

CARTOGRAPHIE PAR SIG DE L'ALÉA D'ÉBOULEMENT DANS LE BASSIN VERSANT DE DADES (HAUT ATLAS CENTRAL), MAROC.

Nadia El Aaggad, PhD

Ahmed Algouti, PES

Abdellah Algouti, PES

Adama Amaya, Docteur

Cadi Ayyad University, Faculty of Sciences Semlalia,
Department of Geology, Laboratory GEOBASSMA, Marrakech, Morocco

Abstract

Landslides constitute the natural events which threaten the goods and the persons. They include the whole natural or man-made movements more or less rough of soil or subsoil. The Dades watershed parameters, strong topographic slopes, lithology, geological structure and vegetation cover, make it an unstable and sensitive area of landslides. The magnitude of this phenomenon was most remarkable in the upstream part and plays a key role of basin evolution. In this work the landslide term include the rock slides of rock masses of various sizes which, mainly manifest in the carbonate and conglomerates formations respectively of Jurassic and Mio-Pliocene age, and seriously threaten the homes and the road network. In this work realizing of hazards map of Dades basin was based on field investigation, satellites data, and processing of digital elevation model using GIS softwares. This mapping allows an overall appreciation of basin susceptibility at ground instability. This work is a first backgrounder and sensibilization of the landslides risk in study area.

Keywords: Dades watershed, ground mass, GIS, mapping

Résumé

Les mouvements de terrains constituent un événement naturel qui peut présenter des menaces pour les biens et les personnes. Ils regroupent un ensemble de déplacements, plus ou moins brutaux, du sol ou du sous-sol, d'origine naturelle ou humaine. Les fortes pentes topographiques, la lithologie, la structure géologique des terrains et un couvert végétal précaire, font du bassin versant de Dades une zone instable et sensible aux

mouvements de terrain. Ces derniers présentent une ampleur remarquable surtout dans la partie amont du secteur et jouent un rôle prépondérant dans l'évolution du versant. Le terme mouvement de terrains regroupe dans ce travail les éboulements des masses rocheuses de différentes tailles, qui se manifestent essentiellement dans les formations carbonatées du Jurassique et dans les conglomérats du Mio-Pliocène et menace sérieusement les habitations et le réseau routier. La réalisation d'une carte d'aléa de mouvements de terrain affectant le bassin de Dades est basée sur des missions de terrain, des données satellitaires et sur le traitement des modèles numériques de terrain sous des logiciels du SIG. Cette cartographie permet une appréciation globale de la susceptibilité du bassin de Dades aux instabilités des terrains. Il s'agit d'un premier document d'information et de sensibilisation concernant les risques de mouvements de terrain de cette région.

Mots clés: Bassin versant de Dades, mouvements de terrain, SIG, cartographie

Introduction

De nombreuses régions marocaines sont confrontées à l'aléa mouvement de terrains susceptible de provoquer des catastrophes naturelles . On note cependant qu'en raison des conditions géologiques, morphologiques et climatiques ce phénomène présente une grande ampleur au Nord du Maroc (El Khattabi., 2001) plutôt qu'au sud, où sa fréquence et son intensité sont relativement moins élevées. il est principalement réputé dans les zones montagneuses, connues par leur instabilité de versant et de falaise, où il se manifeste souvent sous forme de phénomènes ponctuels présentant un danger potentiel pour la vie et le bien des personnes.

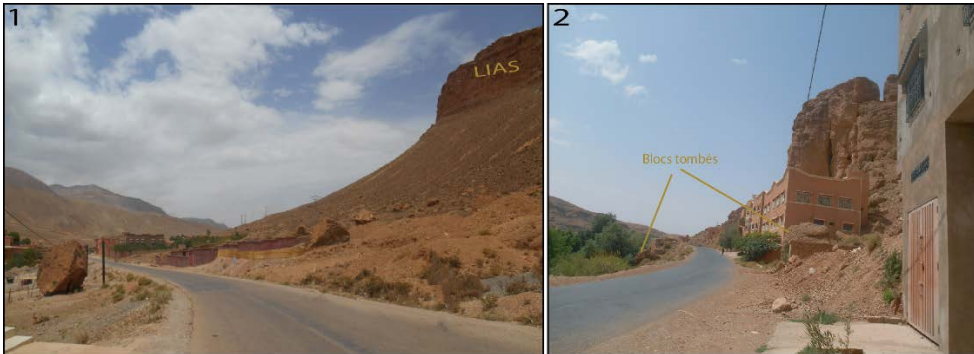
L'amont du bassin versant de Dades, situé sur le flanc sud du Haut Atlas central marocain et qui fait l'objet de cette étude, est fort pentu et très accidenté, ce qui donne à ses versants un caractère instable. On s'est intéressé alors aux mouvements de terrain qui découlent de cette instabilité, notamment, les éboulements des roches ou les écroulements de falaises.

L'objectif principal de ce travail est la cartographie de l'aléa éboulement des roches à l'échelle du bassin versant on se basant sur les observations de terrain et sur l'évaluation des facteurs influents sur cette instabilité.

Les éboulements rocheux

Le terme éboulement rocheux désigne le mouvement d'une masse rocheuse, dans lequel les blocs ne se déplacent pas seulement en glissant, mais peuvent aussi tomber en chute libre, rebondir ou rouler. Il en résulte

que les vitesses atteintes sont parfois trop rapides pour permettre l'évacuation de la population menacée (quelques mètres à quelques dizaines de mètres par seconde). Les éboulements se produisent généralement en bas des falaises ou des versants très raides (photolet 2). Ils font souvent suite à un mouvement plus lent, dont ils constituent le dernier stade d'évolution (glissement lent d'une masse rocheuse ou basculement progressif d'un pan de falaise, par exemple). Le terme éboulement, au sens large, couvre un large éventail de phénomènes, allant de simples chutes de pierres, très fréquentes sur les routes marocaines dans les zones des montagnes, jusqu'aux écroulements catastrophiques pouvant détruire un grand nombre d'habitations.



