

ORIGINAL ARTICLE



EVALUATION DU RISQUE "GLISSEMENT DE TERRAIN" PAR ANALYSE PROBABILISTE : APPLICATION AU RIF ORIENTAL DU MAROC

RISK ASSESSMENT "SLIDING OF FIELD" BY PROBABILISTIC ANALYSIS: APPLICATION TO THE RIF ORIENTAL OF MOROCCO

| Mohamed Rfifi ^{1*} | et | Lahsen Ait Brahim ¹ |

¹. Université Mohammed V | Faculté des Sciences | Département Sciences de la Terre | Unité de recherche GEORISK: Risques Géologiques, Télédétection et développement durable | Rabat | Maroc |

|Received | 03 October 2017|

|Accepted | 17 October 2017|

|Published 21 October 2017|

RESUME

Contexte : Situé au nord du Maroc, la région d'Al Hoceima au Rif oriental est sans doute la région la plus touchée par divers risques naturels. Ces phénomènes constituent l'un des principaux enjeux d'aménagement et une menace majeure et permanente pour la population et les installations existantes. Les glissements de terrain sont très répandus, en raison de la combinaison des paramètres de prédisposition au risque (formations géologiques tendres, pentes fortes, réseau hydrographiques et cadre sismique).

Objectifs : L'objet du présent travail est de mettre en évidence les relations qui existent entre les paramètres de susceptibilité (conditions géologiques, topographie locale, réseau hydrographique d'écoulement, occupation du sol ...) et les enjeux existants à l'échelle de la zone d'étude menacées par le glissement de terrain. Les relations entre la susceptibilité et les enjeux sont formulées par la cartographie du risque global de glissement de terrain. **Méthode :** La méthodologie employée s'articule sur trois étapes. Dans un premier temps, la susceptibilité au risque (S) est cartographiée par l'identification des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (Variables indépendantes) et l'occurrence spatiale des glissements (variable dépendante), tout en appliquant l'approche indirecte « bi-variée ». Dans un deuxième temps, l'identification et l'estimation des conséquences potentielles (C) sur les enjeux existants. Enfin, le risque « glissement de terrain » (R) est évalué en combinant la carte de susceptibilité et la carte de conséquences potentielles suivant une matrice à double entrée. **Résultats :** La carte de susceptibilité distingue entre 4 niveaux de susceptibilité et elle a été retrouvée par la combinaison de cinq paramètres indépendants, par ordre d'importance. La carte de dommages identifie 5 niveaux d'endommagement potentiel. Le croisement des cartes de susceptibilité et de dommages a permis de définir quatre intensités de risque à une résolution spatiale de 2m au sol. **Conclusions :** L'étude a permis de déterminer la bonne combinaison entre les paramètres de prédisposition de l'étude. La cartographie de la susceptibilité exige également l'introduction de l'inventaire géomorphologique des glissements. Les résultats s'adaptent largement au risque constaté et l'échelle de cartographie exigée par les projets d'aménagement urbain.

Mots-clés : Glissement de terrain, approche indirecte « bi-variée », susceptibilité, conséquences potentielles, risque, Al Hoceima, Maroc.

ABSTRACT

Background: Localized in the north of Morocco, Al Hoceima region in the oriental Rif is certainly the most region affected by various natural risks. These phenomena is one of the main planning challenges also a major and permanent threat for the population and for the existing installations. In this context, Landslides are widespread because of the combination of risk predisposition parameters (geological formations, steep slopes, hydrographic network and seismic framework). **Objectives:** The aim of this work is to highlight the relationships existing between the susceptibility parameters (geological conditions, local topography, drainage network, land use, etc.) and the existing challenges at the scale of the study area threatened by the landslide. Thus, the relationships between susceptibility and challenges formulated by the global risk mapping of landslides.

