaluation de l'aléa. Dans ce travail, nous avons donc cherché à mettre en évidence, par modélisation et analyse spatiale des données géographiques sous environnement SIG, les relations entre les paramètres d'aléa et l'intensité du phénomène.

Compte tenu de la multitude des méthodes d'évaluation des risques et la particularité de chaque méthode, nous avons opté pour deux approches. La première qualitative, caractérisée par l'affectation des valeurs de poids aux paramètres contribuant dans le déclenchement du phénomène. Cette approche exige impérativement une connaissance des particularités de la zone et le jugement de l'expert, ce qui mène généralement à des cartographies subjectives et très discutables. La deuxième quantitative, caractérisée par l'application de la régression logistique, qui est une des méthodes objectives de plus en plus utilisées dans le domaine du risque. Cette approche est basée sur la détermination numérique des liens entre les variables prédictors de l'aléa en calculant sa probabilité d'occurrence pour chaque pixel de la zone d'étude.

Les glissements de terrain du Quartier BOUJIBAR sont favorisés par la conjonction de plusieurs paramètres qui relèvent principalement des caractéristiques topographiques géologiques et structurales de la zone. Les tests effectués pour le calage du modèle d'estimation de la susceptibilité à l'aléa ont permis de déterminer la combinaison optimale entre cinq paramètres à savoir : le gradient de pente, la lithologie, l'occupation du sol, la géologie et la distance aux cours d'eau. Les terrains les plus exposés au glissement sont constitués des

formations marneuses et des écoulements calcaires en pentes considérables. Les observations terrain et les modélisations produisent des résultats conformes aux hypothèses de départ.

L'évaluation de la susceptibilité au mouvement de terrain à l'échelle de la ville d'Al Hoceima par l'application de l'analyse bivariée, a permis de déterminer l'importance de chaque variable causative de l'instabilité. La méthode consiste à quantifier le poids de chaque facteur et modéliser l'aléa. Les résultats de l'étude confirment que : le réseau hydrographique se distingue par un poids plus important, une lithologie favorable au déclenchement des instabilités constituée par des alluvions modernes, schistes, grès et flyschs, un sol moyennement compact et granulaire favorable au déclenchement du phénomène, des pentes comprises entre 25 et 35° influencent considérablement l'instabilité dans la ville.

Les facteurs responsables du déclenchement des instabilités, dégagés lors de l'étude détaillée des cas se résument aux pentes naturelles, sismicité et proximité des structures tectoniques, conditions hydrauliques, structures géologiques et actions anthropiques.

- Sismicité : argumentée par une activité sismique très intense qui a engendrée au niveau des accidents tectoniques par le jeu de failles, ce facteur est le quatrième responsable dans le déclenchement des mouvements de terrain à l'échelle du versant QUEMADO, quantifiée par régression logistique en prenant en compte la distance des contacts anormaux et couloirs faillés.
- Topographie : les valeurs élevées des pentes (généralement plus de 30°) font que ce facteur joue un rôle très important dans la déstabilisation des versants. Néanmoins, en raison du relief très accentué de toute la région, ces pentes ne constituent pas un facteur distinctif d'instabilité. Les cartographies de susceptibilité au déclenchement des mouvements de terrain et glissement, réalisées à l'échelle 1/2000 dans les secteurs de QUEMADO, BOUJIBAR et pour la ville d'Al Hoceima entièrement expriment des classes d'instabilité moyenne à forte dans les fortes pentes (généralement au-delà de 25°).
- Conditions hydrauliques : à partir des données récoltées sur le réseau hydrographique de la zone et son importance, une cartographie du facteur hydrographique a été faite et combiné aux autres facteurs. Les résultats de l'étude se rapportant à QUEMADO classent le paramètre comme troisième responsable du déclenchement des instabilités. Par ailleurs, l'évaluation de l'aléa par combinaison des variables : lithologie, formations superficielles et occupation du sol produit une erreur relative sur les surfaces modélisées de 40%, cette estimation a été améliorée par 11% en ajoutant les conditions hydrauliques et la pente.
- Conditions géologiques : pour vérifier le rôle de la structure géologique dans l'apparition des glissements et mouvements de terrain, une intégration de ce paramètre dans l'ensemble des modèles de l'étude a permis de démontrer la part très significative du paramètre.

Au terme de la présente étude, les facteurs potentiels d'instabilité ainsi que leur contribution a été identifiée. Des relations entre les différents facteurs ont été prouvées et la présence de l'aléa. Les différents facteurs correspondent à :

- La sismicité qui se justifie par l'intense activité sismique à laquelle est soumise la région, par la néotectonique et par les modèles de l'étude ;
- La pente topographique ;
- Les conditions hydrauliques, qui concernent les écoulements superficiels ;

La structure géologique de la zone, la fracturation importante des structures et leurs caractéristiques physiques ;

La présente recherche a permis l'identification d'un nombre important de sites instables et susceptibles à des aléas naturels, rencontrés dans le secteur d'Al Hoceima. Elle a permis de réaliser une description à travers des reconnaissances terrain, des analyses de données (topographiques, géologiques, etc.), des consultations

bibliographiques, etc. Il est à noter que les différents types de mouvement de terrain identifiés expriment notamment une pente ayant un gradient important et une hétérogénéité des formations géologiques.

La carte d'aléa mouvement de terrain produite pour la ville d'Al Hoceima exprime des valeurs appartenant à des classes de susceptibilité moyenne, forte et très forte, représentent 68% de zone d'étude. Des instabilités de type chute et détachement de blocs sont identifiés au niveau des versants donnant sur la côte méditerranéenne, on cite les cas de CALABONITA, QUEMADO et la zone de SIDI ABID caractérisée par des formations rigides et fracturées.

L'analyse des effets et dégâts de la crise sismique qu'a connue la zone en 1994, 2004 et les dernières secousses de 2016, révèle que la majorité des secteurs étudiés sont exposés à l'action des séismes, qui peuvent déclencher des instabilités plus significatives.

L'approche de quantification des facteurs contribuant aux mouvements de terrain suggère qu'une pente avoisinant les 35°, associée à la proximité des structures sismique et la géologie locale, demeurent les facteurs d'aléa les plus importants. Il est préconisé ainsi d'adopter des méthodes quantitatives pour l'évaluation des phénomènes d'aléa et risque associé, en plus de la surveillance des zones possédant une pente moyenne et présentant des instabilités potentielles ou déclarées car un séisme de forte magnitude pourrait y causer des dégâts. Etant donné que le secteur étudié est caractérisé par une lithostratigraphie hétérogène, qui peut être généralisée à l'échelle du domaine interne du Rif central, nous suggérons que les sites où se localisent les instabilités remarquables de terrain soient surveillés.

Les démarches d'expertise en vulnérabilité ont permis de cartographier les enjeux exposés aux mouvements de terrain, par le calcul des indexes urbains : physiques (composante humaine et démographique) et socioéconomiques, pour le cas d'étude qui se rapporte à la ville d'Al Hoceima (deuxième cas d'étude).

Le cartographie de la vulnérabilité selon notre approche, pour une application à très grande échelle se distingue par la prise en considération de façon conjointe de la dimension physique, sociale et économique, ainsi nous pouvons confirmer que notre approche est globale au sens des détails cartographiés (bâtiments, voirie, équipements, réseaux d'énergie et électricité ; population, densité, catégorie des bâtiments, ressources allouées, etc.) et plus précise en intégrant le plan de ville à l'échelle 2000^e, ainsi nous pouvons représenter des détails de l'ordre de 40cm en représentation continue (toute la surface de la ville hiérarchisée et pondérée).

La vulnérabilité évaluée par rapport aux zones du deuxième et troisième cas d'étude est faite par identification des catégories des enjeux existants (structurels, corporels et fonctionnels) et par attribution des coefficients d'endommagement potentiel (CEP) à chaque détail exposé à l'enjeu (valeur comprise entre 0 et 1). Pour le quatrième cas d'étude, appliqué au versant instable de QUEMADO, nous avons présenté un cas parfait de la vulnérabilité au sens quantitatif, par cartographie de 3 composantes : enjeux structurels (ES), enjeux fonctionnels (EF) et enjeux corporels (EC). Des valeurs monétaires attribuées à l'occupation du sol existantes (structurels et fonctionnels) et les enjeux humains. Cette approche permet de définir la valeur des dommages les plus hautes parmi les enjeux du territoire.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

A ce jour, la pensée dominante de la gestion des risques est basée sur le caractère exceptionnel du risque naturel et non sur le quotidien des populations, sur la réduction des effets des facteurs responsables (physiques, humaines et socio-économiques), par des mesures directes appliquées aux zones menacées, par la préparation des citoyens aux crises, par la réduction de pauvreté et sur le renforcement des capacités environnementales et humaines. On présente des recommandations clés dans la mesure de gérer et prévenir les risques naturels.

