Extraction of the predisposition parameters for mapping the susceptibility of slides lands, in the region of EL Quola, province of Larache (Nothern Rif)

Ikram El hamdouni¹, Lahcen Aitbrahim¹

¹ Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat, Département des Sciences de la Terre, Laboratoire GEORISK : Risques Géologiques, Télédétection et Environnement. Avenue Ibn Battouta Rabat – Agdal, Boîte Postale 1014, Rabat, Maroc.
ik.elhamdouni@gmail.com; laitbrahim@gmail.com

Abstract. Slide lands (Lands mass movements) are among the natural risks that Morocco faces in the Rifaines regions in particular. They generally constitute small-scale, punctual phenomena. But their diversity and frequency are nevertheless responsible for significant and costly damages and injuries. To deal with this problem, the study of field instabilities must take into account that: i- the ground movements must be taken in a context of the overall dynamics of the watershed, ii- the choice of more objective methods, which is not based on the very subjective opinion of the expert; iii- the choice of an adapted approach to the scale of work. In this article, we used the evidence theory "WofE" to evaluate the sensibility of landslide in the El Quola area. This method is based on the analysis of the relationships between landslides that occurred in the past (the so-called modelable variable V_m) and the spatial distribution of some predictive parameters of instability (V_p). The result obtained is a landslide susceptibility map that is the result of multi-disciplinary and multi-temporal data. This method has been described as one of the most performing by several authors; however, it requires a conditional independence between the different predictive factors. The quality of the performances was evaluated with success curves.

Introduction :

Les glissements de terrain peuvent représenter un enjeu majeur lorsqu'ils interfèrent avec les activités humaines et les biens exposés à ce type de danger. Plusieurs Approches d'analyse spatiale intégrées dans un SIG ont été utilisées pour une meilleure évaluation de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. Les approches probabilistes sont souvent considérées comme les plus performantes par les scientifiques [1]. Ces approches permettent d'obtenir rapidement des cartes issues de la relation statistique entre un certain nombre d'événements spatialisés (Instabilités de Terrain) et un jeu de facteurs de prédisposition. La théorie de l'évidence est l'une des approches les plus adéquates pour une analyse à méso-échelles. Cependant, l'inconvénient de cette approche est le problème de redondance de l'information entre les différentes variables prédictives. Pour répondre à ce problème, il fallait tester et analyser l'indépendance conditionnelle entre les paramètres prédictifs.

L'objectif principal de cet article est de réaliser une carte de susceptibilité au glissement de terrain, la plus

proche de la réalité, dans une région très accidentée. Du coup, sept facteurs influençant l'occurrence des instabilités de terrain ont été apportés en tant que couches données de trame dans ArcGIS, et qui ont été utilisés lors de l'analyse de susceptibilité.

1 Cadre géomorphologique et structural :

Située dans le Rif septentrional, entre les latitudes 35°00'_35°45'N et les longitudes 5°30'_5°15'W, la zone d'étude s'étale sur une surface de 560Km². La commune d'El Quola appartient administrativement à la province de Larache. L'hypsométrie de la région d'El Quola est caractérisée par des reliefs très accidentés et des pentes très abruptes, avec des vallées fortement encaissées et des dénivellations remarquablement fortes [2 ; 3]. Une telle morphologie est le résultat de la conjugaison de plusieurs facteurs: la lithologie complexe, le système climatique, le régime tectonique actif et la dynamique érosive, donnant naissance à plusieurs mouvements de terrain. (Fig1)

Fig. 1. Situation de la zone d'étude.

La zone d'étude appartient à la bordure SW de la chaîne du Rif. Les terrains géologiques drainés sont représentés par des lithologies essentiellement marno-calcaire et marno-quartzitiques appartenant à l'unité de Tanger d'âges Eocène. La structuration de la région s'intègre dans l'évolution tectonique alpine essentiellement méso-cénozoïque [4 ; 5]. Sur ce complexe géologique repose la nappe numidienne caractérisée notamment par une tectonique cassante mio-plio-quaternaires (fig2).

Fig. 2. Cadre géologique de la zone d'étude.