Method: The methodology based on three stages. First, risk susceptibility (S) is mapped by identifying the mathematical relationships between predisposition factors (independent variables) and spatial occurrence of landslides (dependent variable), that's by applying the indirect approach "bi-varied". Secondly, identifying and estimating the potential consequences (C) on the existing challenges. Finally, the "landslide" (R) risk evaluated by combining the susceptibility map and the potential consequences map following a double input matrix. **Results:** The susceptibility map distinguishes between four susceptibility levels and it found by the combination of five independent parameters, in the order of importance. The damage map identifies five levels of potential damage. The crossing of the susceptibility and damage maps allowed defining four risk intensities at a spatial resolution of two meters on the ground. **Conclusion:** The study determined the good combination of the predisposition parameters. The mapping of susceptibility also requires also the introduction of the geomorphological inventory of landslides. The results are largely adapted to the noticed risk and to the required mapping scale by the urban development projects.

Keywords: Landslide, indirect approach "bi-varied", susceptibility, potential consequences, risk, Al Hoceima, Morocco.

1. INTRODUCTION

Les risques naturels constituent l'un des principaux enjeux d'aménagement, en particulier dans la région du Rif oriental marocain, zone caractérisée par des paramètres de prédisposition au risque. Cette étude a été initiée à partir d'un constat terrain et un intérêt scientifique initié par des travaux de recherches antérieurs.

Les mouvements de terrain dans le Rif ont fait l'objet de plusieurs travaux, dont ceux de [1] qui demeure l'un des pionniers dans l'étude de ces mouvements. Dans d'autres travaux [2, 3] consacrés à des régions précises du Rif, ont invoqué la combinaison de plusieurs facteurs provoquant cet instabilité.

L'objectif principal du présent travail est de mettre en évidence les relations entre des paramètres de susceptibilité (conditions géologiques, topographiques locales...) et les enjeux existants à l'échelle d'une zone urbanisée du Rif menacée par le risque de glissement de terrain.

2. SITE D'ETUDE

La zone d'étude est située à l'ouest de la ville d'Al Hoceima (fig. 1), elle s'étend sur une superficie approximative de 1 800 000 m² et elle appartient au Rif oriental, une chaîne montagneuse dont la structure est chevauchante avec une superposition de nappes (divisées en plusieurs domaines : les Ghomarides, les Sebtides et la dorsale calcaire). Le secteur est marqué par l'affleurement des calcaires et des marnes avec un relief accidenté allant jusqu'à 70° de pente.

