



HAL
open science

Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain Geological hazards and seismic activity within the area of Al Hoceima (Morocco): Approach of quantifying factors responsible for the triggering of the ground instabilities

A. Talhaoui, M. Aberkan, Iben Brahim, A. El Mouraouah

► **To cite this version:**

A. Talhaoui, M. Aberkan, Iben Brahim, A. El Mouraouah. Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain Geological hazards and seismic activity within the area of Al Hoceima (Morocco): Approach of quantifying factors responsible for the triggering of the ground instabilities. Pangea infos, 2005, 43/44, pp.3-18. insu-00948298

HAL Id: insu-00948298

<https://insu.hal.science/insu-00948298>

Submitted on 18 Feb 2014

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

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

Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain

Geological hazards and seismic activity within the area of Al Hoceima (Morocco): Approach of quantifying factors responsible for the triggering of the ground instabilities

Talhaoui A. (1, 2), Aberkan M. (1), Iben Brahim A. (2) et El Mouraouah A. (2)

- (1) Université Mohammed V, Faculté des Sciences, Département des Sciences de la Terre, Avenue Ibn Batouta, B.P. 1014, Rabat, Maroc.
(2) Laboratoire de Géophysique, Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique, B.P. 8027 Agdal, Rabat 10102, Maroc.

Texte reçu le 24 février 2003

Résumé

Ce travail présente une étude des risques géologiques liés à l'activité sismique de la région d'Al Hoceima, Maroc. Cette étude a nécessité l'identification des modifications récentes enregistrées dans les formations géologiques, consécutives de la crise sismique qu'a connue la région en 1994. L'analyse de ces phénomènes a permis de mettre en évidence les liens entre la sismicité et les instabilités de terrain. Un essai de quantification des facteurs responsables du déclenchement de ces instabilités a conduit à suggérer que la pente ainsi que la sismicité constituent les facteurs capitaux dans l'occurrence des mouvements de terrain.

Mots clés : Risques géologiques, Instabilités de terrain, Sismicité, Al Hoceima, Maroc.

Abstract

This work presents a study of the geological hazards caused by seismic activity within Al Hoceima region, Morocco. This study required the identification of recent geological modifications caused by the seismic crisis of 1994. The analysis undertaken revealed the existence of a good correlation between seismicity and the geological field data. Furthermore, an attempt of quantifying the triggering factors of land instabilities caused us to suggest that the slope and seismicity are the main factors in the studied area.

Key words: Geological hazards, Land instability, Seismicity, Al Hoceima, Morocco.

1. INTRODUCTION

Situé au nord du Maroc, le Rif est sans doute la région la plus touchée par diverses instabilités de terrain. Ces phénomènes, dont l'impact sur l'environnement naturel est certes considérable, constituent également dans cette zone du Maroc une menace majeure et permanente pour l'infrastructure routière et les constructions.

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. D'autres travaux (El Fellah, 1994; El Fellah *et al.*, 1996; Fares *et al.*, 1994; 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). Ces dernières pouvant donner naissance à des déformations retardées (Yashuara, 1995) sont supposées être à l'origine d'importants affaissements (Fenelli *et al.*, 1992).

1. INTRODUCTION

Located in the north of Morocco, the Rif is undoubtedly the area most affected by different ground instabilities. These phenomena, of which the impact on the natural environment is admittedly extensive, also constitute a major and permanent hazard to the road infrastructure and buildings in this part of Morocco.

*Ground movements in the Rif have been the subject of many studies, of which Millies-Lacroix (1968) remains one of the pioneers in the study of these movements. Other works (El Fellah, 1994; El Fellah *et al.*, 1996; Fares *et al.*, 1994; Margua, 1994; Talhaoui *et al.*, 1999) focused on precise areas of the Rif, have invoked a combination of many factors causing the ground instability. However, studies of movement of slopes indicate that the seismic factor might be the origin of interstitial overpressures (Moriwacki *et al.*, 1985). These could generate late deformations (Yashuara, 1995) that are assumed to generate important collapses (Fenelli *et al.*, 1992).*

La région d'Al Hoceima, objet de cette étude, est le siège d'une activité sismique importante. L'étude de la sismicité historique du Maroc (El Mrabet, 1991) a révélé que cette région a été frappée au cours de son histoire par de nombreux tremblements de terre destructeurs. Elle a été secouée par un séisme le 26 mai 1994 (Md: 5,4 sur l'échelle de Richter) suivi par plusieurs centaines de répliques dont les plus importantes ont été ressenties par la population. Cet événement, d'une intensité maximale de VIII sur l'échelle d'intensité MSK-64 (Medvedev *et al.*, 1963) a été particulièrement destructeur. Il a provoqué de nombreuses instabilités de versants et de falaises côtières et a causé également des destructions partielles, voire totales, de plusieurs milliers de constructions.

L'objectif du présent travail est de mettre en évidence les relations qui existent entre les conditions géologiques et topographiques locales, et l'effet sismique. Un essai de quantification des facteurs responsables des mouvements de terrain sera proposé pour identifier le facteur déterminant du risque dans la zone d'étude.

The Al Hoceima area, subject of this survey, is the site of an important seismic activity.

*The study of the seismicity history of Morocco (El Mrabet, 1991) has revealed that this area has been struck by several destructive earthquakes. It has been shaken by an earthquake on the 26th May 1994 (Md: 5.4 on Richter scale) followed by several hundreds of aftershocks of which the biggest ones were felt by the population. This event, of a maximal intensity of VIII on MSK-64 scale (Medvedev *et al.*, 1963) was particularly destructive. It caused numerous instabilities of slopes and coast cliffs as well as partial or even total destruction of many thousands of buildings.*

The aim of the current work is to highlight relationships between local geological and topographic conditions, and the seismic effect. An attempt to quantify factors responsible for ground movements will be presented to identify the determining risk factor in the survey area.

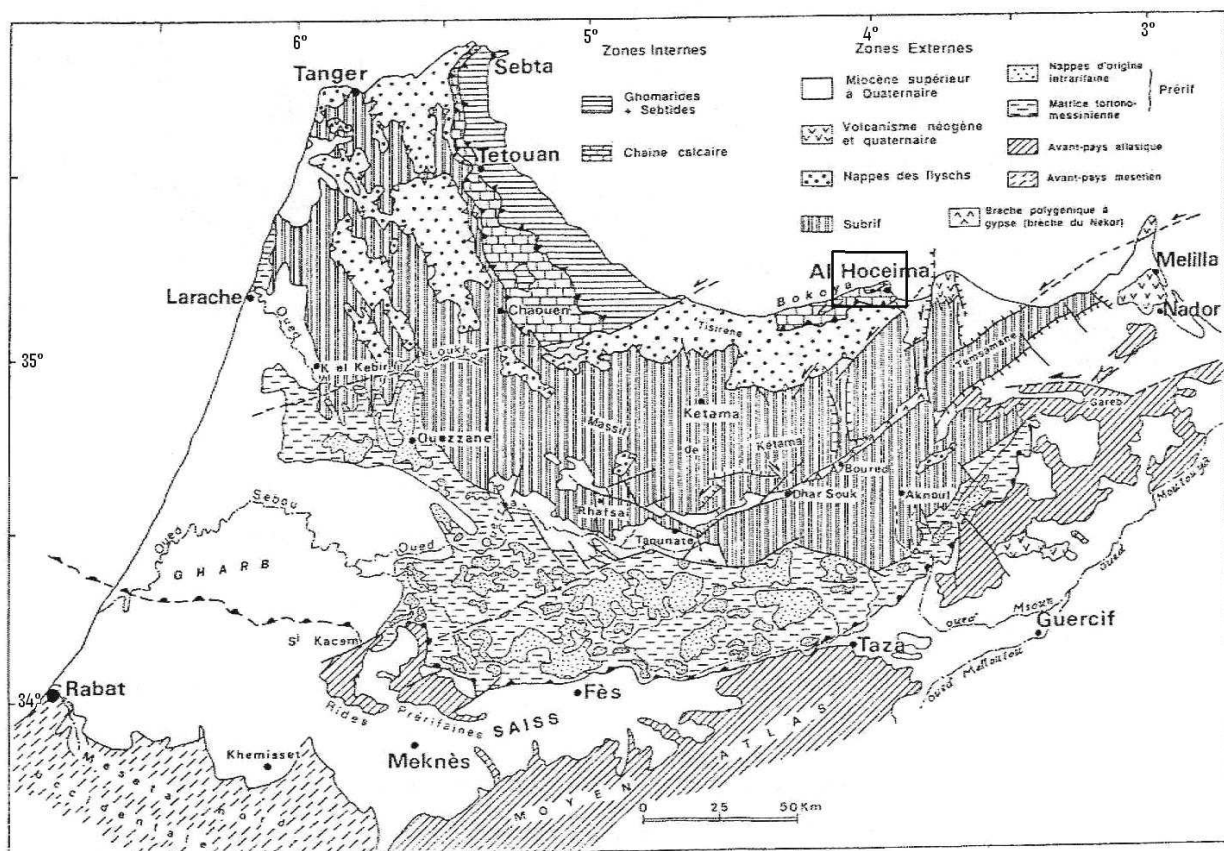


Fig. 1 – Situation du secteur d'étude (zone encadrée) / Location of the study area (framed zone).