Photos 1: Eboulement près de M' Semrir. Photos 2: Basculement des formations rocheuses près d'Ait Ibrime.

Présentation de la région d'étude.

Situé sur le versant sud du Haut Atlas central (Fig1), le bassin versant de Dades occupe une superficie de 6796 km², entre les latitudes Nord 32°00' et 30°54' et les longitudes Ouest 5°23' et 6°44', au Nord-Est de la ville de Ouarzazat. Il est limité, Au Nord et à l'Ouest par le versant nord du Haut Atlas central et au Sud par les formations paléozoïques et précambriennes de l'Anti Atlas.

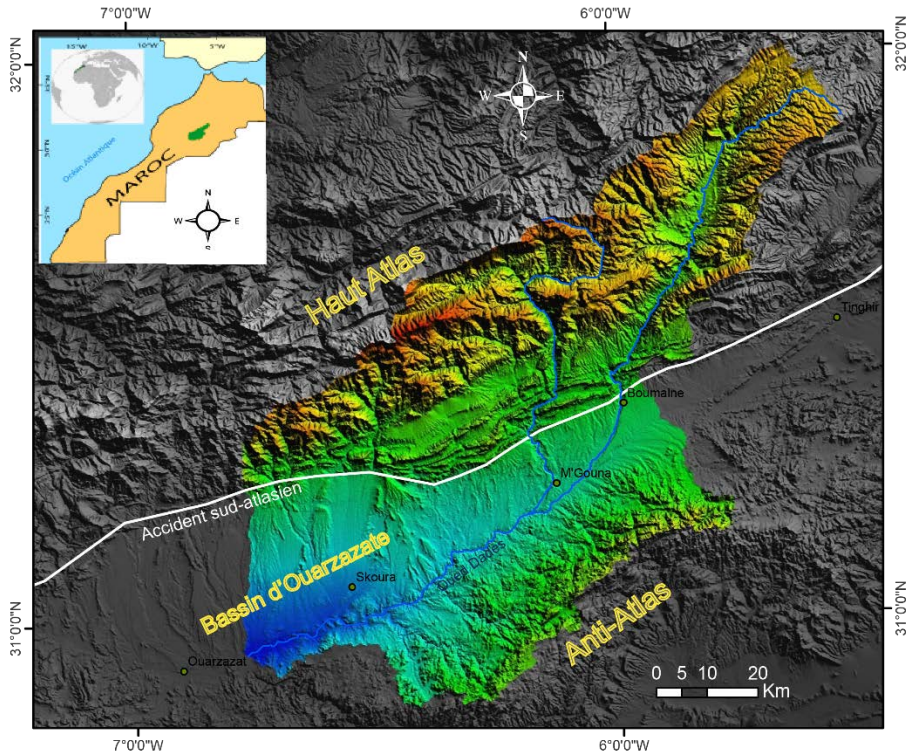


Figure 1 : Situation de la zone d'étude.

De point de vue géomorphologique, le bassin versant de Dades est subdivisé en trois grandes zones principales en se basant sur le relief global :

- le Haut Atlas qui constitue la partie septentrionale est caractérisé par des altitudes très élevés dépassant les 3500m, et des pentes fortes à très fortes ($> 30^\circ$) ;
- le bassin de Ouarzazate qui fait partie du sillon sud-atlasique, est séparé de la zone septentrionale par l'accident majeur sud atlasique. Il s'agit d'une cuvette relativement étroite allongée ENE-WSW caractérisée par des pentes faibles et des altitudes inférieures à 2000 m ;
- la zone méridionale représentée par l'Anti Atlas oriental, est dominée par des reliefs modérés et caractérisée par des pentes moyennes à faibles.

La géologie du bassin versant du Dades est composé de trois unités principales du nord au sud ; le Haut Atlas calcaire, le bassin de Ouarzazat et l'Anti Atlas (Fig2):

- Au Sud, l'Anti Atlas présente l'unité la plus ancienne du bassin de Dades. Elle est composée de séries sédimentaires et volcano-sédimentaires présentant des intrusions calco-alcalines. L'ensemble de cette zone a été affecté par un métamorphisme régional de faible intensité (Marini et Ouguir.1990,Gaber.1991, Fekkek.1992, Benkirane. 1987);

- Au Nord, les reliefs du Haut Atlas calcaire sont composés essentiellement par des formations jurassiques. Jossen & Filali Moutei (1988) ont décrit deux grandes unités lithostratigraphiques: le "Jurassique carbonaté" du Lias inférieur et moyen, pouvant atteindre 1500 m d'épaisseur, et le "Jurassique continental" détritique formé de grès, de marnes et de conglomérats ;

- le bassin de Ouarzazat montre une épaisse série de roches détritiques d'âge Oligocène et Mio-Pliocène. Au pied du Haut Atlas, l'épaisseur du Mio-Pliocène est évaluée à 1200 m (Görler et al. 1987), on y trouve des micro-conglomérats et des sables fins gypsifères avec des intercalations de calcaires lacustres, alors que les sédiments provenant de l'érosion du Jbel Saghro sont plus grossiers (Fig3).