- Mener et Investir dans des études de risque ;
- Mettre en place des mesures spécifiques pour les zones urbaines en prenant en compte la notion d'aléa et risque dans les politiques d'aménagement et développement urbain ;
- Réduire les risques naturels et faciliter l'aide humanitaire en mettant en place une bonne gestion locale de l'occupation des sols et de la combiner à une évaluation minutieuse des risques de catastrophes naturelles encourues au niveau local. Cette bonne évaluation permettrait de transformer des plans d'urbanisme en plans d'intervention adéquats et à jour en cas d'aléas naturels ;
- Mettre en place un référentiel de données de risque, permettant de centraliser les données contribuant à l'identification et l'évaluation des risques. A cela on ajoute l'intervention de la société civile pour alimenter la base de données et informer les responsables au sujet des aléas manifestés (glissement déclenché, chute de bloc, secousse ressentie, remonté des oueds, etc.) ;
- Contrôler les phénomènes d'urbanisation dans les zones à risque (berge des oueds, versants instables, sols hétérogènes et en pente, etc.) par des mesures réglementaires, techniques et par sensibilisation des populations vivant dans les quartiers concernés, souvent informels et insalubres ;
- Appuyer les communautés locales et favoriser une participation citoyenne ;
- Respecter les normes de construction ou mettre en place des normes de constructions plus sévères. Ceci s'avère plus importante pour accroître la résilience des populations face aux aléas et catastrophes. Il s'agit du respect des normes de construction pour la protection des infrastructures et l'amélioration du degré de sécurité des bâtiments. Lors d'une catastrophe naturelle, le non-respect des codes de construction et les bâtiments à risque accroissent le nombre de victimes et les pertes matérielles ;
- Favoriser une synergie entre les différents acteurs de la gestion des risques naturels, à savoir les pouvoirs publics (gouvernement, collectivités territoriales, administrations et services extérieurs des ministères ...), les ONG, les élus, la société civile, les scientifiques ... Pour parvenir à une meilleure gestion des catastrophes naturelles, il importe donc de coordonner les efforts de tous les acteurs autour d'un but commun.

Les perspectives qui s'ouvrent à la suite de cette recherche sont nombreux. Tout d'abord dans le domaine de la recherche, nous souhaitons poursuivre nos études et cartographie des zones d'aléa et à enjeux, sur d'autres terrains dans une approche visant l'adaptation des modèles d'évaluation, pour se concerter sur un modèle unique prenant en compte les spécificités des zones, données disponibles et échelle de cartographie cible. Ensuite, nous projetons de nous investir dans la mise en place d'un cadre de données du risque commun, qui est selon nous une base de travail à la fois originale et très productive dans cette situation de carence en matière de données fiables et à faible cout. Nous souhaitons explorer plus particulièrement l'aléa sismique local, l'activité des failles, leurs servitudes et mesures réductrices d'aléa. D'autre part, nous pouvons développer les outils nécessaires pour répondre aux recommandations proposées ci-dessus. Il s'agit donc de perspectives de recherche appliquée pour la réduction des effets de risques naturels, en espérant que de telles expérimentations se multiplient et que les prochaines recherches se focalisent sur la réduction des risques de catastrophe annoncent plus de progrès.

ANNEXES

Annexe 1

Paramètres de susceptibilité aux glissements	SC (ha)	FC	N de TMT	F de TMT	W _i	W _j
Lithologie susceptible aux glissements						9
Calcaire/Dolomie ; Grès ; Marno calcaire ; Calschiste et marne ; Calcaire microbrechique	260 955,32	7,37	151	18,95	3	
Grès numidien ; encroutement calcaire	3 632,36	0,10	9	1,13	4	
Sable dunaire consolidé ; alternance marne calcaire grès ; grès schiste / pelite et débris schisteux ; grès argile / grès marne ; éboulis anciens ; Poudingues brèches conglomérats ; Limon	200 016,47	5,65	115	14,43	5	
Schistes / Micaschiste ; Sable dunaire moderne	101 335,57	2,86	42	5,27	6	
Eboulis / Formation de pente / Colluvions ; Flysch ; Argile marne ; Grès et limons des plateaux ; Cône de déjection / dépôt torrentiel ; Alluvions récentes ; terre rouge	2 951 600,34	83,38	447	56,09	7	
Grès et conglomérat rouge ; argile et gypse	19 799,03	0,56	19	2,38	8	
Affaissements et solifluxions	2 446,71	0,07	14	1,76	9	
Zonage du réseau hydrographique (m)						5
0 – 110	61 913,50	1,75	389	10,30	1	
110 – 440	177 723,81	5,02	619	16,39	3	
440 – 1100	335 124,57	9,47	586	15,52	2	
1100 – 4400	1 385 920,70	39,15	1103	29,21	5	
>4400	1 579 104,57	44,61	1079	28,58	4	
Zonage de fracturation (m)						8
0 – 50	24 879,73	0,70	69	2,36	2	
50 – 200	113 005,03	3,19	244	8,35	6	
200 – 250	109 589,59	3,10	156	5,34	5	
250 – 300	106 719,32	3,01	128	4,38	4	
300 – 350	92 458,17	2,61	385	13,18	7	
>350	3 093 135,31	87,38	1939	66,38	8	
Occupation du sol						9
Surface eau	1 292,82	0,04	1	0,01	2	
Route	220 831,16	6,24	7688	57,70	8	
Chemin	95 692,89	2,70	1481	11,11	7	
Ligne électrique	8 955,35	0,25	38	0,29	3	
Bati	3 039,32	0,09	614	4,61	6	
Forêt	331 049,53	9,35	350	2,63	5	
Verger et vigne	4 329,46	0,12	101	0,76	4	
Sol nu	2 874 456,22	81,21	3052	22,90	9	
Zonage géotechnique						6
Z0	3 156 225,5	89,16	618	77,54	6	
Z1	60 864,62	1,72	15	1,88	1	
Z2	60 486,10	1,71	25	3,14	4	
Z3	8 743,79	2,47	69	8,66	5	
Z4	73 280,42	2,07	17	2,13	2	
Z5	8 368,24	0,24	7	0,88	1	
Z6	9 688,45	0,27	6	0,75	1	
Z7	520,06	0,01	0	0,00	1	
Z8	5 440,98	0,15	5	0,63	1	
Z9	45 784,80	1,29	13	1,63	1	
Z10	31 696,17	0,90	22	2,76	3	
Pente						8
0 – 10	771 919,44	21,81	197	8,07	3	
10 – 20	1 459 472,43	41,23	713	29,25	5	
20 – 30	1 001 201,45	28,28	971	39,83	6	
30 – 45	295 756,24	8,36	532	21,80	4	
45 – 60	10 943,65	0,31	25	1,02	2	
> 60	493,94	0,01	1	0,03	2	
MNT						6
-9 - 300	485743,15	13,72	132	5,53	1	
300 – 600	655674,26	18,52	220	9,19	3	
600 – 900	524009,63	14,80	467	19,53	4	
900 – 1200	705161,46	19,92	726	30,37	6	
1200 – 1500	728072,18	20,57	579	24,23	5	
1500 -1800	352890,44	9,97	195	8,15	2	
1800 - 2445	88236,03	2,49	72	3,00	1	
Exposition						6
Plat	2 194,48	0,06	0	0	1	
Nord	303 953,95	8,59	374	15,64	6	
Nord Est	481 386,92	13,60	243	10,17	2	
Est	482 145,16	13,62	222	9,30	2	
Sud Est	493 119,14	13,93	286	11,94	3	
Sud	441 587,34	12,47	318	13,29	4	
Sud-Ouest	354 335,02	10,01	300	12,54	4	
Ouest	434 074,97	12,26	310	12,96	4	
Nord-Ouest	546 990,16	15,45	338	14,15	5	

Annexe 2

Paramètres de susceptibilité aux affaissements et effondrements	SC (ha)	FC	N de TMT	F de TMT	W _{ij}	W _j
Lithologie susceptible aux affaissements et effondrements						9
Sable dunaire consolidé ; Argile marne ; grès ; Sable dunaire moderne ; grès schiste / pelite et débris schisteux ; grès argile / grès marne ; Cône de déjection / dépôt torrentiel ; Grès et limons des plateaux ; Alluvions récentes ; Terre rouge	374 479,66	10,58	141	31,69	3	
Flysch ; Eboulis / Formation de pente / Colluvions ; Schistes / Micaschiste ; Alternance marne calcaire grès ; éboulis anciens ; Poudingues brèches conglomérats ; argile + gypse ; encroûtement calcaire	2 923 587,65	82,59	115	25,84	5	
Marno calcaire ; Calcschiste calcaire	53 896,14	1,52	8	1,80	7	
Calcaire/Dolomie455	187 823,69	5,31	181	40,67	9	
Zonage du réseau hydrographique (m)						5
0 – 110	61 913,50	1,75	27	4,41	1	
110 – 440	177 723,81	5,02	57	9,31	2	
440 – 1100	335 124,57	9,47	82	13,40	3	
1100 – 4400	1 385 920,70	39,15	226	36,93	5	
>4400	1 579 104,57	44,61	220	35,95	4	
Zonage de fracturation (m)						8
0 – 50	24 879,73	0,70	82	7,12	2	
50 – 200	113 005,03	3,19	269	23,35	7	
200 – 250	109 589,59	3,10	158	13,72	5	
250 – 300	106 719,32	3,01	107	9,29	4	
300 – 350	92 458,17	2,61	291	25,26	8	
>350	3 093 135,31	87,38	245	21,27	6	
Occupation du sol						9
Surface eau	1 292,82	0,04	0	0	1	
Route	220 831,16	6,24	2776	69,57	8	
Chemin	95 692,89	2,70	252	6,32	6	
Ligne électrique	8 955,35	0,25	0	0	1	
Bati	3 039,32	0,09	270	6,77	7	
Foret	331 049,53	9,35	87	2,18	4	
Verger et vigne	4 329,46	0,12	92	2,31	5	
Sol nu	2 874 456,22	81,21	513	12,86	9	
Zonage géotechnique						6
Z0	3 156 225,5	89,16	393	88,31	6	
Z1	60 864,62	1,72	9	2,02	3	
Z2	60 486,10	1,71	5	1,12	2	
Z3	8 7431,79	2,47	15	3,37	5	
Z4	73 280,42	2,07	13	2,92	4	
Z5	8 368,24	0,24	1	0,22	1	
Z6	9 688,45	0,27	0	0	1	
Z7	520,06	0,01	0	0	1	
Z8	5 440,98	0,15	4	0,90	1	
Z9	45 784,80	1,29	5	1,12	1	
Z10	31 696,17	0,90	0	0	1	
Pente						6
0 – 10	771 919,44	21,81	58	13,99	3	
10 – 20	1 459 472,43	41,23	130	31,46	6	
20 – 30	1 001 201,45	28,28	122	29,58	5	
30 – 45	295 756,24	8,36	89	21,60	4	
45 – 60	10 943,65	0,31	13	3,14	2	
> 60	493,94	0,01	1	0,23	2	
MNT						6
-9 - 300	485743,15	13,72	135	32,89	5	
300 – 600	655674,26	18,52	173	42,04	6	
600 – 900	524009,63	14,80	35	8,58	3	
900 – 1200	705161,46	19,92	36	8,63	4	
1200 – 1500	728072,18	20,57	25	6,18	2	
1500 -1800	352890,44	9,97	7	1,68	1	
1800 - 2445	88236,03	2,49	0	0	1	
Exposition						6
Plat	2 194,48	0,06	0	0	1	
Nord	303 953,95	8,59	63	15,35	6	
Nord Est	481 386,92	13,60	49	11,92	3	
Est	482 145,16	13,62	52	12,68	4	
Sud Est	493 119,14	13,93	55	13,40	5	
Sud	441 587,34	12,47	56	13,49	5	
Sud-Ouest	354 335,02	10,01	38	9,19	2	
Ouest	434 074,97	12,26	45	10,97	2	
Nord-Ouest	546 990,16	15,45	53	12,98	5	