L'ensemble des unités géologique sont séparées par de grands accidents chevauchants orientés NW-SE et à vergence NE, dont l'accident Ejbha qui touche la partie SE de la région [2]. La partie Nord-Est de la région est caractérisée par des reliefs sous forme de crêtes et collines souvent gréseuses, qui appartiennent essentiellement à la nappe numidienne à savoir Jbel Soukna (1603m), Jbel Smia (853m), et Jbel El Kobia (801m).

L'abondance des précipitations associées à la lithologie et l'imperméabilité de la majorité des terrains ainsi qu'aux reliefs accidentés de la région favorisent l'apparition de plusieurs types d'instabilités.

2 Méthodologie et Outils :

La théorie de l'évidence « Weight of Evidence » est une approche quantitative, basée sur le théorème général de Bayes ; elle est fondée sur des règles de calcul statistiques et sur le concept d'unités homogènes [6, 7, 8]. Le principe consiste à définir des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (variable prédictive, V_p) et l'occurrence spatiale de glissements de terrain (variable dépendante, V_d) afin

d'évaluer quantitativement la probabilité de rupture pour des régions non affectées par des glissements de terrain. De ce fait, la méthode suppose que :

- Les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé ;
- L'ensemble des facteurs de prédisposition sont connus à priori et introduits dans l'analyse ;
- L'ensemble des glissements de terrain qui ont survenu dans le passé sont inventoriés sur l'aire d'étude.

La démarche suivie lors de cette modélisation est résumée sur l'organigramme suivant : (fig.3)

La théorie de l'évidence permet de calculer la probabilité à priori et la probabilité à posteriori. Pour cela, tous les facteurs prédictifs seront pondérés, en calculant un poids positif (W^+) (1) et un poids négatif (W^-) (1) qui relient les variables prédictives à la variable à modéliser (les mouvements de terrain), ceci selon la formule mathématique suivante [6 ; 7].

$$(1) W^+ = \ln \frac{P(VP/VM)}{P(VP)} \quad (2) W^- = \ln \frac{P(VP/VM)}{P(VP)}$$

VM : Les mouvements de terrain (la variable à modéliser).

VP : Les variables prédictives.

P : la probabilité.

Fig. 3. La démarche de la modélisation.

Grâce aux performances des systèmes d'information géographique (SIG), nous avons pu réaliser une carte de susceptibilité des versants aux glissements de terrain dans la région d'El Quola, la plus objectif possible ; c'est ainsi que nous avons procédé sur deux étapes, **i.** La première étape consiste à la collecte et la mise en forme des données, puis la définition de la meilleure combinaison de variables prédictives, **ii.** La deuxième étape consiste à

l'application des modèles de calcul sur ArcSDM, et la validation statistique et experte.

3 Résultats et discussions

4.1 Collecte et mise en forme des données :

Les données indispensables pour effectuer la carte de susceptibilité sont regroupées en cinq catégories [6, 7] (Tableau.1): un inventaire géomorphologique des glissements de terrain, la topographie (gradient de pente, l'hypsométrie, exposition), la lithologie, la densité de fracturation, l'occupation du sol et l'hydrographie.

Tableau.1. Variables prédictives retenues pour élaborer les cartes de susceptibilité.

Variable à modéliser	Catégorie de variables		Sources
	Géomorphologie	-Glissement de terrain	Photo-aériennes, observations sur le terrain, cartes topographiques, cartes géomorphologiques
Variables prédictives	Topographie	-Gradient de pente -Exposition -Hypsométrie	MNT issu d'une digitalisation de courbes de niveaux de cartes topographiques au 1/25 000e
	Géologie	-Lithologie -Fracturation	Carte géologique, observations, images L'ansât TM, rapports techniques
	Occupation du sol	-Occupation du sol	Images satellites, littératures antérieures, observations
	Hydrologie	-Réseau hydrographique	MNT, cartes topographiques

4.2 Inventaire des mouvements de versant :

L'inventaire des mouvements de versant a été conduit via l'utilisation des données spatiales satellitaires et aéroportées, des cartes géomorphologiques et géologiques et en se basant sur des données existantes [2 ; 3] ; le tout vérifié sur le terrain (fig4). Les instabilités cartographiées ont été classées en fonction de l'épaisseur et de la nature lithologique des matériaux mis en mouvement et aussi de l'ampleur du mouvement. Quatre catégories, suivant les traits morphologiques les plus dominants, sont distinguées [2;11]. Le tableau.2 présente le pourcentage des quatre types de mouvements de terrain cartographiés au niveau de la région d'El Quola.