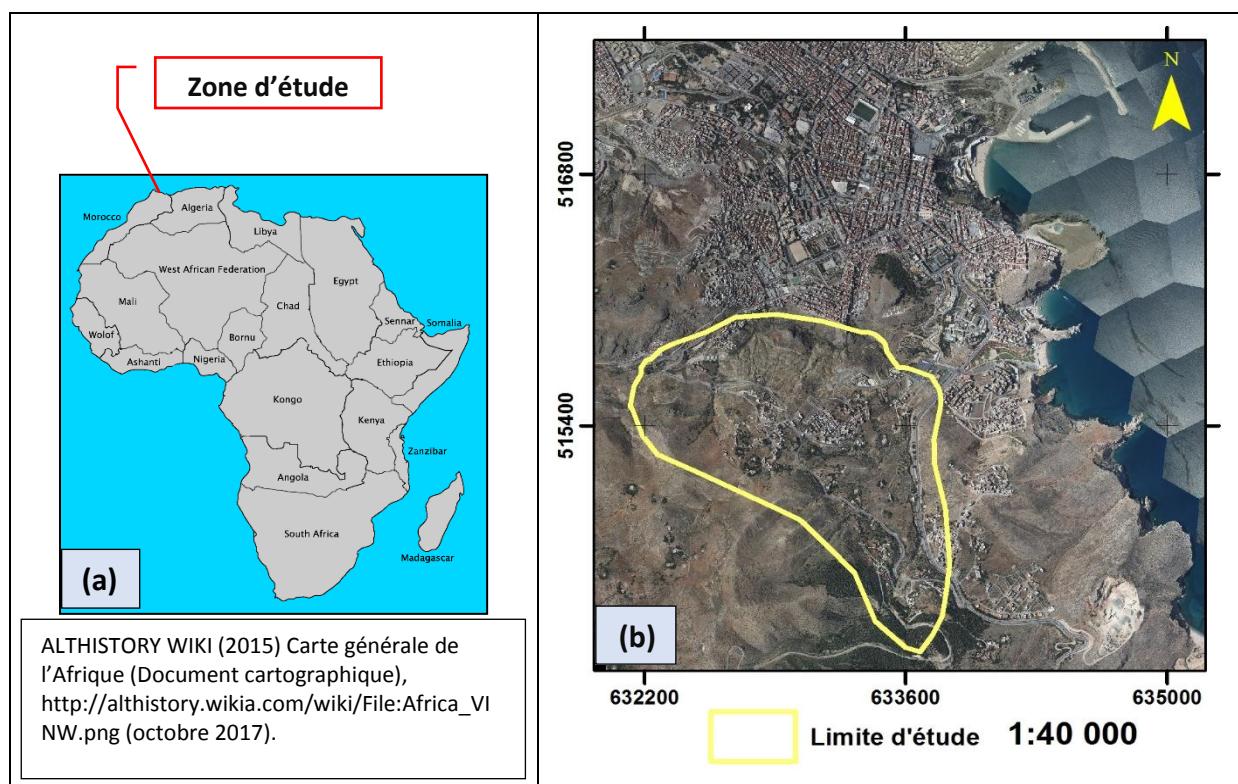


Figure 1: Situation de la zone d'étude sur (a) la carte générale de l'Afrique (b) l'orthophoto de la ville d'Al Hoceima

La zone est caractérisée également par une activité sismique remarquable. Plusieurs séismes ont secoués la région, notamment celui de 1994, 2004 et les derniers de 2016.

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

3. APPROCHE D'ANALYSE DU RISQUE EMPLOYÉE

3.1. Concepts de l'approche

- L'évaluation de l'ampleur du risque glissement de terrain consiste à exprimer le lien entre la susceptibilité et les conséquences du risque sur les enjeux exposés ;

- La susceptibilité est la probabilité spatiale qu'un glissement de terrain se produit sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Les techniques d'analyse spatiale [4,5] permettent d'identifier des zones susceptibles selon deux approches : directe (qualitative) et indirecte (probabiliste). L'approche indirecte est la plus objective et permet d'obtenir des cartes de susceptibilité plus fiables et réalistes. Elle est retenue dans le cadre de ce travail ;
- Le principe de l'approche indirecte « bi-variée » consiste à définir les relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition (Variables indépendantes) et l'occurrence spatiale du glissement (variable dépendante) ;
- La définition des conséquences du risque consiste à évaluer une valeur d'endommagement pour chaque élément exposé ;
- Le calcul du risque est effectué par croisant, à l'aide d'un tableau à double entrées [6], des classes de susceptibilité et les classes de conséquences potentielles simulées.

3.2. Données de l'étude :

Les données pour l'analyse de la susceptibilité peuvent être regroupées en cinq groupes de variables (tab .1) : inventaire géomorphologique des glissements de terrain observés, pente topographiques, géologie, formations superficielles, hydrographique et occupation du sol.

Tableau 1: Les données analysées pour l'évaluation de la susceptibilité : La variable dépendante Vd (glissements de terrain) et les variables indépendantes Ve (paramètres de prédisposition)

Variable dépendante/expliquante	Source (& échelle/résolution)
Vd	Glissement de terrain (GT) Observations, cartes (Inventaire établi au 2000 ^e)
Pente (PE)	Modèle numérique de terrain (1m de résolution)
Lithologie (LI) et Formations superficielles (FS)	Carte géologique d'Al Hoceima (au 25 000 ^e), rapports et reconnaissance terrain
Ve	Réseau hydrographique (HY) Cartes (2000 ^e) et Modèle Numérique de Terrain (1m de résolution)
Occupation du sol (OS)	Cartes (2000 ^e)

L'inventaire géomorphologique des glissements de terrain a été réalisé à partir de l'observation terrain et les rapports techniques archivés (figure 2).