Annexe 3

Paramètres de susceptibilité éboulements et chute de blocs	SC (ha)	FC	N de TMT	F de TMT	W _{ij}	W _j
Lithologie susceptible aux éboulements et chute de blocs						9
Sable dunaire moderne ; Limon ; Terre rouge	94 675,46	2,54	1	0,08	3	
Argile marne ; Flysch ; Glissement ; Cône de déjection / dépôt torrentiel ; Alluvions récentes ; argile + gypse ; encroutement calcaire ; conglomérat grès et limon	3 018 002,06	81,04	425	58,49	5	
Grès et conglomérat rouge ; roches éruptives et volcaniques	80 343,30	2,16	2	0,33	6	
Grès ; Sable dunaire consolidé ; grès argile / grès marne ; Poudingues brèches conglomérats ; Eboulis anciens	64 434,69	1,73	21	2,88	7	
Calcaire/Dolomie ; Schistes / Micaschiste ; grès schiste / pelite et débris schisteux ; Marno calcaire	282 331,64	7,58	205	28,30	8	
Eboulis / Formation de pente / Colluvions ; Alternance marne calcaire grès ; Calcschiste calcaire	184 489,91	4,95	72	9,92	9	
Zonage du réseau hydrographique (m)						5
0 – 110	61 913,50	1,75	15	2,02	1	
110 – 440	177 723,81	5,02	59	8,11	2	
440 – 1100	335 124,57	9,47	100	13,78	3	
1100 – 4400	1 385 920,70	39,15	251	34,64	4	
>4400	1 579 104,57	44,61	301	41,46	5	
Zonage de fracturation (m)						8
0 – 50	24 879,73	0,70	5	0,69	2	
50 – 200	113 005,03	3,19	17	2,29	5	
200 – 250	109 589,59	3,10	19	2,68	7	
250 – 300	106 719,32	3,01	19	2,67	6	
300 – 350	92 458,17	2,61	15	2,11	4	
>350	3 093 135,31	87,38	650	89,56	8	
Occupation du sol						9
Surface eau	1 292,82	0,04	0	0	1	
Route	220 831,16	6,24	17	2,30	7	
Chemin	95 692,89	2,70	7	0,94	6	
Ligne électrique	8 955,35	0,25	1	0,11	1	
Bati	3 039,32	0,09	0	0	3	
Foret	331 049,53	9,35	45	6,16	8	
Verger et vigne	4 329,46	0,12	1	0,20	5	
Sol nu	2 874 456,22	81,21	655	90,27	9	
Zonage géotechnique						6
Z0	3 156 225,5	89,16	712	98,04	6	
Z1	60 864,62	1,72	3	0,43	4	
Z2	60 486,10	1,71	0	0	1	
Z3	8 7431,79	2,47	8	1,12	5	
Z4	73 280,42	2,07	2	0,30	3	
Z5	8 368,24	0,24	0	0	1	
Z6	9 688,45	0,27	0	0	1	
Z7	520,06	0,01	0	0	1	
Z8	5 440,98	0,15	0	0	1	
Z9	45 784,80	1,29	712	0	1	
Z10	31 696,17	0,90	3	0	1	
Pente						8
0 – 10	771 919,44	21,81	63	8,70	3	
10 – 20	1 459 472,43	41,23	200	27,54	5	
20 – 30	1 001 201,45	28,28	270	37,19	6	
30 – 45	295 756,24	8,36	181	24,87	4	
45 – 60	10 943,65	0,31	12	1,63	2	
> 60	493,94	0,01	0	0	2	
MNT						6
-9 - 300	485743,15	13,72	70	9,60	2	
300 – 600	655674,26	18,52	137	18,92	4	
600 – 900	524009,63	14,80	161	22,19	5	
900 – 1200	705161,46	19,92	185	25,42	6	
1200 – 1500	728072,18	20,57	125	17,25	3	
1500 -1800	352890,44	9,97	39	5,36	1	
1800 - 2445	88236,03	2,49	9	1,26	1	
Exposition						6
Plat	2 194,48	0,06	0	0	1	
Nord	303 953,95	8,59	105	14,53	6	
Nord Est	481 386,92	13,60	77	10,67	3	
Est	482 145,16	13,62	70	9,57	2	
Sud Est	493 119,14	13,93	94	12,94	5	
Sud	441 587,34	12,47	109	15,02	6	
Sud-Ouest	354 335,02	10,01	97	13,41	5	

Annexe 4

Paramètres de susceptibilité aux ravinements	SC (ha)	FC	N de TMT	F de TMT	W _{ij}	W _j
Lithologie susceptible aux ravinements						9
Calcaire/Dolomie ; grès ; Calcschiste calcaire	250 112,99	7,07	15	2,96	2	
Marno calcaire ; grès numidiens ; encroutement calcaire	14 474,79	0,41	1	0,14	3	
Schistes / Micaschiste ; Alternance marne calcaire grès ; grès schiste / pelite et débris schisteux ; grès argile / grès marne ; éboulis anciens ; roches éruptives et volcaniques	163 757,41	4,63	16	3,23	4	
Eboulis / Formation de pente / Colluvions ; Sable dunaire consolidé ; Sable dunaire moderne ; Glissement	171 396,90	4,84	12	2,34	6	
Argile marne ; Flysch ; Cône de déjection / dépôt torrentiel ; Alluvions récentes ; Grès et limons des plateaux ; Poudingues brèches conglomérats	2 875 661,58	81,24	443	88,64	8	
Grès et conglomérat rouge ; Terre rouge ; argile + gypse	64 383,48	1,82	13	2,69	9	
Zonage du réseau hydrographique (m)						7
0 – 110	61 913,50	1,75	6	1,27	1	
110 – 440	177 723,81	5,02	23	4,56	2	
440 – 1100	335 124,57	9,47	43	8,48	3	
1100 – 4400	1 385 920,70	39,15	200	39,85	4	
>4400	1 579 104,57	44,61	230	45,76	5	
Zonage de fracturation (m)						8
0 – 50	24 879,73	0,70	469	93,25	8	
50 – 200	113 005,03	3,19	6	1,25	4	
200 – 250	109 589,59	3,10	6	1,28	5	
250 – 300	106 719,32	3,01	9	1,77	6	
300 – 350	92 458,17	2,61	10	1,99	7	
>350	3 093 135,31	87,38	2	0,38	2	
Occupation du sol						9
Surface eau	1 292,82	0,04	0	0	1	
Route	220 831,16	6,24	18	3,54	7	
Chemin	95 692,89	2,70	8	1,49	6	
Ligne électrique	8 955,35	0,25	1	0,14	3	
Bati	3 039,32	0,09	0	0	1	
Foret	331 049,53	9,35	60	11,94	8	
Verger et vigne	4 329,46	0,12	0	0,04	2	
Sol nu	2 874 456,22	81,21	416	82,75	9	
Zonage géotechnique						6
Z0	3 156 225,5	89,16	476	94,69	6	
Z1	60 864,62	1,72	2	0,32	2	
Z2	60 486,10	1,71	1	0,25	1	
Z3	8 7431,79	2,47	10	2,07	5	
Z4	73 280,42	2,07	2	0,37	3	
Z5	8 368,24	0,24	0	0	1	
Z6	9 688,45	0,27	0	0	1	
Z7	520,06	0,01	0	0	1	
Z8	5 440,98	0,15	0	0	1	
Z9	45 784,80	1,29	9	1,76	4	
Z10	31 696,17	0,90	1	0,29	1	
Pente						8
0 – 10	771 919,44	21,81	53	10,60	3	
10 – 20	1 459 472,43	41,23	207	41,21	6	
20 – 30	1 001 201,45	28,28	179	35,70	5	
30 – 45	295 756,24	8,36	61	12,08	4	
45 – 60	10 943,65	0,31	2	0,40	2	
> 60	493,94	0,01	0	0	2	
MNT						6
-9 - 300	485743,15	13,72	25	5,05	1	
300 – 600	655674,26	18,52	68	13,63	3	
600 – 900	524009,63	14,80	90	17,87	4	
900 – 1200	705161,46	19,92	123	24,47	5	
1200 – 1500	728072,18	20,57	119	23,62	5	
1500 -1800	352890,44	9,97	59	11,76	2	
1800 - 2445	88236,03	2,49	18	3,60	1	
Exposition						6
Plat	2 194,48	0,06	0	0	1	
Nord	303 953,95	8,59	103	20,46	6	
Nord Est	481 386,92	13,60	68	13,56	4	
Est	482 145,16	13,62	55	10,95	3	
Sud Est	493 119,14	13,93	49	9,71	3	
Sud	441 587,34	12,47	45	8,99	2	
Sud-Ouest	354 335,02	10,01	43	8,51	2	

