

Apport du SIG et de la télédétection dans la modélisation spatiale de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la région d'Al Hoceima, Rif Oriental, Maroc

Ahmed Nasreddine El FAHCHOUC^{*}, Lahsen AIT BRAHIM, Otmane RAJI et Abdou KHOUAKHI

Université Mohamed V-Agdal, Faculté des sciences, département des sciences de la terre, Rabat, Maroc

* Correspondance, courriel : fa.nasreddine@gmail.com

Résumé

L'évaluation du degré de susceptibilité aux mouvements de terrains est devenue une préoccupation majeure dans les terrains montagneux, elle oriente les efforts à entreprendre pour prévenir les catastrophes, minimiser les risques et gérer les conséquences. Les techniques d'analyse spatialisée par le système d'information géographique (SIG) et télédétection sont de plus en plus utilisées pour évaluer la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain. Dans cette étude, la modélisation par un modèle probabiliste bivarié (théorie d'évidence) a été utilisé pour cartographier les zones susceptibles aux mouvements de terrains dans la région d'Al Hoceima (NE du Maroc). Le SIG est également utilisé pour apprécier la relation entre : (i) les mouvements des terrains et (ii) la distribution spatiale des facteurs causatifs, l'information relative à ces deux composantes a été dérivée des données de terrain, traitements d'imageries satellitaires et les documents cartographiques disponibles. Ces données ont été intégrées dans une base de données SIG avec d'autres paramètres issus des cartes géologiques, topographiques et des stations météorologiques. Cette phase de préparation a été suivie par un test de l'indépendance conditionnelle des facteurs causatifs par rapport aux mouvements de terrain survenus dans la zone. Les paramètres indépendants ont servi aux calculs des poids positifs, négatifs (W+, W-), et leurs contrastes (C). Finalement, les cartes de pondérations obtenues des différentes combinaisons ont été évaluées pour retenir la meilleur simulation des facteurs causatifs, sur ce, une série des tests de validation des résultats obtenus par l'analyse de la courbe ROC a été effectuée. Les résultats ont montrés que la combinaison qui regroupe les facteurs prédictifs : pente, exposition des versants, lithologie et densité de fracturation s'avère être la meilleure combinaison possible. Cette combinaison permet de prédire environ 70% des instabilités existants.

Mots-clés : *mouvement de terrain, théorie de l'évidence, la région d'Al Hoceima, SIG et télédétection.*

Abstract

The use of GIS and remote sensing in spatial modeling of susceptibility to landslides in the region of Al Hoceima (Eastern Rif, Morocco)

The evaluation of the degree of susceptibility to landslides has become a major concern in mountainous terrain, it directs the efforts to be undertaken to prevent disasters, mitigate risk and manage the consequences. The spatial analysis using Geographic Information System (GIS) and remote sensing techniques are increasingly used to assess the susceptibility to landslides.

In this study, a bivariate probability model (theory of evidence or 'weights of evidence') coupled with GIS for mapping areas susceptible to landslides in the region of Al Hoceima (NE of Morocco) was used. GIS is also used to assess the relationship between the landslides and the spatial distribution of causative factors. The Information on these factors was derived from observational field data and available cartographic and remote sensed data. These data were integrated in a GIS database with other parameters derived from geological maps, topographical and climate measures stations of the study area. This preparation stage was followed by a test of conditional independence of the causative factors in relation to landslides occurred in the study area. Independent parameters were used for calculations of positive weight, negative weight ($W +$, $W -$), and contrast (C). Finally, the maps obtained from different combinations were evaluated in order to retain the best simulation of causative factors, for this, a series of tests to validate the results obtained by the ROC curve analysis was performed. The results showed that the following combination of predictive factors: slope, exposure, lithology and density prove the best combination. This combination predicts about 70% of existing instabilities.

Keywords : *landslides, weights of evidence, region of Al Hoceima, GIS and remote sensing.*

1. Introduction

Un mouvement de terrain est une manifestation du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (pluviométrie anormalement forte, séismes, etc.) ou anthropiques (terrassement, déboisement, exploitation de matériaux du sous-sol ou de nappes aquifères,..). Les mouvements de terrain sont parmi les catastrophes naturelles les plus dommageables dans le terrain montagneux [1]. Ces mouvements de terrain, appelés aussi 'instabilités de terrain' recouvrent une grande variété de phénomènes naturels, tous ont en commun un déplacement de matériaux déstabilisés. Ces phénomènes complexes peuvent être ponctuels, superficiels, limités dans l'espace et/ou dans le temps, mais aussi rapides et de grandes ampleurs affectant alors des versants entiers. Certains présentent parfois un danger pour les vies humaines et sont responsables de dommages et préjudices importants et coûteux [2]. La susceptibilité exprime la probabilité spatiale qu'un type de phénomène se produit sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales [1]. L'évaluation de la susceptibilité s'effectue en trois étapes [1, 3-5] : (i) L'inventaire des phénomènes d'instabilités de terrain où chaque phénomène est distingué selon son type ; (ii) La cartographie des paramètres de terrain les plus significatifs (facteurs de prédisposition) pour l'occurrence spatiale des phénomènes et leur analyse ; (iii) La définition des pondérations relatives à chaque facteur mis en cause pour la localisation des instabilités de terrain. La définition de ces pondérations reflète la relation spatiale entre les instabilités de terrain et les facteurs de prédisposition et se définit par diverses méthodes.