riaux carbonatés rigides (calcaire à silex et dolomie) de la dorsale calcaire externe formant des reliefs remarquables : on citera la pointe de Boussekkour, Ras El Abed et le Jbel Assaguasaguane, suivis des terrains paléozoïques ghomarides connus à l'échelle locale sous le nom de la klippe d'Al Hoceima (Azzouz, 1992). Cette klippe s'étend depuis Al Hoceima jusqu'à l'oued Boussekkour à l'ouest. Sa série stratigraphique qui débute par des schistes satinés et noirs (Mourier, 1982) est surmontée par endroits par les calcaires dévoniens, constituant ainsi les points morphologiques les plus hauts comme le secteur de Sidi Mansor, de Tala Youssef et du port d'Al Hoceima.

Les terrains de la dorsale calcaire interne connus par leur couleur blanche affleurent au niveau de Jbel Palemas et longent la côte depuis Cala Bonita jusqu'à Ispalmadero. Ces formations couvrent la totalité du Jbel Amekrane au niveau du village d'Ajdir. Les formations de la semelle tertiaire, caractérisées par un faciès marnogréseux de couleur jaunâtre (Mourier, 1982), sont coincées tectoniquement entre la dorsale calcaire et les flyschs de Tisirène.

4. CADRE SISMIQUE DE LA REGION

Depuis le séisme d'Agadir en 1960 (Md: 5,7 sur l'échelle de Richter), le choc principal d'Al Hoceima qui a eu lieu le 26 mai 1994 (Md: 5,4 sur l'échelle de Richter) constitue le deuxième événement majeur qu'a connu le Maroc durant le XX^e siècle. L'épicentre a été localisé à 35.159° N, 3.955 W (Calvert *et al.*, 1997). Toutes les études sismiques ont conclu que l'hypocentre est situé à une profondeur entre 5 km et 13 km. Les solutions du mécanisme focal proposées correspondent à un mouvement décrochant à composante normale (Medina, 1995; Calvert *et al.*, 1997; Bezzeghoud et Buforn, 1999).

4.1. Données macrosismiques

Dans le cadre du présent travail, une enquête macrosismique de l'événement majeur du 26 mai 1994 a été réalisée. Plusieurs localités périphériques de la ville d'Al Hoceima ont été visitées (fig. 3). Des questionnaires ont été remplis grâce au témoignage des populations ayant vécu ou ressenti la secousse sismique. Le traitement de ces questionnaires a permis d'évaluer l'intensité ressentie. Au niveau de l'aire épiscopentrale (Tala Youssef, Idsoulyène, Tafnessa, Izemmourène), les dommages consistent en des destructions parfois totales des constructions (photo 1). Les fractures dans le sol dépassant par endroits 30 cm de large ont été repérées au niveau du douar Idsoulyène, et se prolongent sur une dizaine de km.

Dans la ville d'Al Hoceima, les constructions, en majorité en béton armé, montrent des fissures dans les murs. Les anciennes maisons (époque espagnole, avant

bonate materials (limestone with flint and dolostone) of the external dorsal limestone forming remarkable features: such as the summit of Boussekkour, Ras El Abed et Jbel Assaguasaguane, followed by the Ghomarides Palaeozoic terrains locally known as Al Hoceima's Klippe (Azzouz, 1992). This klippe extends from Al Hoceima to Boussekkour Wadi in the west. Its stratigraphical series, which begins with black and satiny schists (Mourier, 1982), is locally topped with Devonian limestones, making the highest morphological points such as the Sidi Mansor area, Tala Youssef and Al Hoceima port.

The terrains of the internal dorsal limestone, known for their white colour, outcrop at Jbel Palemas and along the coast from Cala Bonita to Ispalmadero. These formations cover the entirety of Jbel Amekrane at Ajdir village. The formations of the Tertiary sole, characterized by yellowish gritty-marl facies (Mourier, 1982), are tectonically squeezed between the limestone dorsal and the Tisirène flyschs.

4. SEISMIC FRAMEWORK OF THE AREA

*Since the Agadir earthquake in 1960 (Md: 5.7 on Richter scale), the main shock of Al Hoceima, which happened on the 26th May 1994 (Md: 5.4 on Richter scale) is the second major event that Morocco has experienced during the XXth Century. The epicentre has been located at N35.159°, W3.955 (Calvert *et al.*, 1997). All seismic studies have concluded that the hypocentre is located between 5 km and 13 km at depth. The solutions of proposed focal mechanism correspond to a strike-slip movement with a normal component (Medina, 1995; Calvert *et al.*, 1997; Bezzeghoud et Buforn, 1999).*

4.1. Macro seismic data

Within the framework of the current work, a macro seismic survey of the major event of the 26th May 1994 has been carried out. Many peripheral localities of the city of Al Hoceima have been visited (Fig. 3). Forms have been filled thanks to eyewitnesses that experienced or felt the seismic shock. The processing of these forms has allowed assessment of the felt intensity. At the epicentre area (Tala Youssef, Idsoulyene, Tafnessa, Izemmourene), the resulted damage is sometimes the total destruction of buildings (photo 1). Fractures on the ground locally exceeding 30 cm in width are seen in Idsoulyene village, and they extend over ten kilometres.

At the city of Al Hoceima, buildings, which are mainly built with concrete, show cracks in the walls. Old houses (Spanish era, before 1956) have partially or

1956) se sont partiellement ou totalement effondrées. *totally collapsed.*

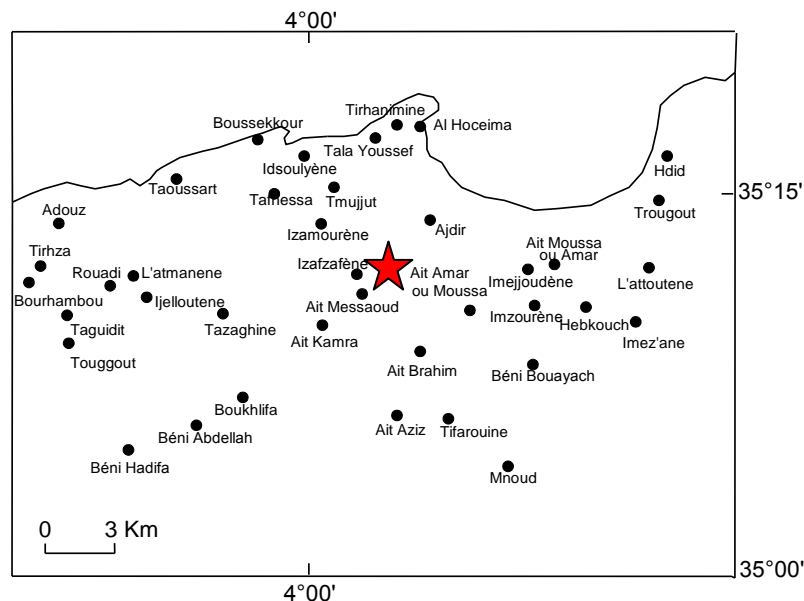


Fig. 3 – Carte des localités enquêtées dans le cadre de la collecte des données pour l'estimation de l'intensité ressentie par la population à la suite du séisme du 26 mai 1994. Environ 39 localités réparties de part et d'autre de l'épicentre (étoile) ont été visitées.