REFERENCES

A

- AÏT BRAHIM, L. (1991).** Etudes des formations cassantes et états de contraintes récentes au Nord du Maroc. Résultats de la cinématique des plaques Afrique-Europe et du bloc d'Alboran. Université Mohammed V, Rabat.
- AIT BRAHIM L, BOUSTA M, JEMMAH I A, EL HAMDOUNI I, ELMAHSANI A, ABDELOUAFI A., SOSSEY ALAOUI F. and LALLOUT I (2018).** Landslide susceptibility mapping using AHP method and GIS in the peninsula of Tangier (Rif-northern morocco). MATEC Web of Conferences N°149, pp.02084 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902084> CMSS-2017.
- AIT BRAHIM, L., CHOTIN, P., HINAJ, S., ABDELOUAFI, A., EL ADRAOUI, A., NAKCHA, C., DHONT, D., CHARROUD, M., SOSSEY ALAOUI, F., AMRHAR, M.(2002).** Paleostress evolution in the Moroccan African margin from Triassic to Present. *Tectonophysics* 357, 187–205.
- AIT BRAHIM, L., CHOTIN, P., TADILI, B., RAMDANI, M. (1990).** Failles actives dans le Rif central et oriental. *CR Acad. Sci. Paris* 310, 1123–1129.
- AIT BRAHIM, L., NAKHCHA, C., TADILI, B., EL MRABET, A., JABOUR, N.(2004).** Structural analysis and interpretation of the surface deformations of the February 24th, 2004 Al Hoceima earthquake. Centre Sismologique Euro-Méditerranéen European-Mediterranean Seismological Centre www.emsc-csem.org 110, 10
- AIT BRAHIM, L., TADILI, B., RAMDANI, M., IBN IBRAHIM, O., (1994).** Cadre structural et manifestation de surface du séisme d'Al Hoceima du 26/5/94. poster, 33 rd Meeting of the General committee of the international council of scientific union (ICSU) 11-17 Octobre-Rabat.
- ALDOSA, N., LE BIHAN, M., MONIN, M. (2003).** Information, communication, organisation ; Bréal Rosny ; 2ème édition ; pp. 159.
- ALEOTTI, P., CHOWDHURY, R. (1999).** Landslide hazard assessments: summary review and new prospective. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58 (1), 21-44. Doi: 10.1007/s100640050066;
- ANDRIEUX, J.(1971).** La structure du Rif central : étude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de glissement dans un tronçon de la chaîne alpine. *Notes Mémoires du Serv. Géologique du Maroc* 235, 155 p.
- ANTOINE P., GIRAUD, A. (1994)** - Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel - Actes de l'université européenne d'été sur les risques naturels : session 1994 mouvement de terrain, Auron, Pôle Grenoblois Risques Naturels, Université J. Fourier, Grenoble, France, 9 p.
- ARMIJO, R., BENKHELIL, J., BOUSQUET, J.C., ESTEVEZ, A., GUIRAUD, R., MONTENANT, C., PAVILLON, M.J., PHILIP, H., SANZ DE GALDEAND, C., VIGNIER, C. (1977).** Les résultats de l'analyse structurale et de la néotectonique des littoraux. *Bull. Soc. Géol. Fr. (7)*, T. XIX, n° 3, pp. 591-605.
- ARONOFFS, (1989).** Geographic Information Systems:A Management Perspective.WDLPublications.294 p.
- ASTE, J.P. (1991)** - Faisabilité d'un système d'alerte aux populations en cas de risques générés par des mouvements de terrain – Rapport BRGM, R 30704 ENV 4S, 106 p.

AUGRIS, C. (2004). Évolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime ; Ifremer collection "Bilans et prospectives" ; pp. 39

AVENARD, J.M. (1965). L'érosion actuelle dans le bassin du Sebou. Rapport de l'Institut National de Recherche Agronomique, Rabat, 114 p.

AZZOUZ, O., (1992). La lithostratigraphie et tectonique des terrains paléozoïques Ghomarides du massif des Bokoya (Rif interne, Maroc). Thèse 3^o cycle .Rabat, 208 p.

AZZOUZ, O., EL FELLAH, B., & CHALOUAN, A., (2002). Processus de glissement dans le Massif de Bokoya (Rif interne, Maroc) : exemple de Cala Bonita. Bull. Institut sci., Rabat, Sciences de la Terre 24, 33–40.

BADAHDAH, A., RASHID, H., KHATAMI, A. (2016). Update on the use of meningococcal serogroup C CRM197-conjugate vaccine (Meningitec) against meningitis. Expert Review of Vaccines, 15(1), 9-29.

B

BARGACH, K., RUANO, P., CHABLI, A., GALINDO-ZALDÍVAR, J., CHALOUAN, A., JABALOY, A., AKIL, M., AHMAMOU, M., SANZ DE GALDEANO, C., BENMAKHOUL, M., (2004). Recent Tectonic Deformations and Stresses in the Frontal Part of the Rif Cordillera and the Saïss Basin (Fes and Rabat Regions, Morocco). Pure Appl. Geophys. 161, 521–540.

BEZZEGHOUD, M., AYADI, A., SEBAI, A., AIT MESSAOUD, M., MOKRANE, A., BENHALLOU, H. (1996), Seismicity of Algeria between 1365 and 1989: Map of Maximum Observed Intensities (MOI), Advances en Geofisica y Geodesia, I, Pub. de IGN, (Madrid), 107–114

BIGAND, M., CAMUS, H., BOUREY, J., CORBEEL, D. (2006). Conception des systèmes d'information : modélisation des données, études de cas ; Technip; pp. 03.

BIGGS, J., BERGMAN, E., EMMERSON, B., FUNNING, G.J., JACKSON, J., PARSONS, B., WRIGHT, T.J., (2006). Fault identification for buried strike-slip earthquakes using InSAR: The 1994 and 2004 Al Hoceima, Morocco earthquakes. Geophysical Journal International 166, 1347–1362.

BLUMENTHAL, M.M., (1937). Esbozo geológico del Rif en la región de Bokoya . Bol. Inst. Geol. Min. España, Madrid. 44, 199-352.

BONHAM-CARTER G.F., (1994). Geographic Information System for Geoscientists: modelling with GIS. Computer methods in the Geosciences. Pergamon Press. 13.

BONNET-STAU I. (1998). Definition of a debris flow deposit typology and identification of granulometric and geotechnical criteria for debris flow source area materials. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 57 (4), 359-367.

BOUSQUET, J.C., PHILIP, H. (1976), Observations microtectoniques sur la compression Nord-Sud quaternaire des Cordillères bétiques orientales (Espagne méridionale, Arc de Gibraltar). Bull. Soc. Géol. France 1976 (7), T. WVIII, n^o 3, pp. 711-724.

BOUSTA M. and AIT BRAHIM L. (2018). Weights of Evidence Method for Landslide Susceptibility Mapping in Tangier, Morocco. MATEC Web of Conferences 149, 02083 (2018) <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902083> CMSS-2017.

BURROUGH, P.A. (1986). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford; Oxford University Press; pp. 194 p.

C

CADET, J.P., FOURNIGUET, J., GIGOUT, M., GUILLEMIN, M., PIERRE, G., (1977). La néotectonique des littoraux. Bull. la Société Géologique Fr. 19, 600–605.

CAKIR, Z., (2006). Surface Deformation Associated with the Mw 6.4, 24 February 2004 Al Hoceima, Morocco, Earthquake Deduced from InSAR: Implications for the Active Tectonics along North Africa. Bulletin of the Seismological Society of America 96, 59–68. Doi: 10.1785/0120050108

CALVERT, A., GOMEZ, F., SEBER, D., BARAZANGI, M., JABOUR, N., IBENBRAHIM, A., DEMNATI, A., (1997). An integrated geophysical investigation of recent seismicity in the Al-Hoceima region of north Morocco. Bulletin of the Seismological Society of America 87, 637–651.

CALVERT, A., SANDVOL, E., SEBER, D., BARAZANGI, M., ROECKER, S., MOURABIT, T., VIDAL, F., ALGUACIL, G., JABOUR, N., (2000). Geodynamic evolution of the lithosphere and upper mantle beneath the Alboran region of the western Mediterranean: constraints from travel time tomography. Journal of Geophysical Research 105, 10871–10878.