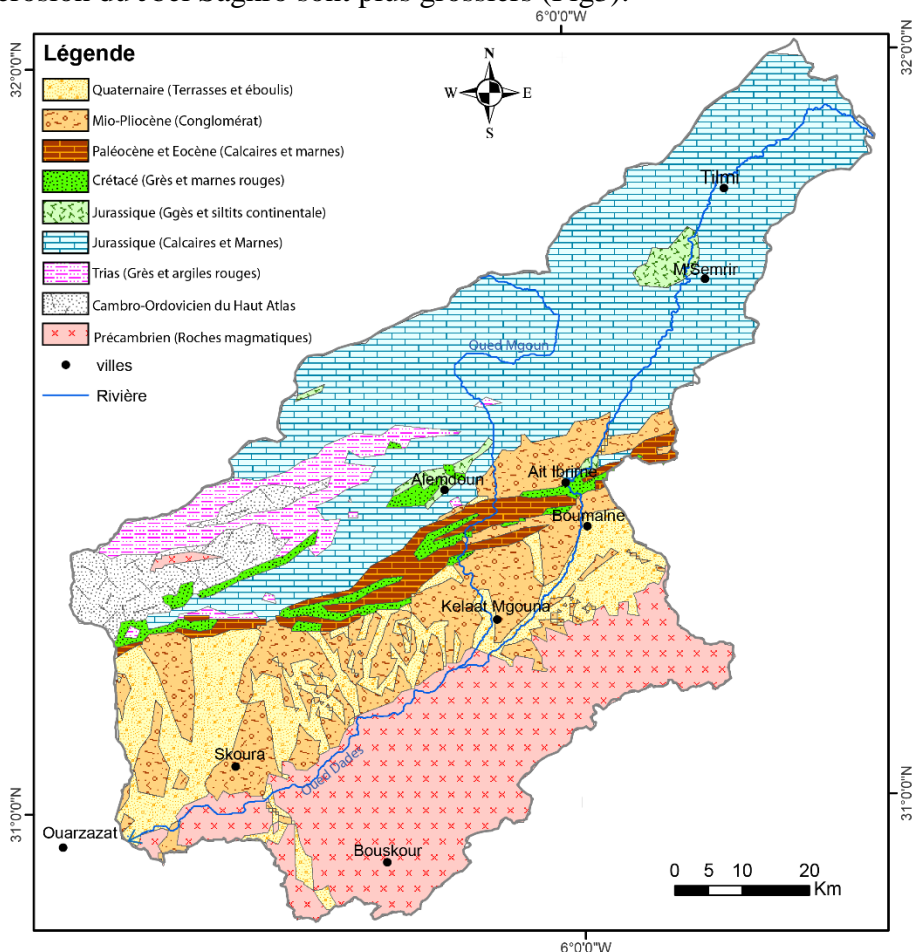


Figure 2 : Schéma structural simplifié du bassin versant de l'oued Dades.

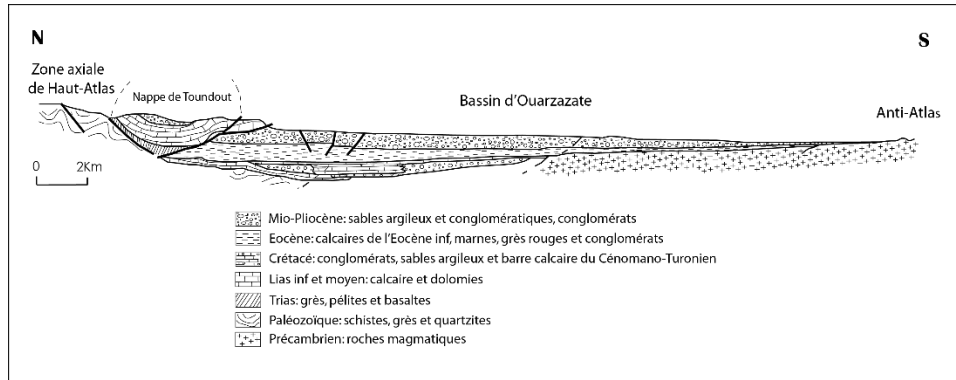


Figure 3 : Coupes géologiques transversales du centre du bassin d'Ouarzazate (d'après Jossen & Filali Moutei 1988).

Matériel

Plusieurs sources de données ont été exploitées afin de cartographier l'aléa de mouvement de terrain affectant le bassin de Dades :

- cartes topographiques 1/100 000: TINEGHIR, BOUMALNE et QALAA'T MGOUNA ;
- cartes géologiques : BOUMALNE 1/50 000, TINEGHIR 1/100 000, JBEL SAGHRO-DADES 1/200 000 et OUARZAZAT 1/500 000 ;
- Modèle Numérique de Terrain SRTM avec une résolution de 90m;
- une scène Landsat ; ID "LC82010382013182LGN00" Date d'acquisition : 2013-07-01.

Méthode utilisée pour l'évaluation de l'aléa éboulement des masses rocheuses

Le SIG est de plus en plus utilisé pour évaluer la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain (Soeters et van Westen, 1996 ; Guzzetti et al., 1999; Petley et al., 2002; Canuti et al., 2003; van Westen et al., 2006). Cet outil permet de combiner différents facteurs de prédisposition représentés par des cartes thématiques. Deux approches sont généralement utilisées; l'approche qualitative ou approche 'expert' (Leroi, 1996) et l'approche quantitative. La première est basée sur des missions de terrain: soit en cartographiant directement l'aléa ou en utilisant un logiciel SIG selon une approche géomorphologique, soit en quantifiant les facteurs qui contrôlent la stabilité des versants en attribuant à chaque facteur un indice selon son degré d'influence sur le mouvement étudié (Wachal et Hudack, 2000). Cette méthode privilégie l'avis de l'expert et sa connaissance des phénomènes et du terrain. La deuxième méthode est une approche statistique. Elle est fondée sur des règles de calcul statistiques, sur le concept d'unités homogènes et sur le nombre et la répartition des mouvements inventoriés par

unité de surface (Carrara et al., 1995 ; Soeters et van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdhury, 1999 ; Guzzetti et al., 1999).