Depuis une vingtaine d'années, les méthodologies d'évaluation de susceptibilité se sont diversifiées, leur comparaison a largement nourri la littérature scientifique [5]. Le SIG et télédétection ont ensuite contribué pour une large part à l'évolution de ces méthodes. Parmi les méthodes récentes les plus utilisées, il y a l'analyse bivariée basée sur le théorème de Bayes nommée théorie de l'évidence [6-8]. Au Maroc, le recensement, la description et la cartographie des phénomènes de mouvements de masse a commencé pour la première fois dans les années 1960 par Avenard (1965) [9] qui a cartographié l'érosion dans le bassin du Sebou. Depuis, plusieurs études se sont succédées [10-15]. L'alliance des facteurs pédo-géologiques, climatiques, topographiques et anthropiques fait du Rif en général et la région d'Al Hoceima en particulier des zones très exposées aux risques naturels, notamment les phénomènes d'instabilités de terrain.

Cependant l'évaluation de la susceptibilité aux mouvements de terrains par des nouvelles méthodes reste insuffisante. Le présent travail vise donc : (i) Diagnostiquer les instabilités de terrain survenus dans la zone d'Al Hoceima à travers leurs inventaires, leurs cartographies et leurs caractérisations, (ii) Construire une base de données SIG intégrant les facteurs causatifs d'instabilités de terrain ; (iii) Évaluer l'indépendance conditionnelle de ces facteurs de type χ^2 ; (iv) Élaborer une cartographie de susceptibilité aux mouvements de terrain par le biais d'un modèle probabiliste bivarie (théorie d'évidence). (v) Evaluer les différentes combinaisons pour retenir la meilleur simulation des facteurs causatifs.

2. Méthodologie

2-1. Zone d'étude

La région d'Al Hoceima (*Figure 1*), se situe au Nord du Maroc dans le Rif central entre les latitudes 35° - $35^{\circ}15$ N et la longitude $3^{\circ}45$ - 4° W. La zone d'étude s'étale sur une surface approximative de 570 Km², elle est reconnue comme étant la partie la plus instable géologiquement au Maroc, en raison de sa situation dans la zone frontière complexe entre les plaques Eurasie et Afrique, bloquée entre deux grandes failles, la faille d'El Jebha $N70^{\circ}$ et la faille de Nekor $N50^{\circ}$. De point de vue géomorphologique, l'hypsométrie imprime à la région un caractère montagneux important, elle est bien marquée par l'encaissement des vallées, les fortes pentes et les fortes dénivellations...etc. La topographie y est accidentée, ce qui la rend isolée et difficile d'accès. Cette région montagneuse humide est caractérisée par des altitudes variant de quelques mètres au bas des oueds à 1200m vers les hauts sommets. Placée sous les influences méditerranéennes, elle reçoit une pluviométrie annuelle oscillant entre 360 et 700 mm et dispose d'un domaine forestier important.

De point de vu géologique, la zone d'intérêt est formée par un éventail de faciès variés qui s'étend du Paléozoïque au Cénozoïque. Elle recouvre (i) la chaîne des Bokkoyas (domaine interne) sous formes de klippes à superficies réduites occupant le plus souvent des dépressions topographiques : klippe d'Al Hoceima, Adouz-Taoussart, Tirhza, oued Isli et Bades [16, 32], (ii) l'unité de Tisirène, elle sépare la chaîne calcaire des Bokkoyas de l'unité de Kétama, elle est considérée comme entièrement allochtone et représentée par un puissant flysch d'âge Néocomien à Aptien qui comprend localement à sa base des turbidités calcaires et des radiolarites du Dogger au Berriasien (iii) l'unité métamorphique de Kétama (domaine externe), très déformée et faiblement métamorphique de degrés anchi-épizonal [17]. Il est caractérisé principalement par d'épaisses séries schisto-gréseuses du Crétacé inférieur (Néocomien et Barrémo-Albien).

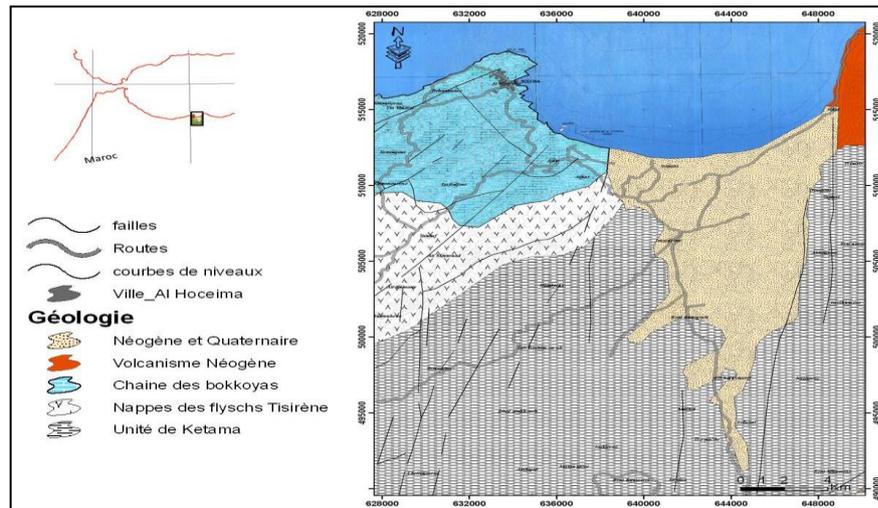


Figure 1 : Situation de la zone d'étude et carte géologique simplifiée de la zone d'étude