Tableau.2. Les types d'instabilités en pourcentage.

Types	Nombre	% en Nombre	Superficie en Km ²	% en Superficie
<i>C.Boueuse</i>	32	34.37%	24.1	36.12%
<i>Ecroulement</i>	5	5.22%	0.52	0.77%
<i>Glissement</i>	17	17.71%	3.24	4.86%
<i>Glissement complexe</i>	41	42.71%	38.87	58.25%

4.3 Caractérisation et détermination des facteurs de prédictions :

Les facteurs de prédisposition sont dérivés à partir : des bases de données existantes, de la digitalisation des cartes, des informations obtenues du traitement d'images satellitaires ou par photo-interprétation, d'interprétation de cartes topographiques et géologiques et d'observations de terrain. Après la numérisation de toutes les données nous avons reclassifié tous les paramètres en cinq grandes classes. La reclassification effectuée a été adoptée grâce aux outils de ArcGIS ; Ceci après plusieurs tests de corrélations entre la distribution spatiale des phénomènes à modéliser (instabilité de terrain) et les différentes classes choisies.

4.3.1 Les facteurs liés à la topographie :

Les paramètres topographiques sont dérivés d'un modèle numérique de terrain issu de la digitalisation des courbes de niveau à partir de la carte topographique au 1/25 000e. Trois paramètres géométriques sont utilisés dans notre modèle : le gradient de pente, l'exposition et l'hypsométrie (fig.5).

4.3.2 Les facteurs géologiques :

Les variables prédictives relatives à la géologie sont la lithologie et la fracturation.

Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été reconnues sur l'image satellitaire grâce à des traitements spectraux, en se référant à la carte géologique à l'échelle de 1/500 000ème de la chaîne Rifaine [12]. Ces interprétations ont été complétées par des observations sur le terrain ; c'est ainsi qu'une carte de facies a été élaborée. Nous avons procédé ensuite à une requalification postérieure des formations géologiques selon leurs affinités lithologiques et mécaniques à l'aide du module « reclassification » (fig.6), [7 ; 11].

La fracturation est un facteur prédictif, étant donné que l'activité tectonique héritée et récente peut intervenir sur un mouvement de terrain dans des zones déjà fragilisées [10]. Tout de même, le réseau de fractures favorise l'infiltration de l'eau, entraînant ainsi une augmentation de la pression interstitielle et une réduction de la résistance au cisaillement des sols. De ce fait, une carte de fracturation du secteur d'étude a été réalisée en se basant sur la numérisation de toutes les failles bibliographiques [5 ; 10] ; l'extraction de la fracturation récente qui a affecté la région basée sur l'analyse morpho-structurale de la carte hypsométrique couplée à celles des anomalies du réseau hydrographique ; l'obtention des principaux accidents d'origine tectonique à partir de l'imagerie satellitaire Landsat7 ETM+, grâce aux rehaussements spatiaux sur ERDAS imagine 11.

L'analyse morpho-structural a permis de déceler trois grandes familles qui, selon leur ordre d'importance, sont de directions : NW-SE à N-S et ENE-WSW à E-W. Ce paramètre a été intégré dans le modèle en tenant compte de la distance par rapport aux failles [1 ; 13]. De ce fait, nous avons réalisé la carte de densité des failles, en utilisant la fonction « Kernel Density » sur ArcGis10. Cette carte a été élaborée selon 5 classes de densité par ré-échantillonnage (fig.7).