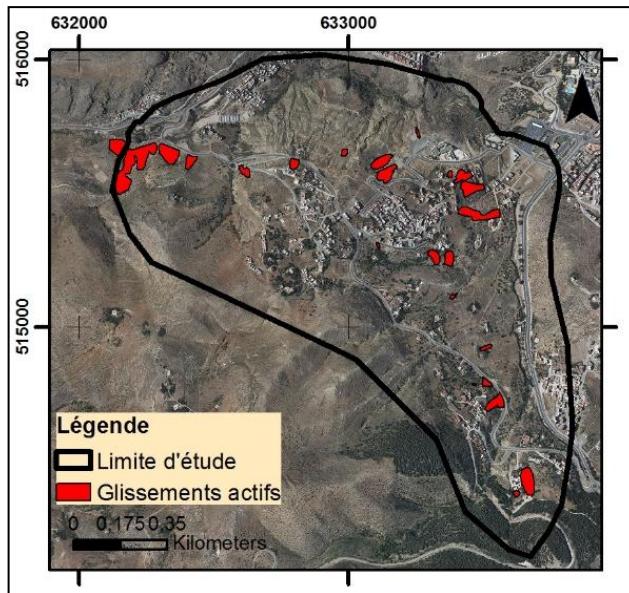


Figure 2: Représentation cartographique de l'inventaire géomorphologique des glissements de terrain actifs, élaboré par les mission de reconnaissance terrain.

Les valeurs attribuées pour qualifier le degré de l'endommagement (CEP) en cas de glissement reflète le cout des dommages monétaires et/ou humains engendrés par le phénomène. Les valeurs ont été quantifiées par retour d'expérience dans des travaux antérieurs [7].

3.3. Cartographie de la susceptibilité :

La cartographie de la susceptibilité consiste à :

- Etablir un inventaire cartographique des zones d'occurrence des glissements ;
- Tester l'indépendance conditionnelle (test χ^2) entre les cinq variables indépendantes pour un seuil de signification $\alpha = 0.05$ [8] ;
- Définir les combinaisons entre les variables indépendantes (au sens statistique). Suivant le protocole défini par [9] ;
- Valider statistiquement la combinaison employée en introduisant les 2/3 de la population totale des glissements de terrain, à partir d'un tirage aléatoire ;
- Caler le modèle obtenu en utilisant le 1/3 de la population des glissements restante ;
- Interpréter les résultats du modèle sous forme de 5 classes de susceptibilité (S). Le choix des classes est établi par discréétisation manuelle, basée sur l'existence de seuils naturels visibles sur la courbe cumulative des valeurs de susceptibilité.

3.4. Cartographie de conséquences :

L'évaluation est faite par identification des catégories des enjeux existants (structurels, corporels et fonctionnels) et par attribution des coefficients d'endommagement (CEP) à chaque détail exposé à l'enjeu. La valeur du coefficient est comprise entre 0 et 1 (tableau 2).

Tableau 2 : Enjeux identifiés (enjeux corporels, structurels et fonctionnels), typologie des éléments exposés et les valeurs attribuées du coefficient d'endommagement (CEP) à chaque élément.

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

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

3.5. Cartographie du risque total :

Cette cartographie est obtenue par le croisement des classes de la carte de susceptibilité et de conséquences potentielles suivant une matrice à double entrée (tableau 3).

Tableau 3 : Croisement des classes de susceptibilité : S0 (Nulle), S1 (faible), S2 (modérée) et S3 (forte) et les classes des conséquences potentielles : C0 (nulles), C1 (faibles), C2 (Modérées), C3 (Fortes) et C4 (très forte). Les classes de risque identifiées : R0 (risque nul), R1 ((risque faible), R2 (risque moyen) et R3 (risque fort).

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

4. RESULTATS ET INTERPRETATION

4.1. Carte de susceptibilité finale modélisée

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

Une combinaison de trois variables seulement (FS, LI et OC) produit une erreur relative sur les surfaces modélisées de 40% (fig. 3). L'ajout des variables PE et HY permet une réduction de 29% d'erreur.