2-2. Méthodes

La **Figure 2** retrace la démarche méthodologique adoptée dans le cadre de cette étude pour évaluer la susceptibilité aux instabilités de terrain sur la base de la théorie de l'évidence. Cette démarche s'articule essentiellement autour de quatre axes: (i) inventaire et identification des instabilités de terrain (préparation des données relatives aux variables à modéliser) ; (ii) la caractérisation et la détermination des facteurs conditionnant (paramètres de prédisposition) lithologie, fracturation, pente, exposition et précipitation ; (iii) évaluation de l'indépendance conditionnelle des variables prédictive (iv) Application de l'approche bivariable par théorie de l'évidence. L'analyse spatiale bivariable par la théorie de l'évidence est utilisée pour évaluer la susceptibilité aux instabilités de terrain dans la région d'Al Hoceima à moyenne échelle de 1/50 000. Cette méthode quantitative qui à l'origine a été développée pour une application non spatiale dans le diagnostic médical [18], elle a été introduite en géologie par Bonham-Carteren 1994, ensuite plusieurs auteurs l'ont appliqué dans divers domaines de cartographie par SIG jusqu'à avoir été utilisée également pour la cartographie de sensibilité aux instabilités de terrain [7, 8,19, 33-35].

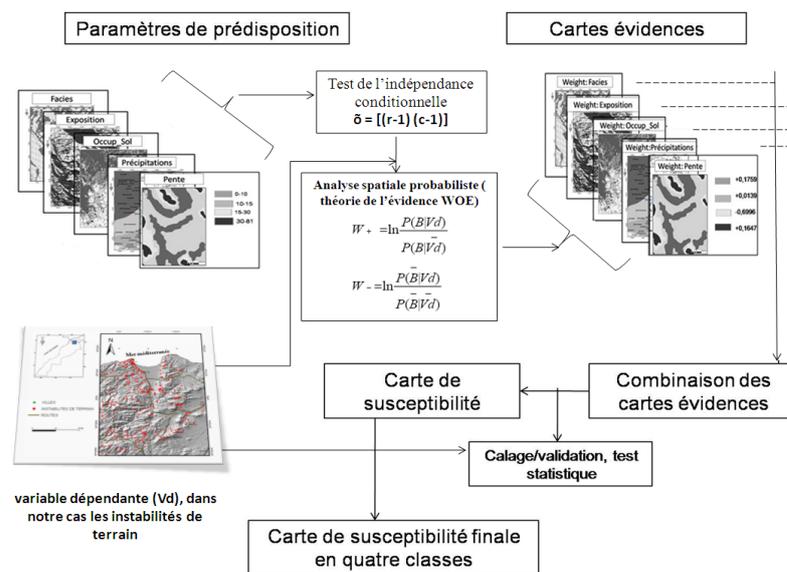


Figure 2 : Approche méthodologique préconisée (Théorie de l'évidence)

La théorie de l'évidence est une version log-linéaire du théorème générale de Bayes qui utilise les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité *a priori* et *a posteriori*. La probabilité *a priori*, qui est la probabilité qu'une unité de terrain (un pixel) contienne une variable dépendante Vd (dans notre cas les instabilités de terrain), est calculée suivant la densité sur la zone d'étude. Ensuite, la probabilité *a posteriori* est estimée après le calcul de la probabilité *a priori* selon la densité des instabilités de terrain pour chaque variable (ou classe de variable) considérée comme prédictive Vp. La méthode consiste à calculer le poids (Equation 1 et 2) pour chacun des facteurs de prédiction de glissement de terrains.

$$W_i^+ = \ln \frac{P\{B/Vd\}}{P\{B/\bar{Vd}\}} \quad (1)$$

$$W_i^- = \ln \frac{P\{\bar{B}/Vd\}}{P\{\bar{B}/\bar{Vd}\}} \quad (2)$$

Où W^+ est le poids positif et W^- est le poids négatif. B est la classe de variable prédictive et le symbole «—» représente l'absence de Vp et/ou de Vd. Le ratio nommé *cote* représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence du phénomène étudié. Les pondérations sont additionnées en utilisant le logarithme naturel des ratios appelé *logit*. Les calculs des valeurs de W^+ et de W^- pour toutes les Vp permettent de calculer la probabilité *a posteriori*, qui actualise la probabilité *a priori*. Lorsque plusieurs Vp sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de Vd [8]. La différence entre les deux poids W^+ et W^- est connu comme le contraste des poids, il reflète l'association spatiale entre la variable globale prévisible et les instabilités de terrains. La valeur de contraste donne un premier aperçu pour accepter ou rejeter une variable prédictive. Ce calcul permet d'identifier les variables ou les 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 ($W^+ = W^- = 0$). Ce modèle statistique est introduit dans le SIG ArcGis10 par une extension appelée Arc SDM [20]. Le modèle calcule les probabilités *a priori* W^- , les probabilités *a posteriori* W^+ et un test d'hypothèse de type χ^2 . La procédure pour déterminer la meilleure combinaison est réalisée en additionnant un à un chaque variable prédictive.