Map of surveyed locations used for gathering data on the estimation of felt intensity by the population after the earthquake of the 26th May 1994. About 39 locations are spread around the epicentre (star).



Photo 1 – Exemple de construction totalement détruite (région d'Izamourène au SW d'Al Hoceima).
Example of totally destroyed building (Izamourène area SW of Al Hoceima).

Les données recueillies au cours de l'enquête ont permis d'élaborer une carte macrosismique du séisme du 26 mai 1994 (fig. 4) en se basant sur l'échelle d'évaluation des intensités ressenties MSK-64 (Medvedev *et al.*, 1963). La ligne isoséiste qui borde l'aire épicentrale suit une direction NNE–SSW. Les autres lignes isoséistes suivent la même direction et nous ont permis de suggérer que la faille à l'origine de l'événement majeur puisse avoir la même direction.

*Data gathered during the survey have allowed the production of a macroseismic map of the 26th May 1994 earthquake (Fig. 4) based on the scale of the felt intensities MSK-64 (Medvedev *et al.*, 1963). The isoseismal line bordering the epicentre area follows a NNE-SSW direction. Other isoseismal lines follow the same direction and allowed us to suggest that the fault that controlled the major event might have the same direction.*

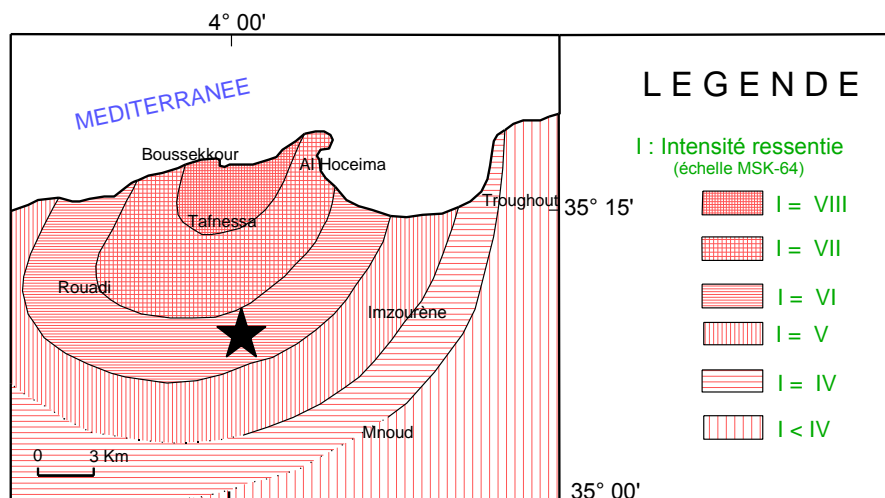


Fig. 4 – Carte macrosismique du séisme du 26 mai 1994 / *Macro seismic map of the earthquake of the 26th May 1994.*

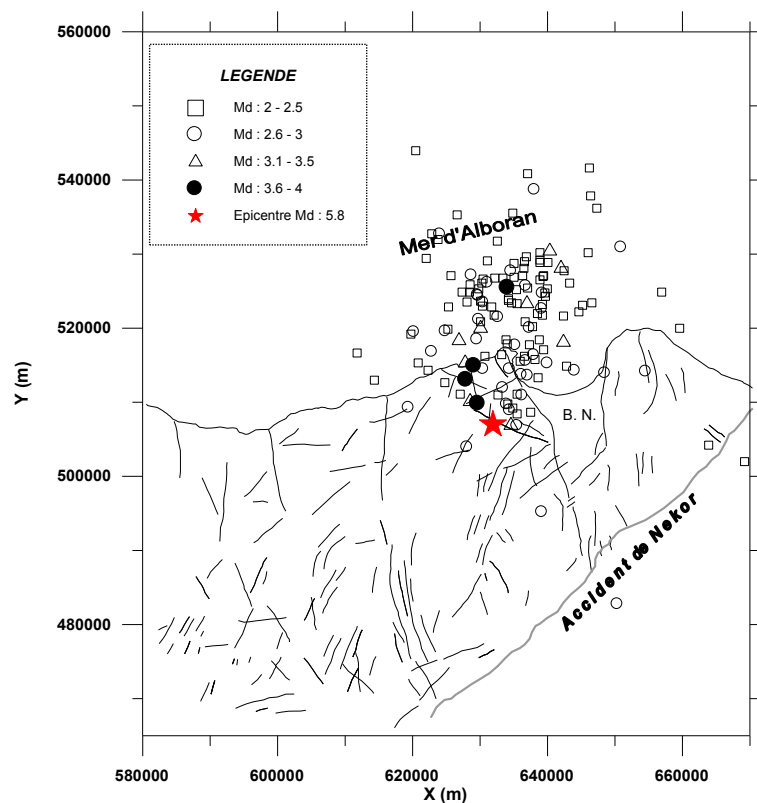


Fig. 5 – Carte de sismicité de la région d'Al Hoceima (les symboles représentent les magnitudes des séismes ayant secoué la région depuis le 26 mai 1994 jusqu'au 31 décembre 1994. B.N. = Bas Nekor) / *Seismicity map of the area of Al Hoceima (symbols represent magnitudes of earthquakes that have shaken the region from the 26th May 1994 to the 31st December 1994. B.N. = Bas Nekor).*

42. Sismicité instrumentale de la région d'Al Hoceima

En se basant sur des documents cartographiques existants notamment la carte géologique au 1/50 000 (feuille d'Al Hoceima), la carte structurale élaborée par Azzouz (1992) et nos propres observations de terrain, une carte de fracturation de la zone d'étude a été synthétisée. Sur cette carte ont été projetés les épicentres surve-

42. Instrumental seismicity of Al Hoceima area

Based on existing cartographic documents notably the 1:50,000 geological map (Al Hoceima sheet), the structural map produced by Azzouz (1992) and our own field observations, a synthetic fracture map has been produced. This map shows plots of epicentres that occurred during the seismic crisis of 1994 (26th May –

nus lors de la crise sismique de 1994 (26 mai – 31 décembre). L'analyse de la répartition de la sismicité de la région (fig. 5) montre que les répliques sont de magnitude modérée et dépassent rarement 3 sur l'échelle de Richter. Certaines d'entre elles se localisent dans les zones marquées par des failles, alors que d'autres se situent au large dans la Méditerranée. Les épicentres des répliques se disposent selon une direction NNE–SSW à NE-SW en conformité avec les données macrosismiques.

31st December). The analysis of the distribution of the seismicity in the region (Fig. 5) shows that the aftershocks were of a moderate magnitude and rarely exceeded 3 on the Richter scale. Some of them were located in zones marked with faults, whereas others were located off in the Mediterranean sea. Epicentres of aftershocks were located along a NNE–SSW to SE–SW direction in conformity with the macroseismic data.

5. MOUVEMENTS DE TERRAIN RENCONTRES DANS LA ZONE D'ETUDE

Les travaux de terrain réalisés dans le secteur étudié ont permis de localiser deux types d'instabilités de terrain : celles déclenchées à la suite de la crise sismique de 1994 – principalement des écroulements et des éboulements –, et d'autres plus anciennes dont le rejeu consiste en chutes de blocs au niveau de la niche d'arrachement des glissements de terrain connus dans le secteur (fig. 6).

5. DESCRIPTION OF GROUND MOVEMENTS ENCOUNTERED WITHIN THE SURVEY AREA

The field work within the studied area has allowed the localisation of two types of ground instabilities: those triggered following the seismic crisis of 1994, which are mainly collapses and crumbling, and other older features of which the resumption consists of block falls at known landslide scars in the area (Fig. 6).