4.3.3 Le facteur occupation du sol :

L'occupation des sols joue un rôle primordial dans l'étude de l'aléa glissement de terrain, à travers le caractère stabilisant de la couverture végétale. Lors de son absence ou sa rareté sur les versants, l'effet érosif par ruissellement peut être accéléré. Pour réaliser la carte d'occupation des sols, nous avons eu recours à la conception d'une base de données multi-source. Ces informations ont subi une actualisation par interprétation des données satellitaires et par des données collectées sur le terrain. Les différentes classes sont reconnues par classification multi-spectrale des données Landsat7 ETM+. Afin de simplifier la lecture, plusieurs fusionnements et ajustements ont été effectués. De ce fait, cinq classes sont retenues : les essences forestières, les matorrals, les reboisements, les terrains agricoles et les terres arables. (fig.8)

4.3.4 Le facteur hydrologie :

Certains mécanismes de glissements de terrain correspondent à l'action érosive (sapement de berges) des cours d'eau [9]. Le ruissellement superficiel génère des zones d'intense ravinement (badlands) dans le cas de formations géologiques tendres. Il en résulte le déclenchement d'un nouveau mouvement de terrain ou la réactivation d'un ancien mouvement stabilisé. Le réseau hydrographique sera incorporé dans notre étude via sa densité ; suivie d'une analyse statistique de la répartition des glissements de terrain proches des principaux cours d'eau, ce qui a permis de reconstruire des zones tampons hydrographiques, et après une reclassification, cinq classes ont été retenues. (fig.9)

4.4 Calcul du poids des facteurs :

La fonction Arc-SDM permet de calculer, pour chaque classe de variables, les poids positifs (W^+) et négatifs (W^-), ainsi que leurs contrastes ($C = W^+ - W^-$), qui seront intégrées dans notre modèle. Ce calcul assure l'identification des variables ou des classes de variables qui sont positivement corrélées ($W^+ > 0$ et $W^- < 0$) ou négativement corrélées ($W^+ < 0$ et $W^- > 0$) et les variables non corrélées ($W^+ = W^- = 0$) aux glissements de terrain. Ces poids positifs et négatifs sont calculés selon les ratios logarithmiques, fondés sur les théorèmes binaires et résultent du rapport des probabilités conditionnelles suivantes : [6, 7]: (Tableau.3)

Nous avons analysé les poids W^+ , W^- et le contraste attribués à chacune des classes des variables prédictives; ce qui a permis d'évaluer et d'interpréter le rôle respectif de chaque facteurs de prédisposition dans l'occurrence spatiale des glissements de terrain. Nous avons remarqué que l'occupation du sol et l'hypsométrie et le réseau hydrique jouent un rôle majeur dans la susceptibilité aux instabilités de terrain. Alors que la lithologie et l'exposition des versants sont relativement moins influentes. Les variables densité des failles et la pente occupent une place intermédiaire avec une valeur absolue du contraste de 1.05 et 1.08 respectivement. En effet, la valeur absolue du contraste de poids maximum entre les cinq classes de la variable lithologie est de seulement 0.9 ; alors qu'il est de 1.96 pour le réseau hydrographique, de 1.22 pour l'occupation du sol et 1.82 pour l'hypsométrie. Nous avons remarqué aussi que pour

la lithologie, les marnes et les argiles sont caractérisées par une haute susceptibilité.