Pour la cartographie prévisionnelle et préventive de l'aléa éboulement des masses rocheuses dans le bassin versant de Dades, nous avons opté pour une méthode qualitative simplifiée, vu l'envergure du bassin et l'accessibilité qui rendent difficile une cartographie détaillée sur le terrain. D'autre part, le manque d'un inventaire des mouvements de terrain exclut toute méthode statistique. Par ailleurs, la démarche adoptée est fondée sur la cartographie des trois facteurs considérés comme étant les plus influents sur la stabilité des versants ; la topographie, la lithologie et la fracturation. Ces facteurs ont été évalués et mis en forme dans des SIG à partir de bases de données spatiales existantes; de la digitalisation d'informations issues des cartes topographiques et géologiques et à partir du traitement des images satellitales (Fig4):

- La carte de pente a été réalisée à partir des cartes topographiques et du modèle numérique de terrain;
- La carte de lithologie est extraite de la digitalisation des cartes géologiques de Jbel Saghro-Dades 1/20000 et de Ouarzazate 1/500000, et est complétée par des levées de terrain ;
- La fracturation a été relevée en se basant sur les cartes géologiques, et sur le traitement d'images satellitales en utilisant les filtres directionnels du logiciel ENVI. Plusieurs centaines de linéaments ont été détectés, mais, seuls les linéaments supposés tectoniques dont les orientations sont validé sur les terrains, ont été retenus et interprétés.

Chacune de ces cartes représente une couche et chaque pixel est caractérisé par une valeur pour chaque facteur. La superposition de différentes couches sous ArcView donne la carte finale de la susceptibilité aux mouvements de terrain. Les pixels de la carte finale représentent les différents degrés de susceptibilité.

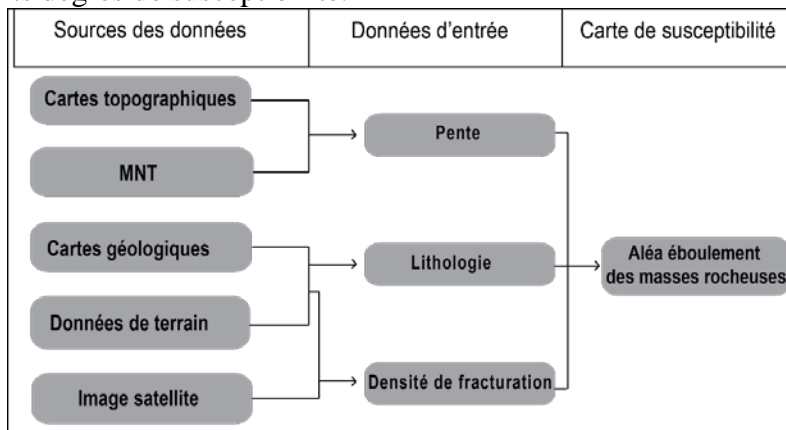


Figure 4 : Organigramme expliquant la méthodologie de travail.

Résultats et discussion

Facteurs de susceptibilité aux mouvements de terrain dans le bassin de Dades

Les formes et l'ampleur des mouvements de terrain sont très diverses en liaison avec les mécanismes d'initiation et d'évolution liés à la topographie (pente du versant et dénivelée), à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques des roches) et à la structure géologique (pendage et fracturation) (Maquaire, 2002). Dans le bassin de Dades, les paramètres considérés comme étant les plus influents sur la stabilité des versants sont :

- la pente : comme étant le paramètre le plus important. Les valeurs élevées des pentes (plus de 25°) font que ce facteur joue un rôle majeur dans la déstabilisation des versants. La carte des pentes générée (Fig5) montre que le bassin est fortement escarpé dans la zone septentrionale, alors qu'il présente des pentes modérée à faibles dans ses parties médianes et méridionales . Les valeurs de pentes ont été regroupées en neuf classes en se basant sur une bonne connaissance de terrain. Nous constatons alors que 30% de la surface du bassin présente des pentes fortes à très fortes (Tableau1).