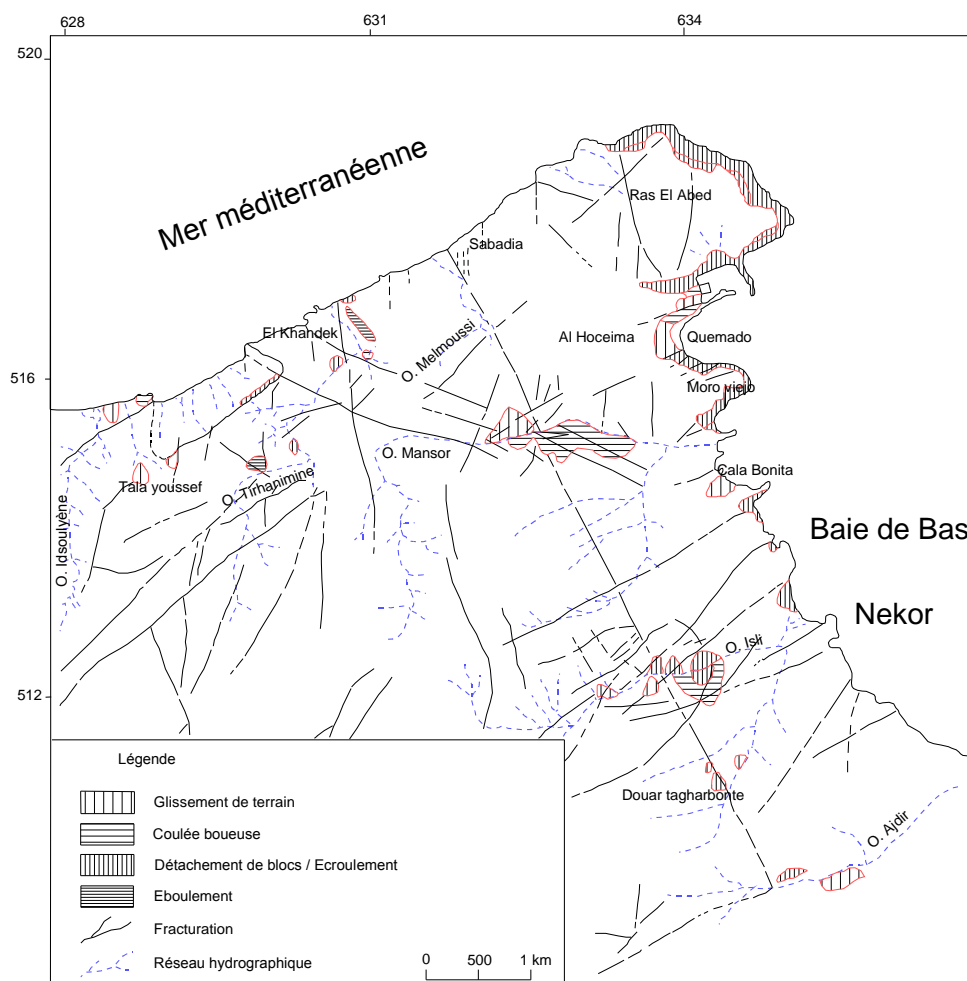


Fig. 6 – Carte des mouvements de terrain localisés au niveau du secteur d'étude / Map of ground movements located within the survey area.
 La description des instabilités de terrain rencontrées / Description of ground instabilities encountered at

dans ce secteur par le biais des coupes géologiques a permis de mettre en évidence les facteurs responsables du déclenchement des mouvements de terrain.

La diversité de ces mouvements est marquée par des glissements de terrain localisés surtout le long de l'oued Mansor sur ses versants nord et sud, au niveau de Tala Youssef, Quemado et aussi au niveau de l'oued Isli.

D'autres secteurs montrent des glissements très localisés surtout au niveau du Douar Tagharbonte et le long de l'oued Ajdir.

Dans la zone de Ras El Abed au nord d'Al Hoceima, de nombreux détachements de blocs et écroulements ont été repérés. Toute la zone marquée par ces mouvements de versant a été délimitée. En plus de ces phénomènes, qui occupent des superficies significatives, certaines zones présentent parfois des éboulements surtout au niveau de Tirhanimine et dans le secteur d'El Khandek.

51. Glissement de terrain de Tala Youssef

Situé à l'ouest de la ville d'Al Hoceima, sur la côte méditerranéenne, le site de Tala Youssef présente des formations géologiques de la nappe paléozoïque de Béni Hozmar (nappe paléozoïque ghomaride). La coupe réalisée à ce niveau (fig. 7) montre des formations tendres (schistes siluriens et argilites noires) surmontées par des formations rigides (calcaires dévoniens). Le site est marqué par des failles de direction N70. Le séisme de 1994 a provoqué des chutes de blocs calcaires d'une ancienne niche d'arrachement.

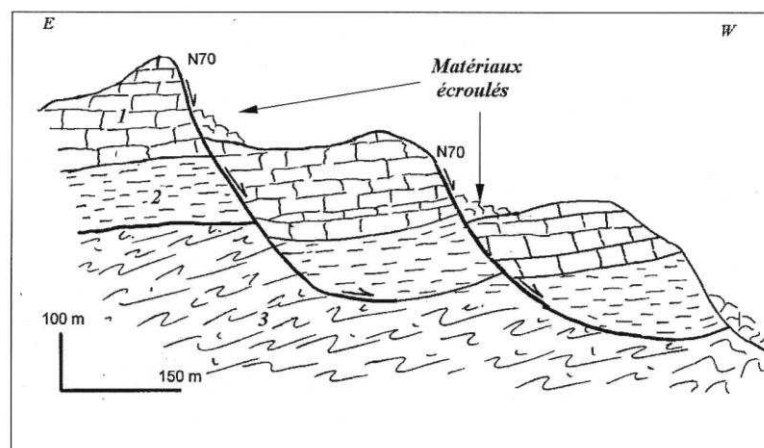


Fig. 7 – Coupe géologique au niveau de Tala Youssef / Geological section at Tala Youssef.
1. calcaire dévoniens / Devonian limestone; 2. argilite noire dévoniennne / Devonian black argillite; 3. schiste silurien / Silurian schist.

52. Ecoulement de Cala Bonita

Cette instabilité apparaît au sud de la ville d'Al Hoceima. La zone de Cala Bonita est marquée par des falaises d'une dizaine de mètres de hauteur. Dans ce secteur, les formations, à armature carbonatée appartenant à

the area by the bias of geological sections has allowed responsible factors for the onset of the ground movements to be identified.

The diversity of these movements is marked by landslides located especially along the Mansor Wadi on the north and the south side, at Tala Youssef, Quemado and also at Isli Wadi.

Other areas show much localised landslides especially at Tagharbonte Village and along the Ajdir Wadi.

In the Ras El Abed area north of the city of Al Hoceima, a number of block falls and crumbling have been found. The whole zone marked by these movements has been outlined. In addition to these phenomena, which occupy extensive areas, some zones show collapses especially at Tirhanimine and in the area of El Khandek.

51. Landslide of Tala Youssef

Located west of the city of Al Hoceima, on the Mediterranean coast, the site of Tala Youssef presents geological formations of the Palaeozoic nappe of Béni Hozmar (Ghomaride Palaeozoic nappe). Here, the section (Fig. 7) shows soft formations (Silurian schist and black argillites) topped with hard formations (Devonian limestones). The site is marked by faults of N70 direction. The earthquake of 1994 has caused falls of limestone blocks from an old landslide scar.

52. Collapse of Cala Bonita

This instability appears south of the city of Al Hoceima. The zone of Cala Bonita is marked by cliffs tens of meters in height. In this area, formations, with a carbonate frame of the internal calcareous range and

la dorsale calcaire interne et couvrant les terrains rouges triasiques à faciès tendre, sont affectées par des failles de direction N80–45SE (fig. 8). Les accidents tectoniques (failles normales), la lithostratigraphie (faciès tendre surmonté par un faciès rigide), associés aux précipitations qu'a connues la région en hiver, paraissent être la cause principale de ce glissement de terrain. Cependant, la crise sismique de 1994 a engendré des écroulements à ce niveau. Ces phénomènes semblent être guidés par le rejeu des failles normales situées à l'amont de la falaise.

overlying the red Triassic terrains with a soft facies, are affected by faults of N80-45SE direction (Fig. 8). Tectonic lineaments (normal faults), the lithostratigraphy (soft facies overlain by a hard facies), associated with rainfalls in the region in this very winter, appear to be the main cause of this landslide. However, the seismic crisis of 1994 has generated collapses here. These phenomena appear to be controlled by recurrence of normal faults located in the upper-cliff.