CAMPOS, J. J., BERTENTHAL, B. I., & KERMOIAN, R. (1992). Early experience and emotional development: The emergence of wariness of heights. Psychological Science, 3, 61-64.

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 16-5. DOI: <http://dx.doi.org/0.1002/esp.3290160505>.

CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. In: Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), Geographical Information System in Assessing Natural Hazard. Kluwer Academic Publisher, Netherlands, pp. 135–175.

CARRARA, M., CARDINALI, P., REICHENBACH, P. (1991). GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard, Earth Surface Processes and Landforms, vol. 5, pp. 427-445.

CARRENO, M. L., CARDONA, O. D., BARBAT, A. H. (2007). “A disaster risk ~ management performance index,” Natural Hazards, vol. 41, no. 1, pp. 1–20.

CARSON, M.A., KIRKBY, M.J. (1972). Hillslop form and process - Ed. Cambridge University Press, Cambridge.

CFGI (2000). Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, Collection Environnement, Les risques naturels, Presses LCPC.

CHALOUAN, A., MICHARD, A., FEINBERG, H., MONTIGNY, R., SADDIQUI, O. (2001). The Rif mountain building (Morocco): a new tectonic scenario, Bull. Soc. Géol. Fr. 172, 603–616.

CHALOUAN, A., MICHARD, A., EL KADIRI, K., NEGRO, F., FRIZON DE LAMOTTE, D., SOTO, J.I., SADDIQUI, O. (2008). The Rif Belt. In: Michard, A., Frizon de Lamotte, D., Saddiqi, O., Chalouan, A. (Eds.), Continental Evolution: The Geology of Morocco, Lecture Notes in Earth Sciences. vol. 116. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 203–302.

CHALOUAN, A., MICHARD, A. (2004). The Alpine Rif Belt (Morocco): a case of mountain building in a subduction-subduction-transform fault triple junction, Pure appl. Geophys. 161, 489–519.

CHERKAOUI, T-E, HARNAFI, M. (2004), Le séisme d'Al Hoceima du 24 Février 2004. Rapport préliminaire de mission du 3 au 7 Mars.

CHERKAOUI, T-E. (1988). Fichier des séismes du Maroc et des régions limitrophes 1901-1984. Travaux de l'Institut Scientifique, Série Géologie et Géographie physique, 17, 1-158.

CHOTIN P., DEFFONTAINES, B., AIT BRAHIM, L., NAKHCHA, C. (1997). La faille du Bas-Nekor : Témoin de la dynamique actuelle d'échappement du Maroc septentrional vers l'ouest. – Photo-Interprétation, n° 1997/3-4, p. 159-170.

COLLET, C. (1992). Systèmes d'information géographique en mode image. Presses polytechniques et universitaires romandes – Lausanne, 183 pages.

COMAS, M.C., GARCIA-DUENAS, V., JURADO, M.J. (1992). Neogenetectonic evolution of the Alboran Sea from MCS data, *Geo-Mar. Lett.*, 12, 157–164.

COPPOCK, J.-T. (1995). GIS and natural hazards : An overview from a GIS perspective, In A. Carrara; F. Guzzetti, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic , Netherlands, pp. 31-34.

COURXL, M.F., DELAUNAY, J. (1980). Les éboulements d'extension catastrophique : état actuel des connaissances - Rapport BRGM 80 SGN 776 EG, 55 p.

CRESPO-BLANC, A., FRIZON DE LAMOTTE, D., (2006). Structural evolution of the external zones derived from the Flysch trough and the South Iberian and Maghrebian paleo margins around the Gibraltar arc: a comparative study. *Bull. la Société Géologique Fr.* 177, 267–282.

CROZIER, M.J. (1984). Field assessment of slope instability, in D. Brunsten and D.B. Prior (eds), *Slope instability* (London: John Wiley and Sons Ltd), 103-142;

CROZIER, M.J., GLADE, T. (2005). Landslide hazard and risk: Issues, concepts, and approach. *Landslide hazard and risk*. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470012659.ch1>

CRUDEN, D.M., VARNES, D.J., (1996). Landslides types and processes, in Turner A.K., Schuster R.L. (eds), *Landslides investigation and mitigation*, Transport Research Board, National Research Council, special report 247, p. 36-75.

D

DAI, F., LEE, C.F. (2001). Frequency volume relation and prediction of rainfall-induced landslide, *Engineering Geology*, 59, 253-266.

DAI, F.C., LEE, C.F., NGAI, Y.Y. (2002). Landslide risk assessment and management: an overview. *Eng. Geol.* 64, 65–87.

DEBARATI, G.S., PHILIPPE, H., REGINA, B. (2015). Annual Disaster Statistical Review 2015: The numbers and trends. Brussels, Belgium: Université catholique de Louvain, 2015.

DEMETS, C., GORDON, R.G., ARGUS, D.F., STEIN, S., (1994). Effects of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimate of current plate motions, *Geophys. Res. Lett.* 21, 2191–2194.

D'ERCOLE, R. (1994). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse - *Revue de Géographie Alpine*, N°4, Tome LXXXII, pp. 87-9.

DETTI, R., PASQUI, V. (1995). Vector and raster structures in generating drainage divide networks from digital terrain models, in *Geographical Information Systems In A. Carrara; F. Guzzetti, Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic , Netherlands, pp. 35-55.

DIDON E.(1990). Systèmes d'information géographique : concepts, fonctions, applications. CEMAGREF / ENGREF, 44 pages.

DORBATH, L., HAHOU, Y., DELOUIS, B., DORBATH, C., VAN DER WOERDE, J., BADRANE, S., FROGNEUX, M., HAESSLER, H., JACQUES, E., MENZHI, M. AND TAPPONNIER, P. (2005). Etudes sismologiques sur le séisme d'Al Hoceima: Localisation et mécanisme du choc principal et des répliques, contraintes et structure de la zone épiscopale. Colloque International Séisme d'Al Hoceima: Bilan et perspectives, Al Hoceima, 24-26 février 2005, 22.

DURAND-DELGA M. ET MATTAUER M. (1959). Les unités structurales internes de la "zone marno-schisteuse" du rif septentrional, II. Les unités structurales externes de la "zone marno-schisteuse" du rif septentrional. Plaquette in-8, extrait des Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences, 1959, 8 pages.

DURAND DELGA, M., ROSSI, P., OLIVIER, P., PUGLISI, D. (2000). Situation structurale et nature ophiolitique de roches basiques jurassiques associées aux flyschs maghrébins du Rif (Maroc) et de Sicile (Italie), C.R. Acad. Sci., 331, 29-38.

E

EL ALAMI, S.O., TADILI, B.A., CHERKAOUI, T.-E., MEDINA, F., RAMDANI, M., BRAHIM, L.A., HARNAFI, M. (1998).The Al Hoceima earthquake of May 26, 1994 and its aftershocks: a seismotectonic study. Ann. Geofis. 41, 519–537.

EL FAHCHOUC A. N., AIT BRAHIM L., RAJI O. (2018). Susceptibility assessment of landslides: A comparison of two GIS-based methods in the region of Al Hoceima (Eastern Rif, Morocco). MATEC Web of Conferences N° 149, pp. 02055 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902071CMSS-2017>.

EL FELLAH, B. (1994). Eboulement rocheux dans le Paléozoïque du Rif : Présentation d'un cas sur la route Oued Lao-Jebha. Lisboa, Portugal : 7ème Congrès Intern. de l'AIGI. 3927- 3931.

EL FELLAH, B., AZZOUZ, O., ASSEBRIY, L. (1996).Exemple de glissement de terrain littoral sur la côte méditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis, Rif, Maroc. ORSTOM, Réseau érosion, 16.

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 HAJAJI K. (1982). Les Bryozoaires messiniens du bassin de Melilla (N.E. Maroc) et leur signification biostratigraphique, paléobiogéographique et paléocéologique. Géologie Méditerranéenne. 15-2 pp. 105-121.

EL HAMDOUNI, LAHSEN Ait Brahim (2018). Extraction of the predisposition parameters for mapping the susceptibility of slides lands, in the region of EL Quola, province of Larache (Northern Rif). MATEC Web of Conferences N°149, pp.02045 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902045CMSS-2017>.

EL HAMDOUNI I., AIT BRAHIM L., EL MAHSANI A., ABDELOUAFI A. (2022). The Prevention of Landslides Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) in a Geographic Information System (GIS) Environment in the Province of Larache, Morocco. Geomatics and Environmental Engineering, Volume 16, Number 2. <https://doi.org/10.7494/geom.2022.16.2.77>.

ELMOULAT, M.; AIT BRAHIM, LAHSEN (2018). Landslides Susceptibility Mapping Using GIS And Weights Of Evidence Model In Tetouan-Ras-Mazari Area (Northern Morocco). Geomatics, Natural Hazards And Risk , 2018. IF : 1.713.

ELMRABET, T. (2005). Les tremblements de terre majeurs dans la région du Maghreb, et leurs conséquences sur l'homme et l'environnement. Ed. CNRST-LAG, Rabat. (In Arabic)

EVA, H. D., A. S. BELWARD, E. E. DE MIRANDA, C. M. DI BELLA, V. GOND, O. HUBBER, S. JONES, M. SGRANZAROLLI, AND S. FRITZT. (2004).A land covermap of Sout.