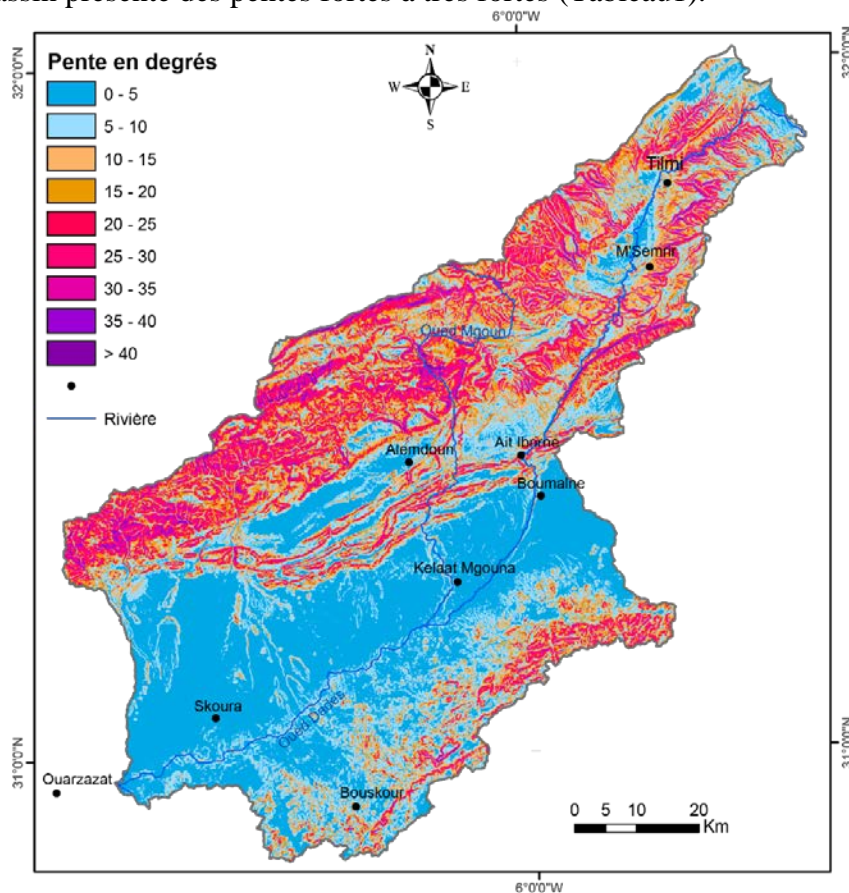


Figure 5 : Carte de pentes en degrés du bassin versant de l'oued Dades.

| Classes de pentes | Sensibilité aux mouvements | Pourcentage |
|-------------------|----------------------------|-------------|
| 0.1° – 5° | Très faible | 32 % |
| 5° – 10° | faible | 15 % |
| 10° – 15° | moyenne | 23 % |
| 15° – 20° | | |
| 20° – 25° | | |
| 25° – 30° | forte | 21 % |
| 30° – 35° | très forte | 9 % |
| 35° – 40° | | |
| > 40° | | |

Tableau 1 : Classification de la pente dans le bassin versant de Dades

- la lithologie : Les divers types de roches et leurs structures donnent une indication importante sur la susceptibilité aux mouvements de versant. D'après les données de terrain, les versants constitués de formations carbonatées jurassiques sont les plus instables. Les formations conglomératiques du Mio-Pliocène sont instables à proximité de la chaîne montagneuse du Haut Atlas, vraisemblablement à cause de leur épaisseur importante. La carte lithologique (Fig6) montre la répartition des neuf classes de faciès évoquées dans le Tableau2. F9(calcaires et dolomies massifs), F8 (calcaires avec intercalations marneuses) et F7 (conglomérats et couches grésio-argileuses), constituent les classes les plus sensibles au mouvement et occupent plus de 50% de la surface du bassin de Dades.

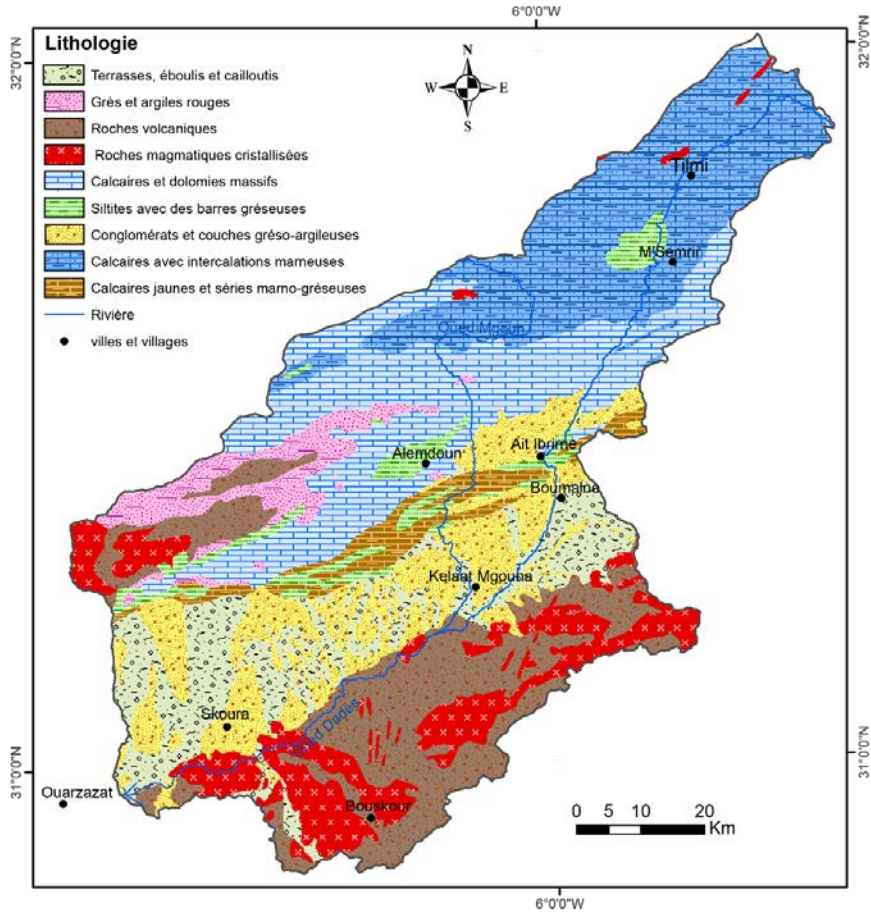


Figure 6 : Carte lithologique du bassin versant de l’oued Dades.