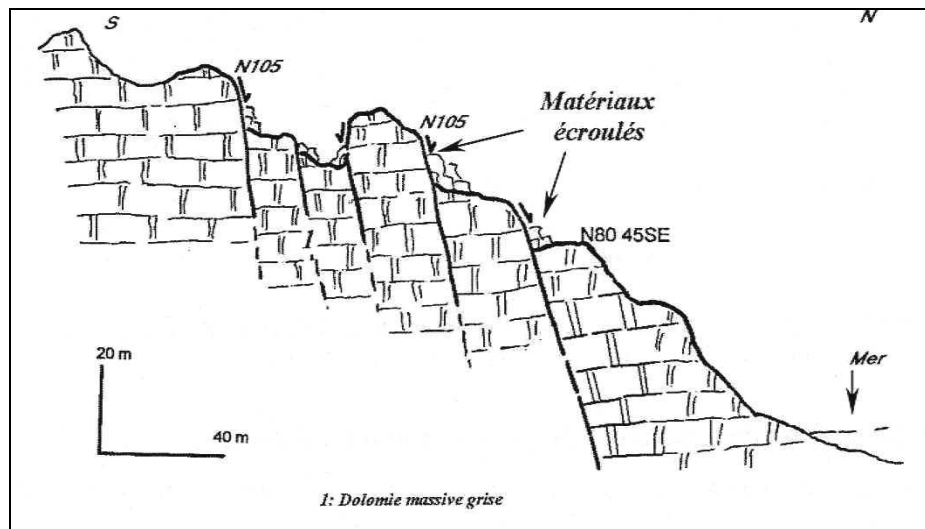


Fig. 8 – Coupe géologique au niveau de Cala Bonita / Geological section at Cala Bonita.

Les deux cas d'instabilités cités ci-dessus (glissement de terrain et écroulements) montrent des indices de déformations retardées selon les suggestions de Yashuara (1995) puisque nous avons noté dans la partie amont du secteur l'apparition des structures tectoniques en forme de graben, ce qui laisse supposer d'éventuels affaissements consécutifs au rejeu des failles limitant ce graben en relation avec l'activité sismique actuelle de la région d'Al Hoceima.

53. Chutes de blocs de Bas Melmoussi

Le long du tracé routier qui mène vers la plage d'El Khandek à l'ouest de la ville d'Al Hoceima, nous avons repéré au niveau de l'embouchure de l'oued Melmoussi des chutes de blocs de formations quaternaires (sable consolidé) marquées par une stratification inclinée vers le SE et des fissures verticales qui surmontent à plat les schistes de la nappe paléozoïque d'Aakaili (fig. 9). La chute de blocs est probablement induite par le type de faciès (tendre), la nature topographique (pente supérieure à 30°), la fracturation et la sismicité. Elle entraîne au niveau de ce site des perturbations du trafic routier.

Both instability cases mentioned above (landslide and collapses) show late deformation features after suggestions of Yashuara (1995) since we noted in the upper part of the area the appearance of graben-like tectonic structures, which let us suppose that the existence of eventual collapses consecutive to the reactivation of faults delineating this graben is associated with the current seismic activity of the area of Al Hoceima.

53. Block falls of Bas Melmoussi

Along the road which goes to the beach of El Khandek west of the city of Al Hoceima, we found at the mouth of Melmoussi Wadi block falls of Quaternary formations (consolidated sand) marked with an inclined bedding dipping towards the SE and vertical cracks, which are extended to the surface of the schists of the Aakaili Palaeozoic nappe (Fig. 9). Block falls are probably induced by the facies type (soft), the topographical nature (slope > 30°), fracturing and seismicity. Here, this activity leads to disruption of road traffic.

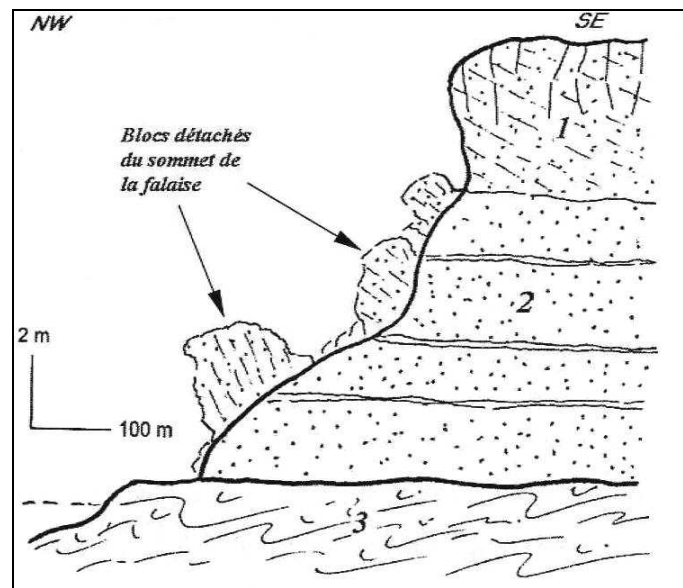


Fig. 9 – Coupe géologique au niveau du Bas Melmoussi / Geological section at Bas Melmoussi.

1. calcarénite dunaire d'âge quaternaire à stratification oblique et diaclases / dune calcarenite of Quaternary age and with oblique bedding and joints;
2. calcarénite montrant des niveaux de gastéropodes / calcarenite showing layers of gastropods; 3. schiste / schist.

54. Chutes de blocs de Ras El Abed

Situé au nord de la ville d'Al Hoceima, le secteur est caractérisé par les formations rigides de la dorsale calcaire externe (dolomie massive). Il est marqué aussi par la présence de falaises, siège d'importantes chutes de blocs (fig. 10). Les failles subverticales dominant la côte participent probablement dans l'effondrement de paquets carbonatés vers la mer. Cette instabilité de terrain est probablement activée par le régime tectonique des bordures maritimes de la chaîne rifaine qui est contrôlée par l'effondrement de la plaque d'Alboran (Azzouz, 1992; Chalouan *et al.*, 1994; Assebriy & Cherkaoui, 1995).

54. Block falls of Ras El Abed

Located north of the city of Al Hoceima, the area is characterized by hard formations of the external calcareous range (massive dolostone). It is also marked by the presence of cliffs, site of important block falls (Fig. 10). Sub-vertical faults dominating the coast are probably involved in the collapse of the carbonate sets into the sea. This instability of the ground is probably activated by the same tectonic regime of the marine borders of the Rifan belt, which is controlled by the collapse of the Alboran Plate (Azzouz, 1992; Chalouan *et al.*, 1994; Assebriy & Cherkaoui, 1995).

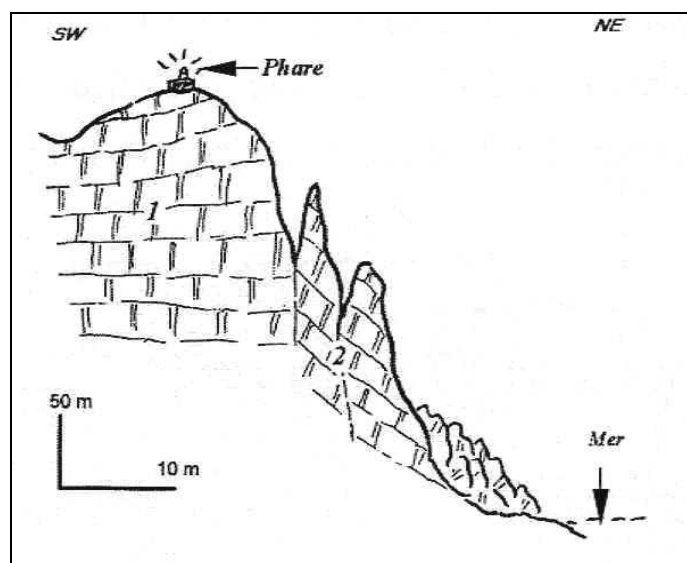


Fig. 10 – Coupe géologique au niveau de Ras El Abed / Geological section at Ras El Abed.