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

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

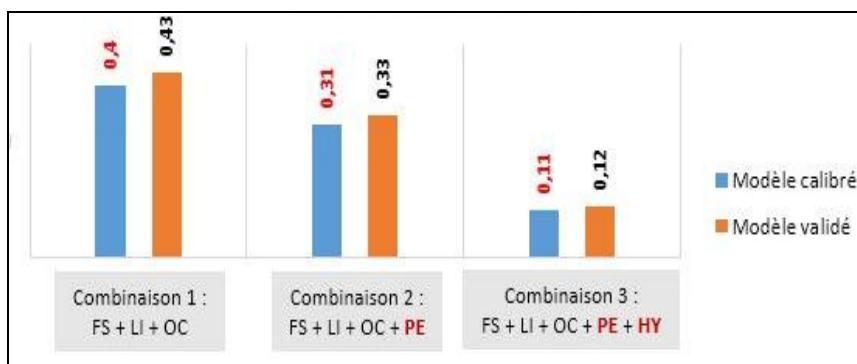


Figure 3: Choix de la meilleure combinaison des facteurs de prédisposition: Formations superficielles (FS) , Lithologie (LI), Occupation du sol (OC), Pente (PE) et Réseau hydrographique (HY). Le modèle retenu consiste à combiner les 5 paramètres.

L'approche indirecte « bi-variée » a mis en évidence le fait que, la susceptibilité aux glissements de terrain est influencée principalement par la présence des pentes moyennes à fortes, l'action des eaux de surface (la proximité des réseaux hydrographiques) et la litho-stratigraphie de la zone, ceci est vérifié par les combinaisons des variables indépendants faites et la carte de susceptibilité extraite.

Une étude faite à l'échelle de la région d'Al Hoceima, portant sur la quantification des paramètres ayant participés au déclenchement des instabilités de terrain, par une approche déterministe [10]. L'étude a démontré que le facteur de la pente a un rôle prépondérant dans l'occurrence des mouvements de terrain, lorsqu'elle est associée principalement à une litho-stratigraphie à faibles caractéristiques mécaniques et la sismicité de la région.

4.2. Carte des conséquences potentielles :

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

L'évaluation des conséquences d'un risque naturel exige le choix d'une méthode d'évaluation, plus ou moins complexe. Le choix dépend avant tout de l'échelle de la zone d'étude et la qualité et la quantité des détails. Dans le cadre du présent travail, la méthode analytique empirique est retenue, qui permet de s'affranchir de données économiques précises sur la valeur des éléments exposés ou sur le cout monétaire des dommages qui est généralement difficilement quantifiable. Cette méthode est également modulable ; à partir d'une base d'attributs des

éléments exposés, la méthode permet de modifier les valeurs des coefficients d'endommagement potentiel (CEP) en fonction de l'évolution annuelle des détails du secteur d'étude [10].

4.3. Carte du risque total :

Le croisement des cartes de susceptibilité et de conséquences potentielles indique que les zones de risque fort (R3) sont très peu développées sur le territoire étudié (fig. 4). Les zones R3 correspondent à des secteurs en urbanisation ayant une pente forte combinée à un écoulement de l'eau de ruissellement. Le niveau de risque négligeable représente 60% de la zone (1 081 000 m²) et correspond aux zones non engagées dans des activités d'aménagement. Cependant, le risque faible et modéré se concentre à l'intérieur de la zone d'étude et ils représentent respectivement 406 000 m² et 294 000 m².

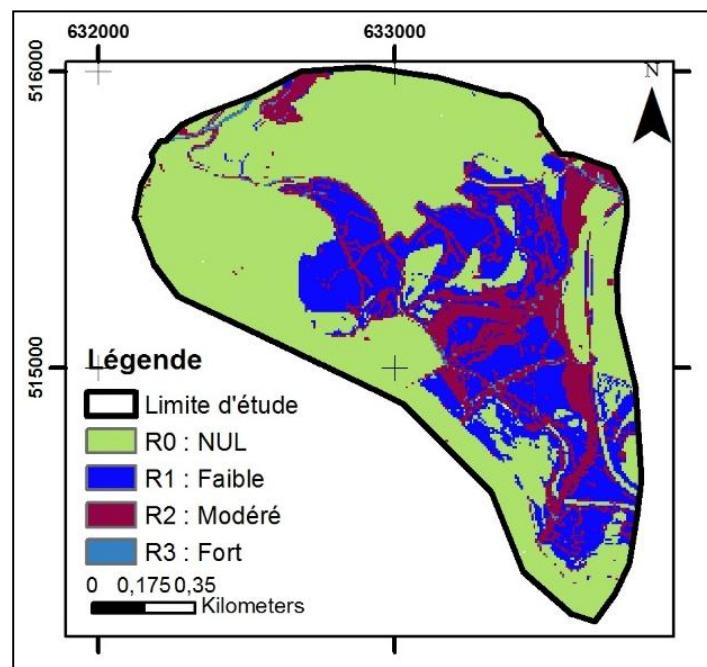


Figure 4 : la carte du risque global (R) des glissements de terrain obtenue par croisement de la carte de susceptibilité (S) et la carte des conséquences potentielles (C). Les classes de risque obtenu : R0 (Nul), R1 (faible), R2 (modéré), R3 (fort)