3. Résultats et discussion

3-1. Identification et cartographie des instabilités de terrain

La cartographie des instabilités de terrain dans la zone d'étude a été entamée en 3 étapes : (i) cartographie des instabilités de terrain déjà inventoriées par les différents auteurs ayant travaillé sur la zone d'étude [10-22] (ii) photo-interprétation et traitement d'images satellitaires et photos aériennes (iii) vérification de l'inventaire par des observations sur le terrain. Une fois l'inventaire des mouvements de terrain réalisé, ces derniers ont été classés par typologie. Au total, 108 mouvements de masses ont été recensés et géoréférencés (**Figure 3**), dont 81% correspondent à des glissements de terrain (circulaire, plan ou complexe), 7% à des éboulements et 12% des solifluxions. Les mouvements de terrain sont majoritairement représentés par des glissements circulaires qui se produisent au sein des altérites issues de l'altération du flysch à silex. Ces instabilités se répartissent sur une surface de 17 Km² soit 6% de la superficie totale de la zone d'étude.

En général, les instabilités de terrain recensées dans la région d'Al Hoceima présentent une richesse de formes et de processus couplée à une activité diverse selon les secteurs et les facteurs de prédisposition et déclenchant. Dans ce sens, la région d'Al Hoceima semble bien adaptée à la recherche engagée.