1. dolomie massive / massive dolostone; 2. blocs détachés / fallen blocks.

6. QUANTIFICATION DES FACTEURS CONTRIBUTANT AU DECLENCHEMENT DES INSTABILITES DE TERRAIN

6.1. Principaux facteurs retenus

Les travaux de terrain dans 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. La crise sismique a engendré des mouvements de terrain de type rapide et discontinu (écroulements et éboulements). Certaines instabilités de terrain de type lent et continu (glissements de terrain) ont rejoué sous l'effet sismique en donnant naissance à des mouvements rapides et discontinus. Il s'agit particulièrement des glissements de terrain localisés au niveau de Tala Youssef et de Cala Bonita.

Par ailleurs, les secousses sismiques mises en jeu n'affectent pas une zone restreinte qui serait limitée à l'équilibre d'un talus par exemple. Mais, à partir d'une intensité ressentie par la population, toute une aire épiscopentrale est délimitée (fig. 4). De même, le report des épicentres sismiques montre une dispersion relativement importante (fig. 5). La complexité de l'étude réside dans la difficulté de mettre en évidence tous les facteurs en cause.

Les résultats d'une étude précédente basée sur l'évaluation de l'effet de site à partir des mesures du bruit de fond au niveau de la région d'Al Hoceima (Talhaoui *et al.*, 2001) ont souligné la particularité que jouent les conditions locales (géologie et topographie) dans l'amplification du signal sismique.

Dans la présente étude, à partir de l'analyse de l'effet sismique sur les formations géologiques prenant en compte la topographie locale, quatre facteurs déstabilisateurs sont retenus : la topographie (pente), la géologie (lithostratigraphie et fracturation) et la sismicité. Chaque facteur a été subdivisé en trois composantes dans le but de chercher le facteur déterminant dans le déclenchement des instabilités de terrain. Le tableau 1 regroupe l'ensemble des instabilités, les sites où elles ont été localisées et les subdivisions des facteurs contribuant à leur déclenchement.

La subdivision des facteurs examinés proposée s'établit comme suit :

- pente :
 - . forte (*Forte*) > 40°
 - . moyenne (*Moy.*) entre 20° et 40°
 - . faible (*Faible*) < 20°
- lithostratigraphie :
 - . roche compacte homogène (*R.C.H.*)
 - . roche tendre homogène (*R.T.H.*)
 - . hétérogène (*L.H.*)

6. QUANTIFYING THE FACTORS CONTRIBUTING TO THE TRIGGERING OF GROUND INSTABILITIES

6.1. Main retained factors

Field work in the area of Al Hoceima highlights the essential role that geological formations and topography play in the distribution of ground movements. The seismic crisis has generated ground movements of quick and discontinuous type (collapse and crumbling). Some ground instabilities of slow and continuous type (landslide) have resumed under the seismic effect and this generated quick and discontinuous movements. This is particularly the case in landslides located at Tala Youssef and Cala Bonita.

In other respects, recurrent seismic tremors do not affect a restraint zone, which would be limited to the stability of a slope for example. But, from intensity that has been felt by the population, a whole epicentral area has been delineated (Fig. 4). The report of the seismic epicentres shows also a slightly important dispersion (Fig. 5). The complexity of this study is in the difficulty of highlighting all the causal factors.

*Results of a previous study based on assessment of the site effect from measuring the background noise of the area of Al Hoceima (Talhaoui *et al.*, 2001) have underlined the special role that local conditions (geology and topography) play in the amplification of the seismic signal.*

In the current study, and from analysis of the seismic effect on geological formations taking into account the local topography, four factors of destabilization are retained: the topography (slope), the geology (lithostratigraphy and fracturing), and the seismicity. Each factor has been subdivided into three components in order to search the determination factor in setting off the ground instabilities. The table 1 groups all instabilities, sites where have been localised and the subdivisions of determining factors contributing to their generation.

The proposed subdivision of studied factors is as follows:

- Slope:
 - . high (*Forte*) > 40°
 - . moderate (*Moy.*) between 20° and 40°
 - . low (*Faible*) < 20°
- Lithostratigraphy:
 - . homogeneous hard rock (*R.C.H.*)
 - . homogeneous soft rock (*R.T.H.*)
 - . heterogeneous (*L.H.*)

- fracturation :
 - . intense ou forte (*Forte*)
 - . moyenne (*Moy.*)
 - . quasi-absente : faible (*Faible*)
 - sismicité : elle est classée en fonction des dégâts induits par la crise sismique de 1994 dans chaque site :
 - . forte : déclenchement d'un nouveau mouvement de terrain
 - . moyenne : rejeu d'un ancien mouvement de terrain
 - . faible : absence de réponse du site vis-à-vis de la sismicité.
- Fracturing:
 - . intense or high (*Forte*)
 - . moderate (*Moy.*)
 - . near(almost) absent: low (*Faible*)
 - Seismicity: it is classified according to damage induced by the seismic crisis of 1994 in each site:
 - . High: triggering of a new ground movement
 - . Moderate: reactivation of an old ground movement
 - . Low: absence of response of the site to the seismicity

Tableau 1 – Facteurs déclenchant, sites et types d'instabilités / *Triggering factors, sites and instability types.*
(G. terrain : glissement de terrain / *landslide*; Ecoulement / *collapse*; Détachement de blocs / *block detachment*).

Site (et type d'instabilité) <i>Site (and type of instability)</i>	Facteurs déclenchant <i>Triggering factors</i>			Pente <i>Slope</i>			Lithostratigraphie <i>Lithostratigraphy</i>			Fracturation <i>Fracturing</i>			Sismicité <i>Seismicity</i>		
	<i>Forte</i>	<i>Moy.</i>	<i>Faible</i>	<i>R.C.H.</i>	<i>R.T.H.</i>	<i>L.H.</i>	<i>Forte</i>	<i>Moy.</i>	<i>Faible</i>	<i>Forte</i>	<i>Moy.</i>	<i>Faible</i>			
Sidi Mansor versant nord (G. terrain)		*				*	*				*				
Plage Tala Youssef (G. terrain)	*					*	*				*				
Quemado (G. terrain)	*					*		*			*				
Douar Tala Youssef (G. terrain)	*				*		*			*					
Port d'Al Hoceima (G. terrain)	*					*		*			*				
Oued Tanout (G. terrain)		*				*			*	*					
Plage Ispalmadero (G. terrain)	*					*	*				*				
Sidi Mansor versant sud (G. terrain)	*					*			*			*			
Embouchure O. Isli (G. terrain)	*					*			*			*			
O. Taghrbount, partie aval (G. terrain)	*					*	*				*				
O. Taghrbount, partie amont (G. terrain)	*					*		*				*			
Douar Taghrbount (G. terrain)	*					*	*				*				
O. Ajdir versant sud (G. terrain)		*				*			*			*			
O. Ajdir versant nord (G. terrain)	*				*				*			*			
Matadero (Ecoulement)	*					*	*			*					
Cala Bonita (Ecoulement)	*			*			*			*					
Lotissement Cala Bonita (Ecoulement)	*			*				*		*					
Tmujiut (Ecoulement)	*				*			*		*					
Boussekkour (Ecoulement)	*					*		*		*					
O. Sidi Mansor (Ecoulement)	*				*		*			*					
Tafnessa (Ecoulement)	*			*			*			*					
Port d'Al Hoceima (Ecoulement)	*			*					*	*					
Plage Elkhandedek (Ecoulement)	*			*				*		*					
Embouchure O.Elkhandedek (Ecoulement)	*					*			*	*					
O. Isli, briqueterie (Ecoulement)	*					*			*	*					
Dhar Selloum (Ecoulement)		*		*				*		*					
Cala Bonita (Eboulement)	*			*				*		*					
Matadero (Eboulement)	*					*		*		*					
Village Melmoussi (Eboulement)	*					*		*		*					
Village Mirador (Eboulement)	*					*	*			*					
Village Tala Youssef (Eboulement)	*					*		*		*					
Sabadia (Détachement de blocs)		*			*				*	*					
Ras El Abed (Détachement de blocs)	*			*			*			*					
Moro Viejo (Détachement de blocs)	*			*			*			*					
Station RTM (Détachement de blocs)		*				*	*			*					

62. Evaluation de la contribution de chaque facteur dans le déclenchement des instabilités de terrain

L'évaluation de la contribution de chaque facteur participant à la genèse des mouvements de terrain s'est avéré nécessaire. Basée sur une approche statistique permettant de quantifier ces facteurs, cette opération a permis d'attribuer une valeur pour chaque composante de facteur. Dans le but de déterminer le facteur principal permanent (pente, lithostratigraphie, fracturation) ou dynamique (sismicité) intervenant dans l'occurrence des instabilités de versant, le tableau 2 présente le résultat de cette quantification et permet de mettre en évidence la contribution de chaque facteur.