Le risque total, obtenu par croisement des classes de susceptibilité et de conséquences, à l'aide d'un tableau à double entrée est la meilleure façon pour exprimer le risque, comme étant la manifestation du phénomène de glissement (par l'effet combiné des paramètres de prédisposition) sur un territoire soumis à des enjeux (humaines, dommages aux biens, perturbation des activités fonctionnelles et structurelles).

Les résultats obtenus sont très satisfaisant, compte tenu de la qualité des données sources employées, la validité du modèle employé en conformité avec les synthèses des travaux antérieurs et les particularités de la zone d'étude.

5. CONCLUSION

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

La cartographie du risque de glissement nécessite un inventaire géomorphologique des glissements au niveau de la zone. C'est un travail qui nécessite une bonne connaissance du terrain, une exploitation des rapports techniques

disponibles et la mise en place d'une base de données utiles. Le bon modèle retrouvé par analyse probabiliste a démontré des résultats satisfaisants et une bonne adéquation aux particularités du secteur d'étude.

6. REFERENCES

1. Millies-Lacroix A., Les glissements de terrain, présentation d'une carte prévisionnelle des mouvements de terrain dans le Rif. Mine et Géologie. 1968 ; 27: 45-54.
2. Margua K., Essai de cartographie des risques naturels : Application à l'aménagement de la région d'Al Hoceima. Thèse universitaire, Univ. Franche-Comté (1994). 196 p.
3. Talhaoui A., Aberkan M., Iben Brahim A., El Mouraouah A., Jabour N., Contribution à l'étude des risques naturels. Cas de la région d'Al Hoceima. Oujda : Colloque des Bassins Sédimentaires Marocains. 1999 ; 27(28). et 29 Avril 1999.
4. Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., Reichenbach P., Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*. 1999; 31: 181-216. Available on: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X99000781>
5. Van Westen C.J. The modelling of landslide hazard using GIS. *Surveys in Geophysics*. 2000; 21: 241-255.
6. Ko Ko C., Flentje P., Chowdhury R., 2004. Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 2004; 63(2): 149-165. Available on: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-004-0231-z>
7. Leone F. Concept de vulnérabilité appliquée à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain. *Environnement et société*. s.l: Université de Grenoble (1996). Available on: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00721876/>
8. Bonham-Carter G.F. Geographic Information System for Geoscientists: modelling with GIS. Computer methods in the Geosciences. Pergamon Press, 1994; 13. Available on: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080418674500011>
9. Thiery Y., Sterlacchini S., Malet J.P., Puissant A., Remaître A., Maquaire O., Strategy to Reduce Subjectivity in Landslide Susceptibility Zonation by GIS in Complex Mountainous Environments. Heraklion, Greece: 7th AGILE Conference on GIScience (2004). Available on : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00276831/en/>
10. Talhaoui A., Risques géologiques et activité sismique dans la région d'Al Hoceima (Maroc) : Approche de la quantification des facteurs responsables du déclenchement des instabilités de terrain. *Pangea* (2005), 43(44): 3-18. Available on : <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00948298/document>
11. Malet J.P., Thiery Y., Maquaire O., Puissant A., Analyse spatiale, évaluation et cartographie du risque « glissement de terrain ». *Revue Internationale de Géomatique*, Lavoisier. 2006 ; 16: 499-525. Available on : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01108696>

Cite this article : Mohamed Rfifi et Lahsen Ait Brahim. EVALUATION DU RISQUE "GLISSEMENT DE TERRAIN" PAR ANALYSE PROBABILISTE : APPLICATION AU RIF ORIENTAL DU MAROC. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2017; 5(5): 319-325.

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>