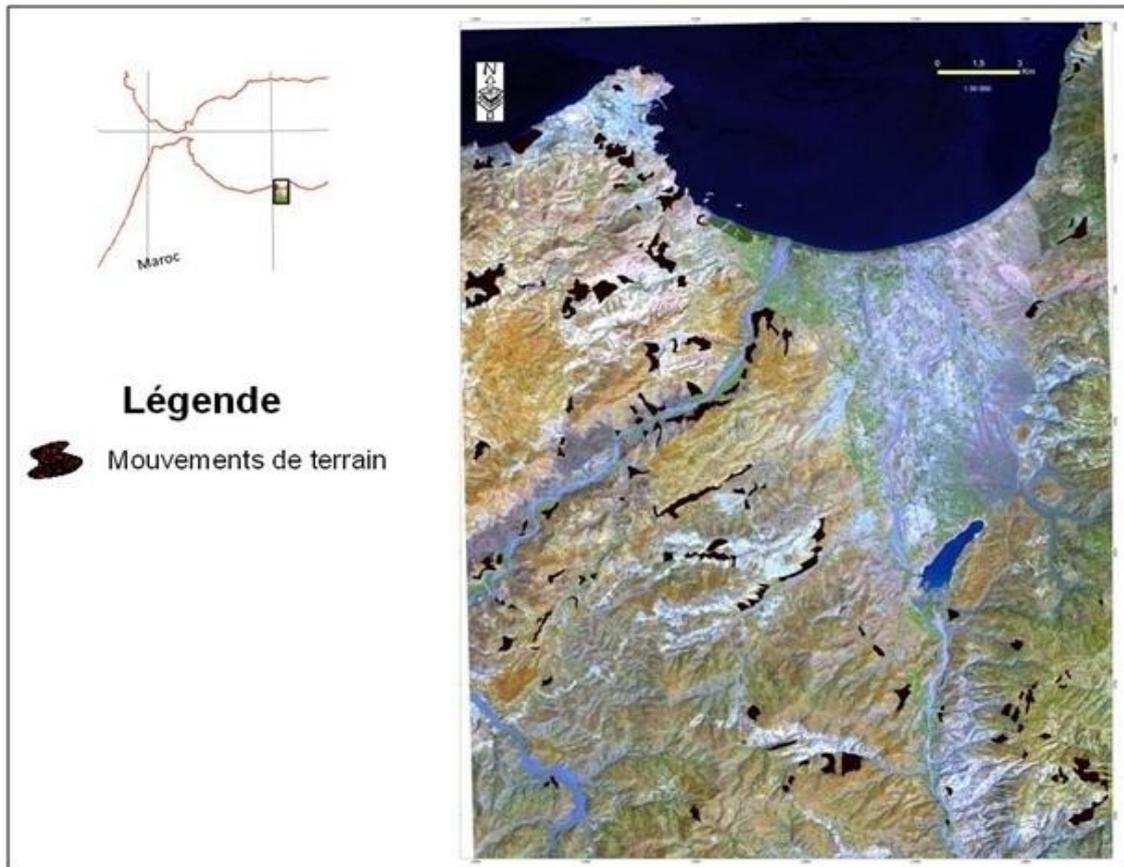


Figure 3 : Cartes d'instabilité de terrains extraites par télédétection

3-2. Caractérisation et détermination des facteurs de prédictions

L'apparition d'un mouvement de masse est le résultat de la conjonction de plusieurs facteurs difficilement dissociables à cause des interactions mutuelles [23]. Par ailleurs, le nombre de facteurs impliqués augmente avec la taille du mouvement [24]. Dans cette étude, La susceptibilité aux instabilités de terrain est élaborée à partir de cinq facteurs de prédisposition (**Figure 4**). Ces derniers sont dérivés soit à partir des bases de données nationales existantes et disponibles, soit de la digitalisation d'informations obtenues par photo-interprétation, traitement d'images satellites, interprétation de cartes topographiques et/ou des observations directes sur le terrain. L'applicabilité à la zone d'étude et la disponibilité des données sont les principaux critères de choix.

3-2-1. L'exposition

Exprime l'orientation des versants par rapport au nord. Elle est déterminée par mesure, dans le sens des aiguilles d'une montre, de l'angle entre le nord et la projection horizontale de la ligne de pente maximale d'un versant. Le SIG (ArcGis) offre un module spécial pour la construction des cartes des orientations à partir du MNT (**Figure 4a**).

3-2-2. La tectonique

Les relations entre les instabilités de terrain et la tectonique sont d'importance presque comparable à celle liant les instabilités à la nature géologique de la roche. L'activité tectonique peut déclencher ou mettre en mouvement une masse de terrain au niveau de la zone de broyage des failles formée de matériaux fragilisés. En plus l'occurrence des mouvements de masses se trouve généralement accentuée à proximité des résurgences. En effet, l'eau s'infiltré à travers les diverses failles entraînant l'accroissement de pression interstitielles, ce qui réduit la résistance au cisaillement des sols. Une fois arrivée à saturation, le mouvement en masse est déclenché avec formation d'un plan de cisaillement profond. En général, les versants conformes avec les couches stratigraphiques ou schistosité principale subparallèle à la pente sont beaucoup plus riches en instabilités que les versants contraires. Pour établir la carte d'indice lié à la fracturation, nous avons eu recours aux résultats de l'analyse des données satellitaires optiques complétée par les études du réseau hydrographique et du terrain ; ce qui nous a permis d'établir une carte de densité de la fracturation. Cette dernière, tien compte aussi bien de la longueur de la faille que de la présence de nœuds tectoniques. D'importants mouvements de terrain se sont développés le long des accidents de NW-SE et N-S ainsi qu'au niveau de certain nœuds tectoniques (*Figure 4b*).

3-2-3. La lithologie

Représente un facteur conditionnant majeur dans la stabilité des versants, aussi bien par la nature des matériaux (géotechnique et morphologiques) que par la structure (direction et pendage des couches, plan de schistosité, etc.). Les principales unités lithologiques de la zone d'étude ont été regroupées en quatre catégories afin de simplifier leur dénomination, qui selon leurs pourcentages sont : 43,05% de terrains grès quartzitiques, 37,78% de schistes, 14,05% de terrains marno-schisteux, et enfin 5,09% des calcaires. La plupart des mouvements inventoriés s'avèrent être en relation direct avec la présence d'argiles, les marnes et les schistes (*Figure 4c*).

3-2-4. Les précipitations

Jouent un rôle important et direct dans le déclenchement des instabilités de terrain [25]. Les précipitations dans la zone d'étude sont contrôlées par un climat méditerranéen subhumide qui dépend de la latitude, du flux zonal maritime Ouest-Est, des mouvements méridiens des masses d'air polaires et sahariennes et du relief. L'année climatique présente deux caractéristiques importantes: une période sèche et chaude qui dure 3 mois en moyenne juin, juillet et août et une période d'excès d'eau en saison hivernale pluvieuse et froide avec des précipitations moyennes annuelles variant de 360 à 700 mm [26]. Cinq stations météorologiques couvrant l'aire d'étude ont été retenues pour caractériser les précipitations. Ces stations sont les seules qui disposent d'une longue et d'une complète série d'observations. La moyenne annuelle de précipitation des cinq stations a été interpolée par la méthode spatiale de *krigeage*. Les résultats montrent que la pluviométrie est relativement élevée mais très variable d'une année à l'autre et est concentrée pour 80% entre le 15 Octobre et le 15 Avril et reste largement inférieure à l'évapotranspiration (*Figure 4d*).

3-2-5. La pente

Est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrain. En effet, pour qu'une rupture survienne sur un versant, il faut nécessairement qu'il y ait un appel de vide quelque part [14]. Dans ce sens, il faut noter que ce paramètre ne prend en compte que les secteurs où les surfaces de sol sont nues et où le pendage est visible.

Les versants les plus propices à l'instabilité de terrain sont ceux dont l'angle d'inclinaison est supérieur à 5° , avec un maximum de susceptibilité entre 10° et 25° . Dans cette étude, le gradient de pente a été déterminé à partir du modèle numérique Aster GDEM (résolution 30m), quatre classes ont été retenues de [0-5], [5-13], [13-30], [30-80] (Figure 4e).