F

FAVRE, P. (1995).Analyse quantitative du rifting et de la relaxation thermique de la partie occidentale de la marge transformante nord-africaine : le Rif externe (Maroc). Comparaison avec la structure actuelle de la chaîne. *Geodin. Acta* 8, 59–81.

FLAGEOLLET, J.C. (1989). Les mouvements de terrain et leur prévention - Collection Géographie, Ed. Masson, 224 p.

FLAGEOLLET, J.C. (1996).The time dimension in the study of mass movements, *Geomorphology*, n°15, 185-190.

FRIZON DE LAMOTTE, D., (1985). La structure du Rif oriental (Maroc). Rôle de la tectonique longitudinale et importance des fluides. Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, France.

FRIZON DE LAMOTTE D., ANDRIEUX J., GUEZOU J.-C. (1991). Cinématique des chevauchements néogènes dans l'Arc bético-rifain : discussion sur les modèles géodynamiques, *Bull. Soc. Géol. Fr.* 169, 611–626.

G

GIANNETTI, F., MONTANARELLA, L. AND SALANDIN, R. (2001). Integrated use of satellite images, DEMs, soil and substrate data in studying mountainous lands. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 3, no 1, p. 25-29.

GILARD, O.(1995). Connaître les inondations : exemple de la Bourbre (Isère), *Ingénieries EAT*, numéro spécial Risques Naturels, Inondation, du constat à la décision, p. 7-16.

GILARD, O.(1998). Guide pratique de la méthode inondabilité, Agence de l'eau, Ministère de l'Environnement, Coll. Etude Inter-Agences, numéro 60, 158 p.

GIRMA, F., RAGHUVANSHI, T.K., AYENEW, T., HAILEMARIAM, T. (2015). Landslide hazard zonation in Ada Berga District, Central Ethiopia – a GIS based statistical approach. *J. Geomatics* 90, 25–38.

GLADE, T. (2003).Vulnerability assessment in landslide risk analysis, 134, 121-138.

GONG, Y, ZHANG, J, GUO, X, WAN, X, LIANG, Z, HU, CJ, JIANG, M. (2013). Identification and characterization of PtDGAT2B, an acyltransferase of the DGAT2 acyl-coenzyme A: diacylglycerolacyltransferase family in the diatom *Phaeodactylum tricorutum*. *FEBS Lett* 587(5):481-7

GRÜNTAL, G., THIEKEN, A.H., SCHWARZ, J., RADTKE, K., SMOLKA, A., MERZ, B. (2006). Comparative risk assessment for the city of Cologne, Germany – storms, floods, earthquakes. *Natural Hazards*.38, 21-44.

GUILLEMIN, M. AND HOUZAY, J.P. (1982). Le Néogène post-nappe et le Quaternaire du Rif nord-oriental. Stratigraphie et tectonique des bassins de Melilla, du Kert, de Boudinar et du piedmont des Kebdana. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, 314, 7-239.

GUTSCHER, M.-A., ROGER, J., BAPTISTA, M.-A., MIRANDA, J.M. AND TINTI, S. (2006). Source of the 1693 Catania earthquake and tsunami (southern Italy): New evidence from tsunami modeling of a locked subduction fault plane. *Geophysical Research Letters* 33: doi: 10.1029/2005GL025442. issn: 0094-8276.

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

GUZZETTI, F. (2006). Landslide hazard and risk assessment. Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, University of Bonn, Bonn, Germany, 389 pp. <http://geomorphology.irpi.cnr.it/Members/fausto/PhD-dissertation>

GUZZETTI, F., CARDINALI, M., REICHENBACH, P., CARRARA, A. (2000). Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River Basin, Central Italy *Environmental Management*, 25 (3), pp. 247-363.

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

H

HATZFELD, D., CAILLOT, V., CHERKAOUI, T., JEBLI, H., MEDINA, F. (1993). Microearthquake seismicity and fault plane solutions around the Nekor Strike-Slip-Fault, Morocco. *Earth Planet. Sci. Lett.* 120, 31–41.

HOWE, E. (1909). Landslides in the San Juan Mountains Colorado. Their cause as and their classification - United States Geological Survey, prof. paper 67, Washington, 58 p.

HUTCHINSON, J.N. (1973). A geotechnical classification of landslides - Unpublished teaching hand out, Imperial College, London.

HURTREZ, J.E., (1998). Analyse géomorphologique des interactions tectonique-érosion dans le système himalayen. Thèse de l'Université de Montpellier II, 305 p.

J

JABOUR, N., KASMI, M., MENZHI, M., BIROUK, A., HNI, L., HAHOU, Y., TIMOULALI, Y., BADRANE, S. (2004). The February 24th, 2004 AL Hoceima earthquake. Centre Sismologique Euro-Mediterranean European-Mediterranean Seismological Centre www.emsc-csem.org 7.

JACKSON, J.A., MCKENZIE, D.P (1988). Rates of active deformation in the Aegean Sea and surrounding regions *Basin Res.* 1, 121-128.

JEMMAH A I, AIT BRAHIM L.(2018). Mass movement susceptibility mapping - A comparison of logistic regression and Weight of evidence methods in Taounate-Ain Aicha region (Central Rif, Morocco). *MATEC Web of Conferences* N°149, pp.02094 (2018) <https://doi.org/10.1051/matecconf/201814902094> CMSS-2017.

Jolivet, M., Brunel, M., Seward, D., Xu, Z., Yang, J., Malavieille, J., Roger, F., Leyreloup, A., Arnaud, N. and Wu, C. (2003). Neogene extension and volcanism in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet: New constraints on the age of the Kunlun Fault. *Tectonics* 22: doi: 10.1029/2002TC001428. issn: 0278-7407

K

KIMERLING (2009). Mathematical Relationships among Map Scale, Raster Data Resolution, and Map Display Resolution.

KOKO, C., FLENTJE, P., CHOWDHURY, R., (2004). Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* (2004), 63, n° 2, 149-165.

KORNPORST, J. (1974). Contribution à l'étude pétrographique et structurale de la zone interne du Rif (Maroc septentrional).

L

LAN, H.X., ZHOU, C.H., WANG, L.J., ZHANG, H.Y., LI, R.H. (2004). Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang Watershed, Yunnan, China. *Eng. Geol.* 76, 109–128.

LAUGIER, P., COJEAN, R. (2001). Analyse de scénarios d'événement « laves torrentielles » dans le bassin versant de l'Arbonne (Bourg-Saint-Mauric, Savoie, France), *Revue Française de Géotechnique*, 95-96, 41-55 ;

LEBLANC M. (1975). Ophiolites précambriennes et gites arséniés de cobalt (Bou Azzer, Maroc). Thèse Sci. Univ. Paris VI, 329 p.

LEBLANC M. ET LANCELOT J. (1980). Interprétation géodynamique du domaine pan-africain (Précambrien terminal) de l'Anti-Atlas (Maroc) à partir de données géologiques et géochronologiques. *Canad. J. Earth Sci.*, 17, p. 142-155.

LEBLANC, D., OLIVIER, P. (1984). Role of strike-slip faults in the Betic-Rifian orogeny. *Tectonophysics* 101, 345–355.

LEDOUX, B. (2000). Guide pour la conduite des diagnostics des vulnérabilités aux inondations pour les entreprises industrielles. Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques) – SAGERIS (Société d'Assistance à la gestion des Risques), 117 p.

LEONE, F., ASTE, J.P., YELASQUEZ, E. (1995). Contribution des constats d'endommagement développement une méthodologie d'évaluation une la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain - *Bull. Assoc. Géogr. Franc.* N°4, pp.350-371.

LEONE, F. (1996). Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. Grenoble : Rapport de thèse, Université Joseph Fourier.

LEROI, E. (1996). Landslidehazard – riskmaps at différent scales: objectives, tools and developments. In *Landslides Proc. Int. Symp. On Landslides, Trondheim*, 17-21 June, Senneet (ed), 35-52.

LEVASSEUR, M. (2003). Contribution des systèmes d'information géographique à l'analyse quantitative de l'aléa "glissement de terrain" - Exemple d'application au secteur de Ville de la Baie, Québec. Québec : Université de Québec.

LOVELAND, T. R., REED, B. C., BROWN, J. F., OHLEN, D. O., ZHU, Z., YANG, L. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP Discover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21. (No. 6 & 7), 1303–1330.

LUZI, L., PERGALANI, F., TERLIEN, M.T.J. (2000). Slope vulnerability to earthquakes at sub-regional scale, using probabilistic techniques and geographic information systems, *Engineering Geology* 58 (3-4), 313-336.

M

MALET, J.P., THIERY, H., MAQUAIRE, O., PUISSANT, A. (2006). Analyse spatiale, évaluation et cartographique du risque "glissement de terrain". *Revue Internationale de Géomatique*. 10, 1-10.

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 p.

MARGARINT, M.C., GROZAVU, A., PATRICHE, C.V., TOMASCIUC, A-M.I., URDEA, R., UNGURIANU, I. (2011). Evaluation des risques de glissements de terrain par la méthode de régression logistique : Application à deux zones basses de Roumanie. *Dynamiques environnementales*. LGPA-EDITIONS, 28.

MASTERE Mohamed, BRIGITTE Van VlietLanoe , Ait Brahim LAHSEN and Meryem EL MOULAT (2015). A linear indexing approach to mass movements susceptibility mapping The case of the Chefchaouen province (Morocco)- *International Journal of Geomatics and Spatial Analysis*.Lavoisier, 2015, 2, pp.245-265. <10.3166/RIG.25.245-265> *Revue internationale de géomatique* – n° 2/2015, 245-265.