Tableau.3 : Résultats du calcul des poids des facteurs

Facteur	Classes	W+	W-	Contraste
Exposition	Nord	-0.02	0.0093	-0.0375
	Est	-0.59	0.0378	-0.2537
	Sud	0.1491	-0.039	0.1879
	Sud-Ouest	0.2632	-0.081	0.344
	Nord-Ouest	-0.67	0.0636	-0.4002
Facies	Grés	0	0	0
	marnes gréseux	0.762	-0.177	0.9394
	limon à galets	0.284	-0.011	0.2954
	Marnes	0.1852	-0.016	0.2015
	Argiles	0.278	-0.311	0.5885
Fracturation	0_0,14	-0,76	0.0801	-1.0568
	0,14_0,28	0.4398	-0.213	0.6527
	0,28_0,42 5	0.3869	-0.194	0.5807
	0,425_0,5 6	-0.39	0.0881	-0.465
	0,567_0,7 1	0	0	0
Hypsométrie (m)	0_185	-1.76	0.1166	-1.8816
	185_415	-0.74	0.0828	-0.8303
	415_655	0.492	-0.494	0.9866
	655_1062	-0.70	0.0767	-0.7866
	1062_1620	0.040	-0.011	0.052
Occupation du sol	Forêt	-0.55	0.3602	-0.9167
	Reboisements	0.7427	-0.077	0.8203
	Matorrals	1.0321	-0.189	1.2213
	T-Agricoles	-0.41	0.0661	-0.4793
	Terres arables	0.2245	-0.056	0.2804
Pente	0_5%	-0.78	0.0884	-0.87
	5%_15%	-1.04	0.0427	-1.0855
	15%_25%	0.3379	-0.099	0.4371
	25%_35%	-0.99	0.1811	-1.1735
	>35%	0.4303	-0.362	0.793
Réseau Hydrographique	0_1,42	-1.72	0.2408	-1.9636
	1,42_2,85	-0.23	0.0776	-0.3099
	2,85_4,27	0.1171	-0.049	0.1659
	4,27_5,70	0.8775	-0.304	1.1811
	5,70_7,21	0.1842	-0.008	0.1919

4.5 La carte de susceptibilité ;

Les poids relatifs à chaque facteur ont été combinés ensemble afin de calculer la probabilité à posteriori, ce qui permet d’établir la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain. Cette carte permet de distinguer cinq classes de susceptibilité (fig.10). La carte de susceptibilité des instabilités de terrain, obtenue par analyse bi variée et en appliquant la théorie de l’évidence, a été reclassée en cinq entités selon le degré de susceptibilité. L’analyse experte montre que plus de 70% des instabilités recensées coïncide avec les classes moyenne et forte à très forte susceptibilité.

Fig.10. Carte de susceptibilité des instabilités

4 Validation des résultats

4.1 L’indépendance conditionnelle

L’évaluation de l’indépendance conditionnelle a été effectuée en utilisant la fonction « Area Frequency Table » sur l’outil « Spatial Data Modeller Tools ».

Pour le calcul de probabilité et la validation statistique, les 50% de la population totale des glissements de terrain ont été introduits dans le modèle à partir d’un tirage aléatoire. Puis, chaque variable prédictive est ajoutée une à une pour observer son influence sur les simulations [9]. Plusieurs tests indiquent que les meilleures simulations sont obtenues en combinant de manière hiérarchique le gradient de pente, le facies, l’occupation du sol, la densité du réseau hydrographique, la densité de fracturation, l’hypsométrie et l’exposition des versants. Pour la validation experte, les résultats des modèles en termes de surfaces susceptibles aux glissements de terrain modélisés sont comparés à l’inventaire géomorphologique. Les tests de IC utilisés permettent de calculer trois valeurs, celles-ci permettent d’éviter toute surestimation ou sous-estimation de la probabilité [6 ;14]. (Tableau.4)

Tableau.4. Les tests d’indépendance conditionnelle

	Valeurs calculées	L’intervalle acceptable
Overall CI simulations (CI)	93.6%	50%<CI≤100%
Conditional Independence Ratio(CIR)	1.01	1≤CIR<2 Valeur acceptable >0,85
Agterberg and Cheng Conditional Independence Test(CIT)	46.8%	CIT<50%

La comparaison des résultats montre que les trois valeurs calculées correspondent parfaitement aux valeurs acceptables théoriquement ; ce qui exclut l’existence d’une dépendance entre les différents facteurs suggérés prédictifs.