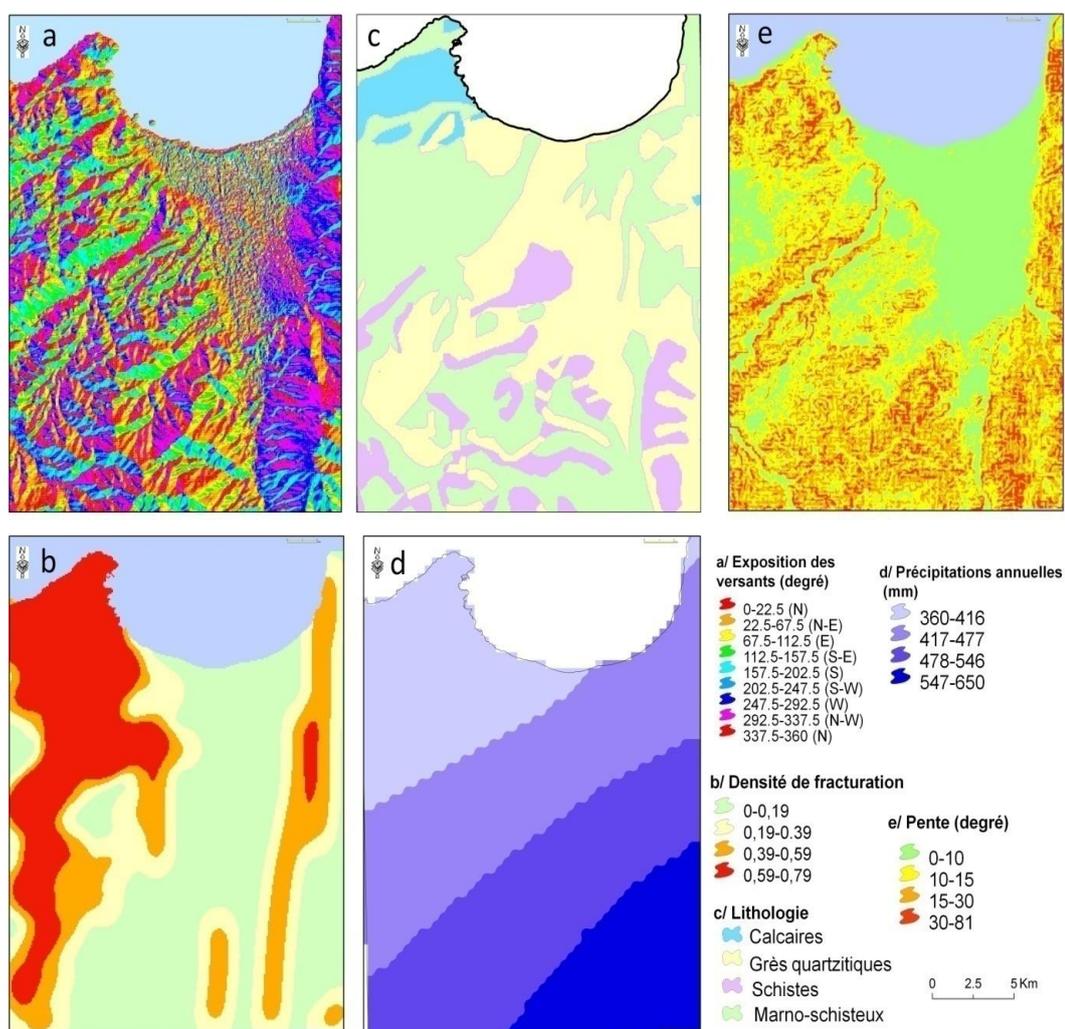


Figure 4 : Les variables prédictives choisies dans cette étude : a) Expositions des bassins versant, b) Densité de fracturation, c) Lithologie, d) Précipitations annuelles, e) La pente

3-3. Evaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrain

L'analyse de la meilleure combinaison de variables prédictives est une étape primordiale [27] car sa violation peut engendrer une surestimation ou une sous-estimation de la probabilité. Il s'agit de l'évaluation de l'indépendance conditionnelle des variables prédictives sélectionnées. Pour cela, le test statistique χ^2 est largement utilisé dans ce genre d'études [1, 28, 29, 30]. Les résultats de ce test pour l'ensemble des variables selon un seuil de signification ($\alpha = 0.05$) sont présentés dans le (Tableau 1).

Tableau 1 : Tableau de contingence pour évaluer l'indépendance conditionnelle, χ^2 : test statistique chi-carré ; α : seuil de signification ($\alpha < 0.05$ signifie qu'il y a une dépendance conditionnelle); les valeurs en gras présentent les variables dépendant

Variable		Pente	Fracturation	Lithologie	Exposition
Précipitation	α	0,91	0,00	0,00	1,00
	χ^2	4,02	14,40	20,72	1,42
Pente	α		0,89	0,91	0,56
	χ^2		4,30	3,98	7,78
Fracturation	α			0,00	0,49
	χ^2			11,63	8,41
Lithologie	α				0,97
	χ^2				2,87

L'analyse de contingence montre que 3 paires de variables mentionnées en gras présentent une dépendance conditionnelle. Ces paires sont : Lithologie – Précipitation ; Lithologie – Fracturation et Fracturation – Précipitation.