MATE/METL. (1999). Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : Risques de Mouvements de Terrain, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, (MATE), Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (METL), La Documentation Française, Paris.

MAURER, G. (1968). Les montagnes du Rif central, étude géomorphologique. Thèse d'état, Université de Paris, 500 p.

MCKENZIE, D. P. (1972).Active tectonics of the Mediterraneanregion. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* 30: 109–185

MCKENZIE, D.P. (1978). Some remarks on the development of sedimentary basins. *EarthPlanet. Sci. Lett.* 40, 25–32.

MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable)-FRANCE. (2004). Analyse des Risques et Prévention des Accidents Majeurs (DRA-34). Rapport Partiel d'Opération f Guide pour la prise en compte du risque inondation. 82 p.

MEJIA, NAVARRO, M., WOHL, E.E., OAKS, S.D. (1994).Geological Hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: Model for Glenwood Springs. *Geomorphology*, 10, pp 331-354.

MICHAEL-LEIBA, M., BAYNES, F., SCOTT, G., GRANGER, K. (2003). Regional landslide risk to the Cairns community. *Natural Hazards* 30, Issue 2, 233–249.

MICHARD, A., CHALOUAN, A., FEINBERG, H., GOFFE, B., MONTIGNY, R., (2002). How does the Alpine belt end between Spain and Morocco? *Bull. la Société Géologique Fr.* 173, 3–15.

MICHARD, A., NEGRO, F., SADDIQL, O., BOUYBAOUÈNE, M., CHALOUAN, A., MONTIGNY, R., GOFFÉ, B. (2006). Pressure–temperature–time constraints on the Maghrebide mountain building: evidence from the Rif–Betic transect (Morocco, Spain), Algerian correlations, and geodynamic implications. *Comptes Rendus Geosci.* 338, 92–114.

MILLIES-LACROIX, A. (1931). Classification des talus et versants instables. *Risques géologiques. Mouvements de terrain - 26e congrès géologique international, section 17, Bull. Liaison labo. Ponts et Chaussées, Paris, pp .55-62.*

MILLIES-LACROIX. (1968). Les glissements de terrain, présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de terrain dans le Rif. *Mine et Géologie*, 27, pp. 45-54.

MOREL, J.L., (1988). Evolution récente de l'orogène rifain et de son avant pays depuis la fin de la mise en place des nappes. *MémoiresGéodiffusion, Paris* 4, 584.

MORIWACKI, Y., IDRISSE, I.M., MOSES, T.L., LADD, R.S. (1985).A re-evaluation of the "L" Strret Slide in Anchorage during the 1964 Alaska earthquake. *Rio de Janeiro: Comtes rendues XII ICSMFE.* 3, 1583-1586.

MORLEY, C.K. (1987). Origin of a major cross-element zone: Moroccan Rif. *Geology* 15, 761–764.

MOURIET T. (1982). Etude géologique et structurale du massif des Bokoya .Trav. Lab. Géol. de l'Afrique .Univ. Paris Sud.

MULDERS, M.A. (2001). Advances in the application of remote sensing and GIS for surveying mountainous land. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 3, no 1, p. 3-10;

MURPHY CORRELLA (2005). Damage trends in RC buildings after the Al Hoceima 2004, earthquake, in *Séisme d'Al Hoceima: bilan et perspectives*

MUNICH, R. (2010). Annual review: Natural catastrophes 2010, analyses, assessments, positions. Munich: *Topics Geo*, 2010. 54 p.

N

NAGARAJAN, R., MUKHERJEE, A., ROY, A., KHIRE, M.V. (1998). Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western Ghat, India. *International journal of remote sensing* 19-4. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/014311698215865>;

NAKHCHA, C. (2002). Apport des données multisource LANDSAT, RADAR, ERS-1, MNT, réseau hydrographique, géologie et sismicité pour le calcul du risque sismique dans le Rif Oriental. Impact sur l'aménagement, l'urbanisme et l'environnement [Thèse, Université MOHAMMED V- AGDAL – Faculté des sciences de Rabat].

NAMOUS. (2012). Evolution quaternaire et dynamique actuelle d'un système geomorphologique de front de chaîne actif : l'exemple du bassin versant de l'ouirika Maroc.

Negro, F et al., 2008. Tectonic evolution of the Betic–Rif arc

NOCQUET, JM., CALAIS, E. (2004). *Pure appl. Geophys*, 161, 661-681.

NOTTET, A. (2002). Analyse et croisement cartographique de la base de données BASIAS et des bases de données de l'IGN ; Mémoire de maîtrise d'Aménagement du Territoire Université Paris XII – Val-de-Marne. pp. 60.

O

OBERLIN, G., (1995). Influence de l'occupation des sols sur les inondations, *Ingénieries EAT*, numéro spécial Risques Naturels, Inondation, du constat à la décision, p. 17-34.

Ousadou, F., Dorbath, L., Ayadi, A., Dorbath, C., Gharbi S. (2014). Stress field variations along the Maghreb region derived from inversion of major seismic crisis fault plane solutions. *Tectonophysics*. 20 p.

P

PARISE, M., 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 (3-4), 251-270.

PHILIP S., ROBERT P., ANDERSON B C., ROBERT E. S (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190 (2006) 231–259

PIKE, R.J. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models *Mathematical Geology*, 20 (5), pp. 491-511;

Platt, J.P., Vissers, R.L.M. (1989). Extensional collapse of thickened continental lithosphere: a working hypothesis for the Alboran Sea and Gibraltar Arc, *Geology* 17, 540–543.

Polidori, L. (1995). Réflexions sur la qualité des modèles numériques de terrain. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, vol. 139, pp. 10-19.

POPESCU, M.E. (2002). Landslide causal factors and landslide remedial options. In: *Proceedings of 3rd international conference on landslides, slope stability and safety of Infrastructures*, Singapore, pp 61–81.

POUJOL, A., RITZ, J.F., TAHAYT, A., VERNANT, P., CONDOMINES, M., BLARD, P. H., IDRISSE, A. K., (2014). Active tectonics of the Northern Rif (Morocco) from geomorphic and geochronological data. *Journal of Geodynamics*, 77, 70-88.

PUECH, C. (2000). Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire d'habilitation à diriger la recherche, ENGREF/CEMAGREF, Montpellier, 100 p ;

R

RAGHUVANSHI, T.K., IBRAHIM, J., AYALEW, D. (2014). Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme – an approach for landslide hazard zonation. *J. Afr. Earth Sci.* 99, 595-612.

Raghuvanshi, T.K., Negassa, L., Kala, P.M. (2015). GIS based grid overlay method versus modeling approach – a comparative study for Landslide Hazard Zonation (LHZ) in Meta Robi District of West Showa Zone in Ethiopia, Egypt. *J. Remote Sens. SpaceSci.* 18, 235–250.

RAMDANI, M., TADILI, B., EL MRABET, T. (1989). The present state of knowledge on historical seismicity of Morocco, in: *Proceedings of the Symposium on Calibration of Historical Earthquakes in Europe and Recent Developments in Intensity Interpretation*, European Seismological Commission, Instituto Geográfico Nacional, Madrid. pp. 257–279.

REBAI, S., PHILLIP, H., TABOADA, A. (1992). Modern tectonic stress field in the Mediterranean Region -Evidence for variation in stress directions at different scales, *Geophys. J. Intern.* 110, 106–140.

REMONDO, J., GONZALEZ, A., DIAZ DE TERAN, J.R., CENDRERO, A., FABBRI, A., CHENG, C. F. (2003). Validation of landslide susceptibility maps: examples and applications from a case study in Northern Spain. *Natural Hazards* 30-3. DOI:<http://dx.doi.org/10.1023/B:NHAZ.0000007201.80743.fc>;

RICHE, P., TREMOLIERES, P. (1987). Tectonique synsédimentaire sur la bordure orientale du bassin tertiaire de Valréas. Mémoire HS n° 13 - Géologie Alpine : Le détritisme dans le Sud-Est de la France - Colloque Associ, pp.409-416.

RFIFI, M., AIT BRAHIM, L.(2017). Evaluation du risque "glissement de terrain" par analyse probabiliste : application au rif oriental du Maroc. *AMERICAN JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH AND APPLIED SCIENCES*. N° 5(5), pp. 319-325. <https://www.american-jiras.com/Rfifi-ManuscriptRef.3-ajira031017.pdf>

RFIFI, M., AIT BRAHIM, L. (2018). Evaluation qualitative et quantitative du risque 'mouvement de terrain' à une échelle cartographique urbaine. Cas du versant QUEMADO, Rif oriental du Maroc (Qualitative and quantitative evaluation of the groundmovementrisk on an urbancartographicscale. Example of QUEMADO, Eastern Rif, Morocco). *MATEC Web of Conferences* N°149, pp.02039 (2018) <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902039>

RFIFI, M., AIT BRAHIM, L. (2018). Evaluation probabiliste du risque glissement de terrain - Application au Rif oriental du Maroc (ProbabilisticLandslideriskassessment - Application to Eastern Rif,

Morocco). MATEC Web of Conferences N°149, pp. 02081 (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902081>

RFIFI, M., AIT BRAHIM, L. (2018). Bivariate Analysis of Susceptibility and Vulnerability to Mass Movements: A Case Study From Al Hoceima (Eastern Rif of Morocco), *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, 9(5), pp. 534–548. <http://www.iaeme.com/IJCIET/issues.asp?JType=IJCIET&VType=9&IType=5>

S

SAFELAND (2012). “Living with landslide risk in Europe: assessment, effects of global change, and risk management strategies,” Deliverable D2.6 Methodology for evaluation of the socioeconomic impact of landslides (socio-economic vulnerability).