| Classes | lithologie | Sensibilité aux mouvements | Pourcentage |
|---------|--|----------------------------|-------------|
| F1 | Terrasses, éboulis et cailloutis | très faible | 11 % |
| F2 | Grès et argiles rouges | faible | 20 % |
| F3 | Roches volcaniques | | |
| F4 | Roches magmatiques cristallisées | moyenne | 18 % |
| F5 | Calcaires jaunes et séries marno-gréseuses | | |
| F6 | Siltites avec des barres gréseuses | | |
| F7 | Conglomérats et couches grés-argileuses | forte | 33 % |
| F8 | Calcaires avec intercalations marneuses | | |
| F9 | Calcaires et dolomies massifs | très forte | 18 % |

Tableau 2 : Classification de la lithologie des terrains constituant le bassin versant de Dades

- la fracturation : la stabilité des pentes de roches est essentiellement contrôlée par les fractures tectoniques (Selby, 1993), en particulier par leur densité et leurs orientations. Cela est d'autant plus valable que le Haut Atlas est actuellement dans un contexte de soulèvement tectonique et les failles représentent de surcroît un facteur important déstabilisateur des versants. Notre étude s'est donc focalisée sur la cartographie des différentes populations de failles structurant le bassin (Fig7). Les résultats obtenus sur une rosace de directions (Fig8) montrent Trois familles ; La plus importante caractérise les structures orientées N50° à N80° correspondant aux directions atlasiques notamment à l'accident majeur haut atlasique observé sur le terrain. La seconde direction caractérise les structures kilométriques orientées N130° à N150°, et la troisième famille est composée d'accidents orientés Nord-Sud, de très faible extension.

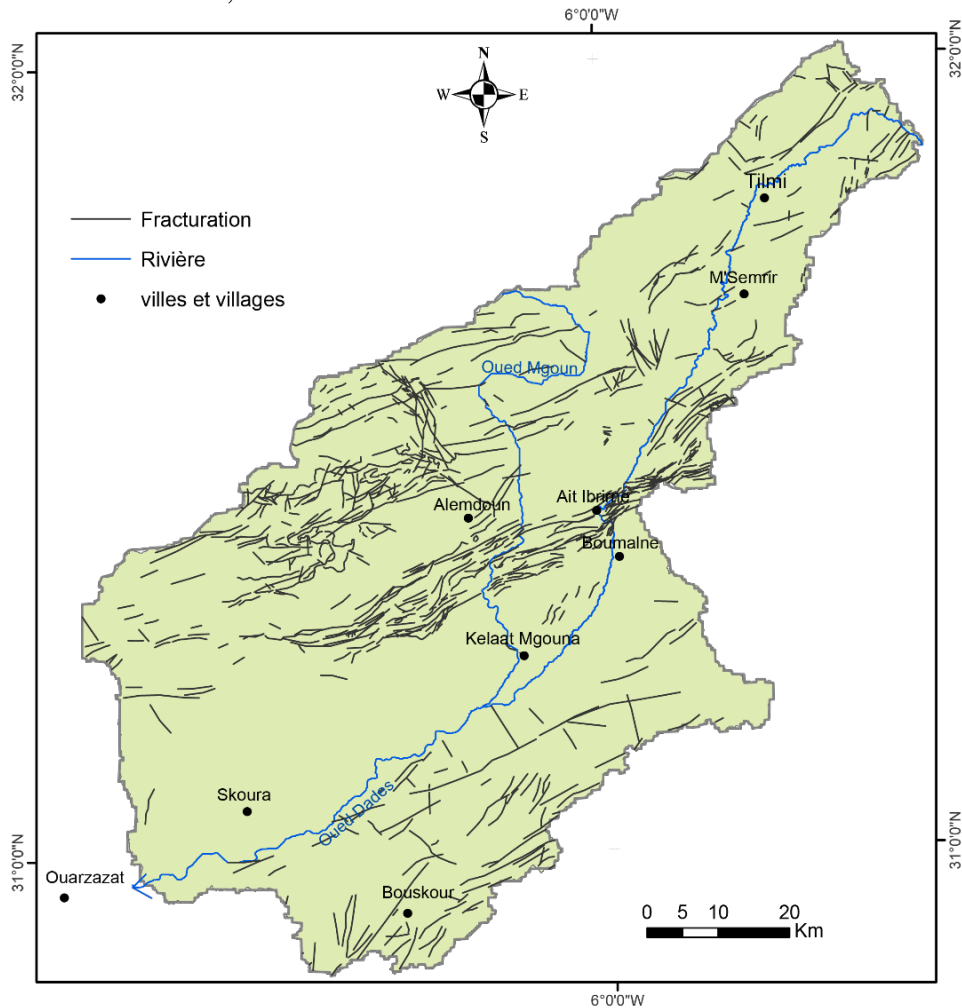


Figure 7 : Carte de fracturation du bassin versant de l'oued Dades.

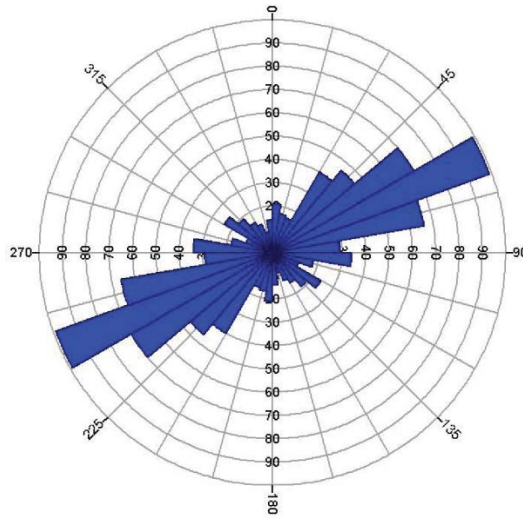


Figure 8 : Rosace de directions de la fracturation du bassin versant de l’oued Dades.