Tableau 2 : Corrélation spatiale entre les variables prédictives et les valeurs de pondération calculées par la théorie de l'évidence, $(W+)$: la valeur la probabilité a priori, $(W-)$: la valeur de la probabilité a posteriori, CONTRAST : le contraste est la différence entre $W+$ et $W-$

Variables	Classes (Vp)	Surface en Km ²	W(+)	W(-)	Contrast
Densité de fracturation	0 - 0,19	198,45	-0,3554	0,1720	-0,5274
	0,19 - 0,39	103,71	0,0989	-0,0257	0,1246
	0,39 - 0,59	93,86	0,0625	-0,0140	0,0765
	0,59 - 0,79	129,68	0,2977	-0,1165	0,4143
Facies	Marno-schisteux	28,45	0,7707	-0,0631	0,8337
	Schistes	193,36	0,1754	-0,1156	0,2910
	Grès quartzitiques	74,52	0,4629	-0,0973	0,5603
	Calcaires	229,45	-0,6174	0,3210	-0,9384
Pente (Degré)	0 - 5	201,41	-0,4835	0,2229	-0,7064
	5 - 13	165,56	0,1970	-0,1033	0,3003
	13 - 30	110,12	0,4777	-0,1675	0,6451
	30 - 80	47,69	-0,5498	0,0428	-0,5926
Précipitations (mm)	360 - 416	120,71	0,3017	-0,1085	0,4102
	417 - 477	174,73	-0,3115	0,1299	-0,4414
	478 - 546	155,74	-0,0776	0,0315	-0,1092
	547 - 650	70,30	0,2298	-0,0402	0,2701
Exposition	Nord	217,33	-0,1698	0,1056	-0,2754
	Est	100,47	-0,1716	0,0369	-0,2085
	Sud	100,74	0,1346	-0,0342	0,1688
	Ouest	109,19	0,2905	-0,0893	0,3798

La dépendance entre ces variables prédictives est probablement liée au nombre assez important d'instabilités de terrain localisés dans des aires communes entre deux variables, produisant ainsi une grande redondance statistique. L'ensemble des variables ont été intégrées dans le modèle de calcul, les poids positifs (W+), négatifs (W-) et leurs contrastes ($C = W+ - W-$) ont été ainsi calculés pour chaque classe de variables (**Tableau 2**). Il est intéressant de noter que douze (12) classes sur vingt (20) des variables au total sont positivement corrélées avec les instabilités de terrain (elles sont présentées dans le **Tableau 2**).

L'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrains a été menée en effectuant plusieurs simulations de variables prédictives pour pouvoir examiner l'influence de chaque facteur sur le pouvoir prédictif de la carte de susceptibilité résultante. Plusieurs modèles de combinaisons sont proposés, le choix a été basé sur les résultats de corrélation entre les variables (**Tableau 3**).

Tableau 3 : Les différentes combinaisons de variables retenues

Modèles	Combinaisons de variables
M 1	Lithologie + Pente + densité de fracturation + exposition des versants + précipitations
M 2	Pente + précipitations + exposition des versants
M 3	Pente + exposition des versants + lithologie + densité de fracturation
M 4	Pente + lithologie + exposition des versants + précipitations
M 5	Pente + exposition des versants + précipitations+ densité de fracturation

La première des simulations (M1) consiste en la combinaison de toutes les variables (lithologie, pente, densité de fracturation, exposition des versants et les précipitations), dont le but est de tester l'impact des paramètres avec la présence d'une dépendance conditionnelle entre trois paires, d'après le test X2 (**Tableau 1**). Dans le modèle 2 (M2) les variables lithologie et densité de fracturation ont été éliminées puisque les deux présentent une corrélation forte avec la précipitation, le M2 sera donc constitué par les variables expositions des versants, pente et précipitation qui ont été introduites. Le modèle M3 la variable de précipitation a remplacé les variables lithologie et densité. Pour M4 et M5 la précipitation a été remplacée par un seul variable soit par la densité de fracturation (dans le cas M4) soit par la lithologie dans (cas de M5). Les cartes obtenues pour les modèles sélectionnés montrent des différences remarquables (**Figure 5**). Le taux de réussite indique combien de pourcentage de tous les glissements de terrain se produit dans les classes avec la valeur la plus élevée de cartes de sensibilité. La capacité de chaque modèle à prédire les instabilités de terrain a été vérifiée à l'aide de la courbe du taux de succès [31]. Pour chaque courbe un indice synthétique a été calculé, l'aire sous la courbe (AUC ou *Area Under the Curve*) qui reflète la probabilité pour qu'un événement positif soit classé comme positif. Pour un modèle idéal l'AUC tend vers 1. Un modèle est habituellement considéré bon dès lors que la valeur de l'AUC est supérieure à 0,7 et un modèle bien discriminant doit avoir une AUC entre 0,87 et 0,9.