Saint-Martin et Rouchy (1986). Évolution et antagonisme des communautés bioconstructrices animales et végétales à la fin du miocène en méditerranée occidentale biologie et sédimentologie. Centres de recherches exploration-production ELF- AQUITAINE ·

SASSA, K. (1985). The geotechnical classification of landslides - Proc., IVth International Conference and Field Workshop on Landslides, Tokyo.

SCARWELL, H.J, LAGANIER, R. (2004). Risque d'inondation et aménagement durable des territoires. Presses Universitaires du Septentrion, 81 p.

STICH, D., MANCILLA, F. DE L., BAUMONT, D., MORALES, J., (2005). Source analysis of the Mw 6.3 2004 Al Hoceima earthquake (Morocco) using regional apparent source time functions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) 110.

SUTER, G. (1980). Carte structurale du Rif, 1/500 000. Notes et Mémoires du Service Géologique, 245.

SÜZEN, M.L., DOYURAN, V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental geology* 45-5. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-003-0917-8>

SYRIEYS, P. (1984). Divers types de mécanismes de mouvements de terrain - Coll. Mouvements de Terrain, Caen, Mémoire du B.R.G.M, N°83, pp. 75-79.

T

TAHAYT, A., MOURABIT, T., RIGO, A., FEIGL, K.L., FADIL, A., MCCLUSKY, S., REILINGER, R., SERROUKH, M., OUAZANI-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. *Comptes Rendus Geosci.* 340, 400–413.

TALHAOUI, A., ABERKAN, M., IBEN BRAHIM, EL MOURAOUAH, A. (2005). Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain. <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00948298/>

TALHAOUI, A., ABERKAN, M., IBEN BRAHIM, A., EL MOURAOUAH, A., JABOUR, N. (1999). Contribution à l'étude des risques naturels. Cas de la région d'Al Hoceima. Oujda : Colloque des Bassins Sédimentaires Marocains. 27(28) et 29 Avril 1999.

TALHAOUI A., M. ABERKAN, IBEN BRAHIM, EL MOURAOUAH A. (2005). Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain. *Pangea*, 43, 3-18

Tejera de Leon, J. (1997). Signification de la limite Jebha – Arbaoua (Maroc nord-occidental) : une rampe latérale au- dessus d’une discontinuité crustale héritée de la période de ‘‘rifting’’. *J. Afr. EarthSci.*, 24, 4, 455-472.

THAUVIN J.P. (1971). Présentation Du Domaine Rifain. In : Ressources En Eau Du Maroc : T.1. Domaine Du Rif Et Du Maroc Oriental. Notes Et Mémoires Du Service Géologique Du Maroc

THIEBOT E. ET GUTSCHER M-A. (2006). The Gibraltar Arc seismogenic zone (part 2): constraints on a shallow east dipping fault plane source for the 1755 Lisbon earthquake provided by tsunami modeling and seismic intensity. *Tectonophysics*.

THIERY, Y., MALET, J.P., STERLACCHINI, S., PUISSANT, A., MEQUAIRE, O. (2007). Landslidesusceptibilityassessment by bivariatemethods at large scales: Application to a complexmountainousenvironment. *Geomorphology*. 92, 38-59.

THIERY, Y., STERLACCHINI, S., MALET, J.P, PUISSANT, A., REMAITRE, A., MAQUAIRE, O. (2004). Strategy to Reduce Subjectivity in Landslide Susceptibility Zonation by GIS in Complex Mountainous Environments. Heraklion, Greece: 7th AGILE Conference on GIScience.

TOSIC, R., DRAGICEVIC, S., LOVRIC, N. (2012). Assessment of soil erosion and sediment yield changes using erosion potential method – Case study: Republic of Srpska-BiH. *Carpathian journal of earth and environmental sciences* 7-4.

U

UDIAS, A., BUFORN, E. (1991). Regional stresses along the Eurasia-Africa plate boundary derived from focal mechanisms of large earthquakes, *Pure Appl. Geophys.* 136, 433–448.

USGS. (2001). Landslide Types and Processes, U.S. Geological Survey Open-File report 04-3072, 4 pp. <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/>

V

VAN WESTEN C.J. (2000). The modelling of landslide hazard using GIS. *Surveys in Geophysics*, 21, 241-255.

VARNES, D.J. (1978). Slope movement types and processes *Landslides Analysis and control*, in Schuster & Krizek (editors), Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington, D.C., pp 325-348.

W

WARD, W.H. (1945). The Stability of Natural Slopes. *The Geographical Journal* Vol. 105, No. 5/6 (May - Jun., 1945), 170-191. Doi: 10.2307/1789732;

WASOWSKI, J., DEL GAUDIO, V., CASARANO, D., LOLLINO, P., MUSCILLO, S. (2000). Local Scale Seismic Landslide Susceptibility Assessment Based on Historic Earthquake Records Combined with Accelerometer Monitoring and Ambient Noise Data, *Engineering Geology* 58 (3-4), 291-311.

WOODSIDE, J.M., MALDONADO, A., (1992). Styles of compressional neotectonics in the eastern Alboran Sea. *Geo-Marine Lett.* 12, 111–116.

WU, T.H., ABDEL-LATIF, M.A. (2000). Prediction and mapping of landslidehazard, *Canadian Geotechnical Journal*, 37, 781-795.

Z

ZORN, M., KOMAC, B. (2007). Probability modelling of landslide hazard. *ActageographicaSlovenica* 47-2.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3986/AGS47201>

RESUME

Au Maroc, les dommages associés aux risques naturels sont d'autant plus lourds pendant les dernières décennies en raison de plusieurs.

Les approches possibles pour gérer le risque associé aux phénomènes naturelles se multiplient et les résultats retrouvés s'affranchir à des limites : typologie de la donnée, disponibilité et coût de production, précision et fiabilité, fréquence de production et circuit de mise à jour, étendu de la zone étudiée/échelle de production cartographique, événements historiques de l'aléa/risque et objectifs de l'étude.

L'exemple concret du choix de l'approche d'expertise des risques est celui des Cartes d'Aptitudes à l'Urbanisation (CAU), qui se généralisent à l'échelle des provinces/préfectures du Maroc. Le choix de l'approche d'expertise adéquate impose encore une réflexion et recherche pour l'adéquation de la démarche à la base de données disponible, la sélection des données en fonction de leur échelle disponible et l'échelle attendue en production cartographique des résultats, tout en restant conforme à des questions du cout, enjeux existants du territoire, dimension humaine, pression de l'action d'aménagement et construction en descendant des petites échelles (projets intercommunaux) aux grandes (projet d'infrastructure communale et locale) et très grandes échelles (projets urbanistiques de construction ...).

L'objectif principal de ce travail de recherche était tout d'abord l'établissement d'un état de l'art des différentes démarches d'expertise en matière d'évaluation et cartographie de l'aléa, la vulnérabilité et le risque résultant. La synthèse a permis de mener des expertises adéquates aux spécificités de la région d'Al Hoceima, suivant trois niveaux d'échelle : de la région, de la ville et du quartier en intégrant la dimension la plus petite du projet urbain par intégration de données multiples sous l'environnement SIG.

MOTS-CLES : Instabilité de terrain, vulnérabilité socioéconomique, risque, Carte d'Aptitude à l'Urbanisation (CAU), cartographie, démarche, expertise, Système d'Information Géographique (SIG), Al Hoceima, Maroc.

ABSTRACT

In Morocco, the damage caused by natural hazards has become increasingly severe in recent decades.

The possible approaches to manage the risk associated with natural phenomena are multiplying, and the results obtained are subject to several limitations: Type of data, availability and cost, accuracy and reliability, frequency and updating, extent of the studied area and its mapping scale, historical events and objectives studied.

A concrete example of risk assessment approaches is the production of Urbanization Suitability Maps, which are being generalized across Morocco's to provide territories with a set of regulatory prescriptions and technical guidance measures.

The choice of the right expert approach requires further thought and research to ensure that the approach is suited to the available database, the type of data and the available scale, while remaining consistent with issues of cost, existing issues in the territory, the human dimension, and the pressure of planning and construction action, from small scale (inter-communal projects) to large scale (local and municipal infrastructure projects) and very large scale (urban construction projects, etc.).

The bibliographical study enabled us to carry out expert assessments appropriate to the Al Hoceima region, at three levels of scale : regional, city and neighborhood, integrating the smallest dimension of the urban project. The approaches applied to the production of risk-reduction maps combine a large set of data that highlight the combined effect of several factors (geology, geotechnics, seismicity, active faults, hydrogeology, geomorphology, topography and land use) that contribute to the triggering of instabilities in the region. The study sets out to assess, evaluate and map the ground instabilities identified in the area at different scales, using recent data, appropriate methods and the functionalities of geographic information systems (GIS). Hazard assessment methods are adapted to the specific features of the Al Hoceima area (Eastern Rif, Morocco).

KEYWORDS : Terrain instability, socioeconomic vulnerability, risk, urbanization suitability map, mapping, approach, expertise, Geographic Information System (GIS), Al Hoceima, Morocco