La carte de densité de fracturation (Fig 9) montre que plus de 40% du terrain présente une densité importante, alors que le reste est caractérisé par une densité plus faible (Tableau3).

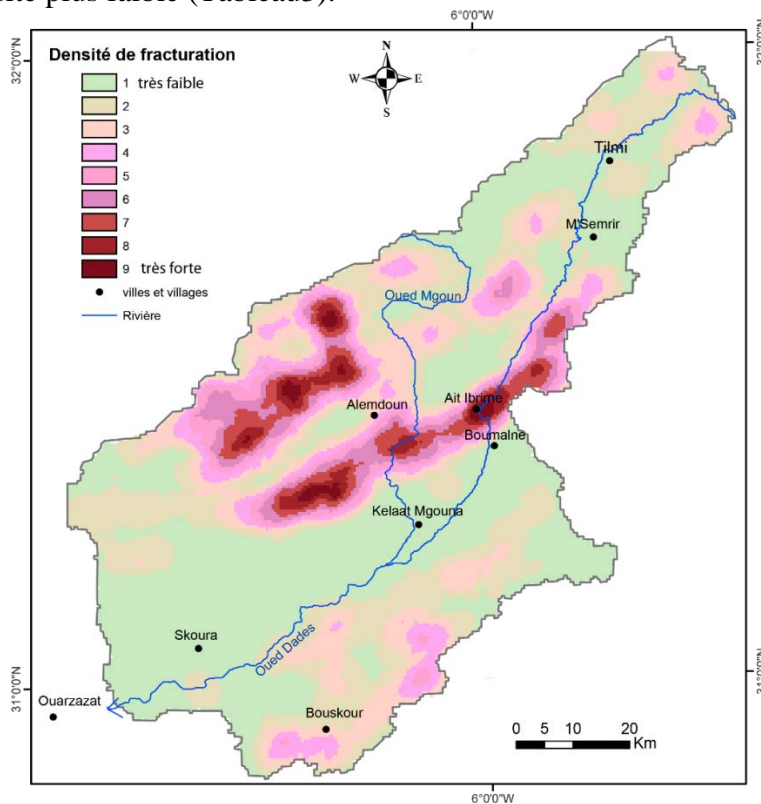


Figure 9 : Carte de densité de fracturation du bassin versant de l’oued Dades (densité croissante de 1 à 9).

| Classes de Densité de fracturation croissantes de 1 à 9 | Sensibilité aux mouvements | Pourcentage |
|---|----------------------------|-------------|
| 1 | très faible à nul | 38 % |
| 2 | faible | 22 % |
| 3 | moyenne | 20 % |
| 4 | | |
| 5 | forte | 14 % |
| 6 | | |
| 7 | très forte | 6 % |
| 8 | | |
| 9 | | |

Tableau 3 : Classification de la densité de fracturation dans le bassin versant de Dades

Carte d'aléa mouvements de terrain

La méthodologie adoptée dans cette étude a permis de réaliser une carte d'aléa mouvement de terrain en se basant sur trois facteurs ; la pente, la lithologie et la fracturation. En l'absence de travaux antérieurs, la validation a été faite par confrontation directe avec la réalité sur le terrain.

La carte de l'aléa mouvement de terrain (Fig10) montre que 25 % de la surface du bassin de Dades est soumise à un aléa fort à très fort (Tableau4). notamment, en zone montagnard. En revanche le reste du bassin connait un aléa moyen et faible. En général, on distingue deux zones:

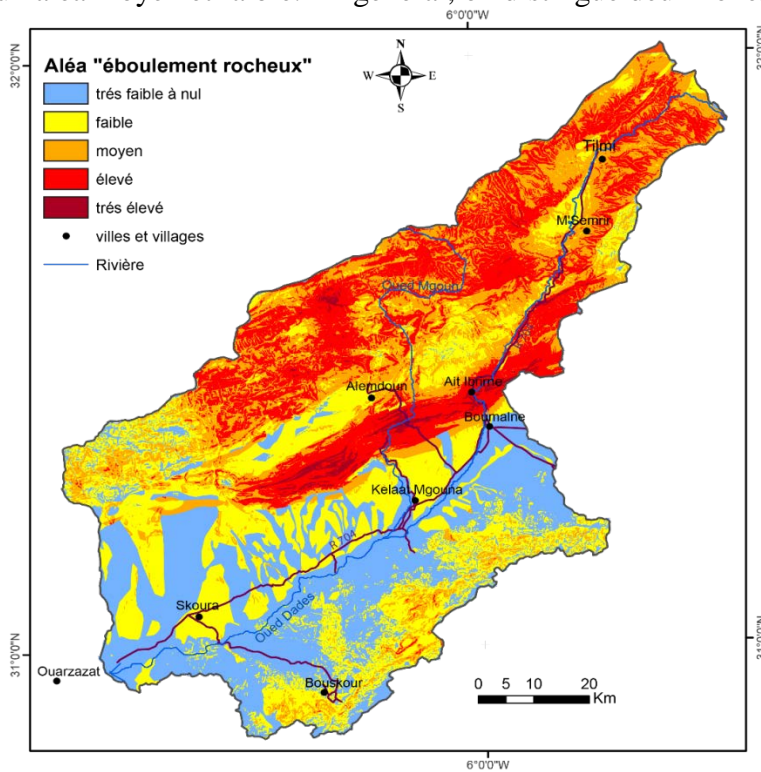


Figure 10 : Carte d'aléa éboulement des masses rocheuses.