Le pourcentage de la valeur maximale de chaque subdivision de facteur représente l'estimation relative de la contribution de chaque facteur ayant participé aux mouvements de versant sous l'effet de l'activité sismique qu'a connue la région d'Al Hoceima en 1994. D'après le tableau 2, nous remarquons que le facteur "pente" a un rôle prépondérant dans l'occurrence des mouvements de terrain.

62. Evaluation of the contribution of each factor in the triggering of ground instabilities

Evaluation of the contribution of each factor involved in the creation of ground movement is proven to be necessary. Based on a statistic approach, which allows quantifying of these factors, this operation has allowed attribution of a value to each factor component. In order to determinate the main permanent factor (slope, lithostratigraphy, fracturing) or dynamic (seismicity) involved in the occurrence of the site instability, the table 2 presents the results of this quantification and shows the contribution of each factor.

The percentage of the maximal value of each subdivision of the factor represents the relative estimation of the contribution of each factor to the development of slope movements as a result of seismic activity in the area of Al Hoceima in 1994. According to the table 2, we noticed that the factor 'slope' has an important role in the occurrence of land movements.

Tableau 2 – Quantification des facteurs retenus / *Quantification of the retained factors.*

	Facteurs permanents <i>Permanent factors</i>						Facteur dynamique <i>Dynamic factor</i>					
	Pente <i>Slope</i>			Lithostratigraphie <i>Lithostratigraphy</i>			Fracturation <i>Fracturation</i>			Sismicité <i>Seismicity</i>		
<i>Subdivision</i>	<i>Forte</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Faible</i>	<i>R.C.H.</i>	<i>R.T.H.</i>	<i>L.H.</i>	<i>Forte</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Faible</i>	<i>Forte</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Faible</i>
<i>Nombre d'instabilités Number of instabilities</i>	29	6	0	9	5	21	14	12	9	23	7	5
<i>Pourcentage Percentage</i>	83%	17%	0%	25,71%	14,28%	60%	44%	34,28%	25,71%	62%	20%	14,28%

63. Discussion

La quantification des facteurs contribuant au déclenchement des instabilités de terrain au niveau de la zone d'étude a permis de mettre en évidence les relations existant entre les facteurs locaux et la sismicité actuelle de la région d'Al Hoceima.

Ainsi, les variations topographiques d'un site à l'autre paraissent être décisives dans le déclenchement des mouvements de terrain. Les sites Cala Bonita, Matadero, Moro Viejo et Ras El Abed sont caractérisés par une pente forte et une lithostratigraphie hétérogène, et marqués par la dominance de formations rigides de la dorsale calcaire intercalées avec des terrains à faciès tendre. L'activité sismique de 1994 a provoqué le déclenchement de mouvements de terrain, qui, dans la majorité des cas, sont des écroulements, des éboulements et des chutes de blocs.

Dans les sites où les pentes sont de type moyennes (20°-40°), il apparaît que la fracturation qui, dans la plupart des cas, suit les directions principales de la structu-

63. Discussion

Quantification of factors that are contributing to the start of ground instabilities in the survey zone has shown the relationships existing between the local factors and the current seismicity of the area of Al Hoceima.

Thus, topographical variations from one site to another appear to be decisive in the start of ground movements. Cala Bonita, Matadero, Moro Viejo and Ras El Abed sites are characterized by a high slope and heterogeneous lithostratigraphy, and marked by the dominance of hard formations of the dorsal limestone intercalated with terrains of a soft facies. The seismic activity of 1994 has caused the start of ground movements, which are, in most cases, collapses and block falls.

In sites where slopes are moderate (20°-40°), it appears that the fracturing, which follows in most cases the main direction of the structure of the Bokoya massif,

ration du massif de Bokoya, soit le facteur déstabilisateur le plus important. Par ailleurs, il est à signaler que les contacts lithostratigraphiquement hétérogènes présentent des zones de faiblesse même si la fracturation n'est pas intense ; tel est le cas de Sabadia à l'ouest d'Al Hoceima. Cette fracturation participe davantage aux mouvements de terrain sous l'effet sismique. Dans les secteurs où la pente est faible ($P < 20^\circ$), aucune instabilité de terrain n'a été repérée. Ainsi, nous proposons que la valeur de 20° soit considérée comme pente limite dans la zone étudiée.

7. CONCLUSION

La présente étude a permis l'identification des différents secteurs instables rencontrés dans la région d'Al Hoceima. Elle a permis de réaliser une description à travers des coupes géologiques des différents types de mouvement de terrain et de souligner l'hétérogénéité des formations géologiques des zones étudiées.

L'analyse des effets de la crise sismique qu'a connue la zone en 1994 révèle que la majorité des secteurs où ont été localisés des glissements de terrain déclenchés avant le séisme du 26 mai 1994 n'ont pas montré d'indice de mouvement significatif. Cependant, les instabilités de terrain de type écroulement et éboulement ont été largement observées là où la lithostratigraphie est de type hétérogène, et où la pente dépasse 40° .

Ceci ne doit cependant pas conduire à négliger les zones marquées par des formations rigides et fracturées comme Ras El Abed, où les falaises abruptes sont des zones d'importants détachements de blocs. Les diaclases ouvertes en amont des falaises sont des facteurs considérables d'instabilités potentielles de terrain.

L'approche de quantification des facteurs contribuant aux mouvements de terrain suggère qu'une pente dépassant 40° associée à l'activité sismique récente de la région demeure le facteur à risque le plus important. Il est préconisé ainsi de surveiller les 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 glissements remarquables de terrain soient surveillés. Un mouvement de terrain lent et continu peut jouer, sous l'effet d'un facteur dynamique, en mouvement rapide et discontinu. Ce mouvement peut alors évoluer vers des phénomènes de rupture et atteindre des accélérations brutales ; et plus un mouvement est rapide, plus il risque d'être destructeur, voire meurtrier. □

is the most important destabilizing factor. Moreover, the lithostratigraphically heterogeneous contacts present weakness zones even if the fracturing is not intense; that is the case of Sabadia west of Al Hoceima. This fracturing is involved more in ground movements under the seismic effect. In areas where the slope is low ($S < 20^\circ$), no ground instability has been found. Thus, we propose that the value of 20° should be considered as the slope limit in the studied area.

7. CONCLUSION

The current survey has allowed identification of different unstable areas encountered in the area of Al Hoceima. A description of different types of ground movement across geological sections was carried out and the heterogeneity of geological formations of the studied zones was underlined.

Analysis of the effects of the seismic crisis that has been experienced by this zone in 1994 has revealed that most areas where landslides occurred before the earthquake of the 26th May 1994, did not show a significant movement. However, terrain instabilities of collapse and crumbling types have been widely observed where the lithostratigraphy is of heterogeneous type, and where the slope exceeds 40° .

This should not, however, lead to neglect the zones characterised by hard and fractured formations such as Ras El Abed, where steep cliffs are the zones of important block falls. Open joints in the upper part of the cliffs are very important factors of potential ground instability.

The approach of quantifying factors contributing to ground movements suggests that any slope that exceeds 40° associated with the recent seismic activity remains the main factor of risk. It is accordingly recommended that zones with moderate slope and presenting potential or known instabilities are monitored because a severe earthquake could cause damage here.