4.2 La validation statistique

Pour la validation statistique, nous avons utilisé la fonction « Area Frequency Table » sur l'outil « Spatial Data Modeller Tools » d'ArcGis10, tout en introduisant d'abord les 50% de la population totale, des glissements de terrain qui ont été utilisés dans le modèle. Du coup, nous avons élaboré la courbe du taux de succès (SRC) : Il s'agit d'une représentation graphique définissant la relation existante entre le pourcentage cumulé des surfaces susceptibles et la probabilité à postériori [7]. Le modèle a montré une efficacité d'environ 70%. Dans un deuxième temps, nous avons introduit les 50% de la population totale, des glissements de terrain restants, non utilisés dans le modèle, ce qui a permis de créer la courbe de prévision (PRC); ce test de prévision a montré une efficacité de 68%. (fig11)

Fig.11. Les courbes de la validation statistique

Conclusion :

L'application de la théorie WoFe a été franchie en utilisant l'outil SDM sur ArcGIS. La plus grande partie de ce projet était consacrée à l'identification des données appropriées, l'amélioration de la qualité des données et à la performance de la prédiction du modèle ; ce qui a permis de préparer une base de données pertinente et adéquate. Ceci était dans le but de diminuer toute subjectivité, lors de la réalisation de carte de susceptibilité. Les résultats indiquent qu'une combinaison de sept variables prédictives (gradient de pente, hypsométrie, facies, occupation du sol, densité de fracturation, densité de réseau hydrographique et exposition) a permis de prédire, pour la meilleure simulation, la localisation spatiale (en termes de susceptibilité) d'environ 70% des aires observées de glissements de terrain, pour l'analyse par la théorie de l'évidence. Le test de prévision montre une efficacité d'environ 68%. Les résultats obtenus sont plus ou moins proches, ce qui nous permet d'affirmer que l'analyse bi variée par théorie de l'évidence semble être une approche toujours adaptable à moyenne échelle considérée (1/50000e).

Références bibliographiques:

1. R. Fell, S. Lacasse, E. Leroi, *A framework for landslide risk assessment and management*. In: Hungr, *Landslide Risk Management*, 3–26 (2005).
2. A. El Gharbaoui, *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, **15**, 439 (1981).

3. G. Maurer, *Les montagnes du Rif Central, étude géomorphologique, travaux de l'Institut Scientifique Chérifien*. Série Géologie et Géographie Physique, **14** (1968).
4. M. Durand Delga, P. Rossi, P. Olivier, D. Puglisi, *Situation structurale et nature ophiolitique de roches basiques jurassiques associées aux flyschs mahgrébins du Rif (Maroc) et de Sicile (Italie)*, **331**, 29-38 (2000).
5. L. Ait Brahim, *Tectonique cassante et état de contraintes récent du Maroc Nord. Résultat de la cinématique des plaques Afrique-Europe et du bloc d'Alboran*, **233** (1991).
6. G.F. Bonham-Carter, F.P. Agterberg, D.F. Wright, *Statistical Applications in the Earth Science: Geological Survey of Canada Paper, Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential*, **89-9**, 171–183 (1989).
7. C.J. Van Westen, *GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia*, Mountain Environments and Geographic Information Systems (1994).
8. P. Aleotti, R. Chowdhury, *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*, *Bull Engineering Geology and Environment* **58**, 21–44 (1999).
9. Y. Thiery, J-P. Malet, S. Sterlacchini, A. Puissant, O. Maquaire, *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment*, *Geomorphology* (2007).
10. L. Ait Brahim, M. Mansour, F. Sossey Alaoui, I. EL Hamdouni, *Rôle de la fracturation dans la désagrégation mécanique des calcaires et la mise en mouvement de la coulée de pierres d'Amtrasse (Rif, Maroc)*, Edition ISBN 9954-8407-0-2 "L'implication de la géotechnique dans le développement des infrastructures en Afrique", 69-79 (2003).
11. D.J. Varnes, *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*, IAGC Commission on Landslides, UNESCO, Paris (1984).
12. G. Suter, *Carte géologique/structurale de la chaîne rifaine, échelle 1:500,000.- Serv. Carte géol. Maroc 245a/b* (1980).
13. S. Lee, B. Pradhan, *Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*, *Landslides* **4**, 33–41 (2007).
14. F. P. Agterberg, Q. Cheng, *Conditional independence test for weights of evidence modelling*, *Natural Resources Research*, **11**, 249–255 (2002).