- la zone du Haut Atlas calcaire: l'aléa fort à très fort dominant sur tous les versants les plus escarpés et devient moyen à faible au niveau des dépressions de M'Semrir, d'Alemdoune et celle qui se trouve au Nord-Ouest d'Ait Ibrirne. Cette susceptibilité élevée aux mouvements de terrain est favorisée par une pente forte et une lithologie calcaire très accidentée. Ces résultats sont confirmés par des observations sur le terrain ;

- la zone du bassin d'Ouarzazat et de l'Anti Atlas : l'aléa très faible domine surtout dans les zones des vallées élargies, alors que l'aléa moyen à faible est représenté par des petits reliefs.

| Classes de susceptibilité | Aléa | Pourcentage |
|---------------------------|-------------------|-------------|
| 1 à 2 | très faible à nul | 25 % |
| 2.1 à 4 | faible | 27 % |
| 4.1 à 6 | moyen | 23 % |
| 6.1 à 8 | élevé | 21 % |
| 8.1 à 9 | très élevé | 4 % |

Tableau4: La classification de l'aléa éboulement des roches

Conclusion

La cartographie de l'aléa éboulement des roches dans le bassin de Dades a été réalisée en suivant une démarche assez simple, basée sur les observations du phénomène sur le terrain et sur l'analyse des conditions géologiques et morphologiques du site en relation avec la pente, la lithologie et la fracturation. Nous considérons en effet ces trois paramètres comme étant les plus influents sur la stabilité des versants.

L'évaluation de l'aléa éboulement des masses rocheuses a permis d'identifier les zones susceptibles d'en être affectées., Les résultats montrent que les versants du Haut Atlas calcaire de la zone septentrionale présentent l'aléa le plus fort, alors que les bassins de Ouarzazate et l'Anti- Atlas constituent des zones plus stables.

References:

- Aleotti P., Chowdhury R. « Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives », Bulletin of Engineering Geology and the Environment, vol. 58, p. 21-44. 1999
- Benkirane Y. Les minéralisations à W (Sn, Mo, Au, Bi, Ag, Cu, Pb, Zn) du granite de Taourirt-Tamellalt dans leur cadre géologique. La boutonnière protérozoïque du S-E de Boumalne-n-Dades (Saghro oriental, Anti-Atlas, Maroc): Thèse d'université, Paris 6. 375p. 1987
- CanutiP., Casagli N., Farina P., Leva D., Tarchi D., Nico G: Some examples of slope movements monitored by ground-based SAR interferometry. In: Picarelli L. (Ed.) Proceedings IC-FSM2003 International Conference on Fast

Slope Movements: Prediction and Prevention for Risk Mitigation: 71–77. Sorrento (Italy), May, 2003, 11–13, 2003.

Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., Reichenbach P.: GIS technology in mapping landslide hazard, in Carrara A., Guzzetti F (eds.), Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards, p. 135-176, 1995.

El Khattabi J.: Démarche méthodologique pluridisciplinaire intégrant une approche transversale pour l'étude des instabilités de versants : application aux versants du Rif Central (Maroc). Thèse de Doctorat, Université d'Artois, 258 pages, 2001.

Fekkak A. : Le PII inférieur de la boutonnière de Sidi Flah (Saghro oriental, Anti-Atlas, Maroc) : relique d'un substratum océanique de l'arc du Saghro. 3ème cycle Thesis, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc, 184 pp, 1992.

Görler K., Helmdach F., Gaemers P., Heissig K., Hinsch W., Mèdler K., Schwarzhans W & Zucht M.: The uplift of the Central Atlas as deduced from Neogene continental sediments of the Ouarzazate province, Morocco. In: The Atlas System of Morocco (Jacobshagen, V., Ed.), Springer Verlag, Berlin, 361-404, 1988.

Graber W. J.: Geology of a late Proterozoic intra-arc basin, Kelâa M'Gouna inlier, Anti-Atlas, Maroc. Master Sci. Thesis, Duke university, U.S.A, 66 pp, 1991.

Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M. et Reichenbach P.: Landslide hazard evaluation : a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy, Geomorphology, v ol. 31, p. 181-216,1999.

Jossen J.A. & Filali Moutei J. : Bassin d'Ouarzazate, synthèse stratigraphique et structurale. Contribution à l'étude des aquifères profonds - Projet PNUD -DRPE (Direction de la Recherche et de la planification de l'Eau) MOR /86/004- Exploration des eaux profondes. Rapport Inédit, 38 p,1988.

Leroi E.: Landslide hazard-Risk maps at different scales: objectives, tools and development. In Sennes et, K., (Ed), Proceedings of the 7th International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, Balkema, Rotterdam, 35-52, 1996.

Maquaire O. : Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches. Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219 p. + 1 volume d'annexes, 2002.

Marini K. Ouguir H. : Un nouveau jalon dans l'histoire de la distension pré-panafricaine au Maroc: le Précambrien II des boutonnières du Jbel Saghro nord-oriental (Anti-Atlas). C.R. - Acad. Sci. Fr., 310, 2, 577-582, 1990.

Petley D.N., Bulmer M.H.K. et Murphy W. Patterns of movement in rotational and translational landslides. Geology, 30 (8), 719–722, 2002.

Selby M. J.: Hillslope materials and processes, second edition, Oxford University Press, Oxford, 451, 1993.

Soeters R., Van Westen C.J.: Slope instability, recognition, analysis, and zonation, in Turner A.K., Schuster R.L. (eds), Landslides investigation and mitigation, Transport Research Board, National Research Council, special report 247, p.129-177, 1996.

Van Westen C.J., van Asch T.W.J., Soeters R.: Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 65, 167–184, 2006.

Wachal D.J., and Hudak P.F.: Mapping landslide susceptibility in Travis Country, Texas, USA. GeoJournal, vol. 51, p. 245-253, 2000.