Given that the surveyed area is characterized by a heterogeneous lithostratigraphy, which can be generalized to the scale of the internal domain of the Central Rif, we suggest that the sites where significant landslides occur should be monitored. A slow and long ground movement can become, under the effect of a dynamic factor, a discontinuous and quick movement. This movement could, therefore, evolve to such as fracturing phenomena and reach sudden accelerations; and the more rapid a movement, the more it risks being destructive and even deadly. □

Références bibliographiques

- 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 et Mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 235, 155 p.
- Assebriy L., Bourgois T., Cherkaoui T.E., Azdimousa A. (1993) – Evolution tectonique récente de la zone de la faille de Nekor : Importance paléogéographique et structurale dans le Rif externe, Maroc. – *Journal of African Earth Sciences*, 17, 1, p. 65-74.
- Assebriy L., Cherkaoui T. E. (1995) – Tectonique cassante et sismotectonique dans le Rif et son avant-pays (Maroc). – *Africa Geosciences Review*, 2, 2, p. 181-188.
- Azzouz O. (1992) – Lithostratigraphie et tectonique des terrains paléozoïques ghomarides du massif des Bokoya (Rif Interne, Maroc). – Thèse 3^e cycle, Rabat, 208 p.
- Bezzeghoud M., Buforn E. (1999) – Source parameters of the 1992 Melilla (Spain, Mg: 4.8), 1994 Al Hoceima (Morocco, Mg: 5.8), and 1994 Mascara (Algeria, Mg: 5.7) earthquakes and seismotectonic implications. – *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89, 2, p. 359-372.
- Blumenthal M.M. (1937) – Esbozo geológico del Rif en la región de Bokoya. – *Bol. Inst. Geol. Min. España, Madrid*, 3^e ser., 44, p. 199-352.
- Calvert A., Gomez F., Seber D., Barazangi M., Jabour N., Iben Brahim 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, 3, p. 637-651.
- Chalouan A., Saji R., Bally A.W., Demnati A., Ouzzaba M. (1994) – Nouvelles données sismiques sur l'évolution tectono-sédimentaire de la partie SW de la mer d'Alboran (Méditerranée occidentale). – *RCMNS, interim colloquium on "Neogen basin evolution and tectonics of the Mediterranean area"* Rabat, April 1994, abstracts.
- El Fellah B. (1994) – Eboulement rocheux dans le Paléozoïque du Rif : présentation d'un cas sur la route Oued Lao-Jebha. – 7^e Congrès Intern. de l'AIGI, Lisboa, Portugal, p. 3927-3931.
- El Fellah B., Azzouz O., Assebriy L. (1996) – Sikha Asfalou ; exemple de glissement de terrain littoral sur la côte méditerranéenne des Bokoya entre Torrès et Badis, Rif, Maroc. – *ORSTOM, réseau érosion*, bull. n° 16.
- El Mrabet T. (1991) – La sismicité historique du Maroc. – Thèse 3^e cycle, Univ. Mohamed V, Fac. Lettres et Sciences Humaines, Rabat, 370 p. (en arabe).
- Fares A., Rollet M., Broquet P. (1994) – Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. – *Revue Française de Géotechnique*, 69, p. 63-72.
- Fenilli G.B., Percareli L., Silvestri F. (1992) – Deformation process of a hill shaken by the Irpinia earthquake in 1980. – *Comptes rendus French-Italian Conf. on slope stability in seismic area*, Bordghera, p. 47-62.
- Flageollet J.C. (1989) – Les mouvements de terrain et leur prévention. – *Ed. Masson*, Paris, 224 p.
- Grünthal G. (ed.) (1993) – European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-scale). – *Cahiers de Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, Luxembourg, vol. 7, 79 p.
- Margua K. (1994) – Essai de cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de la région d'Al Hoceima. – Thèse universitaire, Univ. Franche-Comté, 196 p.
- Maurer G. (1968) – Les montagnes du Rif central, étude géomorphologique. – *Trav. Inst. Sci. Série géol. et géog. phys.*, 15, Rabat.
- Medina F. (1995) – Present-day state of the stress in northern Morocco from focal mechanism analysis – *J. Struct. Geol.*, 17, p. 1035-1046.
- Medvedev S., Sponheuer W., Karnik V. (1963) – Intensity scale of earthquakes, *U.G.G.I. 13th Conf.*, Berkeley.
- Meguard F. (1968) – La partie orientale du massif des Bokoya. – *Notes Mém. Serv. Géol. Maroc*, 194, p. 123-181.
- Millies-Lacroix A. (1968) – Les glissements de terrain, présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de terrain dans le Rif. – *Mines et Géologie*, 27, p. 45-54.
- Moriwacki Y., Idrissi I.M., Moses T.L., Ladd R.S. (1985) – A re-evaluation of the « L » Street slide in Anchorage during the 1964 Alaska earthquake. – *Comptes rendus XII ICSMFE*, Rio de Janeiro, 3, p. 1583-1586.
- Mourier T. (1982) – Etude géologique et structurale du massif des Bokoya. – *Trav. Lab. Géol. de l'Afrique*, 6, Univ. Paris Sud.
- Picarelli L. (1995) – L'eau dans les pentes. – *Séminaire sur les glissements de terrain : Cas du Nord Marocain*, EHTP, Casablanca, 31 octobre et 1 novembre 1995.
- 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. – *Colloque des Bassins Sédimentaires Marocains*, Oujda, 27/28 et 29 avril 1999.
- Talhaoui A., Iben Brahim A., Aberkan M., El Mouraouah A. (2001) – Evaluation de l'effet de site et proposition de microzonage sismique de la région d'Al Hoceima. – *Workshop sur la sismicité et la gestion du risque sismique dans la région euro-méditerranéenne*, Agadir, Maroc, 18-19 juin 2001.
- Yashuara K. (1995) – Consolidation and settlement under cyclic loading. – *Comptes rendus Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soil*. Hiroshima.

CIFEG P.O. 2006/41 (*)

**Genèse de la croûte
continentale
en Afrique de l'Ouest à
l'Archéen :
une approche
« régionale et systématique »**

par Denis Thiéblemont

130 p., 53 tab. et fig., 6 p. réf.
Noir et blanc
Ouvrage en français
Résumé anglais

EN PREPARATION

IN PREPARATION

Table des matières

Résumé - Abstract

Avant propos

Accrétion et différenciation crustale
Composition de la croûte continentale
Genèse de la croûte continentale : rôle possible
du slab melting
Slab melting paléoarchéen dans le craton ouest-africain

Eléments de méthodologie

« Discrimination géotectonique » ? !
Bases de données
Requêtes
Un « espace géochimique » discontinu
Le cas des basaltes de rides médio-océaniques
Limites de la discrimination
A la recherche du manteau « primordial »
Signification géotectonique des rhyolites et
granites de type « low-Al – high-Yb »
Conclusion

Magmatologie archéenne du craton ouest-africain

Cadre géologique
Avant propos
*Lithostratigraphie du domaine archéen
et de sa bordure*
Constitution du socle cristallin
*Sédimentation tardi- à post-archéenne
dans le bloc archéen*
*Structuration et remobilisation de la marge
du bloc archéen*
Synthèse

Nature et origine du magmatisme paléoarchéen

A la recherche du protolithe

Modélisation

Contraintes expérimentales

Eléments incompatibles

Synthèse

Le magmatisme léonien et la différenciation du manteau durant l'Archéen

Le magmatisme léonien : nature et localisation

*La « suite magmatique léonienne », caractères
généraux*

*La « suite magmatique léonienne », processus
de différenciation*

L'hétérogénéité du manteau léonien

*Persistance de l'hétérogénéité mantellique léonienne
jusqu'à l'Eburnéen*

Synthèse

L'épisode libérien : métamorphisme haute température et granitisation

*Le métamorphisme et le magmatisme libérien :
nature et localisation*

Une déformation libérienne ?

La suite granitique libérienne : caractères généraux

La suite granitique libérienne : subtiles différences ...

Slab melting ? Sinon quoi ? ? ? Discussion !

Synthèse

Epilogue : la croûte archéenne d'Afrique de l'ouest, une croûte continentale standard ?

Références

(*) Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, présenté en décembre 2004, par D. Thiéblemont, géologue au BRGM.