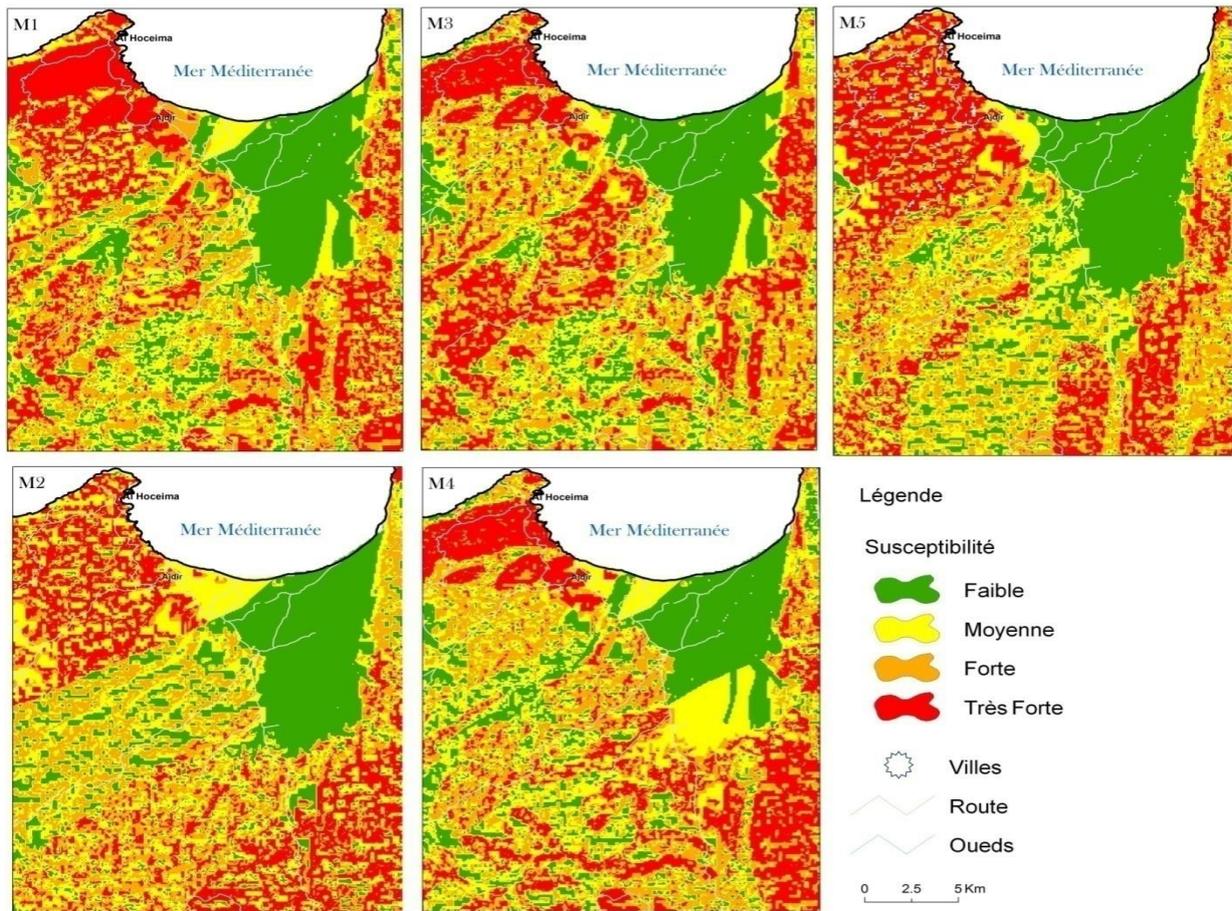


Figure 5 : Cartes de susceptibilités de chaque modèle de simulation choisi

Les résultats obtenus dans notre cas (**Figure 6**), montre que la totalité des simulations fournissent généralement de bons résultats, puisque l'AUC est généralement proche de 1. Le modèle M3 présente le meilleur score (AUC = 0,88), c'est le modèle où la variable précipitation n'a pas été mise en compte. Les modèles M1 qui portant inclut toutes les variables affichent la plus petite AUC (0,81) Cela est probablement dû à la redondance des données. L'analyse de la carte de susceptibilité retenue obtenu par le modèle M3, monte que les zones qui montrent une susceptibilité très forte aux instabilité de terrains est largement concentrée au Nord-ouest, à l'est et au centre de la zone d'étude avec 30,55% de surface occupé par cette classe, cela dû aux conditions environnementales locales qui sont très favorable au déclenchement (association d'un gradient de pente > à 25°, relief prononcé, forte fracturation, sols fortement dégradées ou ravinés, l'absence de végétation ou des forêts mal entretenues). Les zones de susceptibilité forte, moyenne et faible occupent respectivement des aires qui représentent 26,30%, 25,31% et 17,86% de la superficie total de la zone d'étude. La distribution spatiale des instabilités de terrain inventoriés suivant les classes de susceptibilité définies, montre 39,81% des instabilités dans la classe la plus élevée, 33,33% dans la classe élevée, 21,30% dans la classe moyenne et 5,56% dans la classe faible. En résumé le pourcentage des instabilités de terrain prédis dans les classes de susceptibilité très forte et forte sont très significatifs vu qu'elles présentent 73,15% des aires observés.

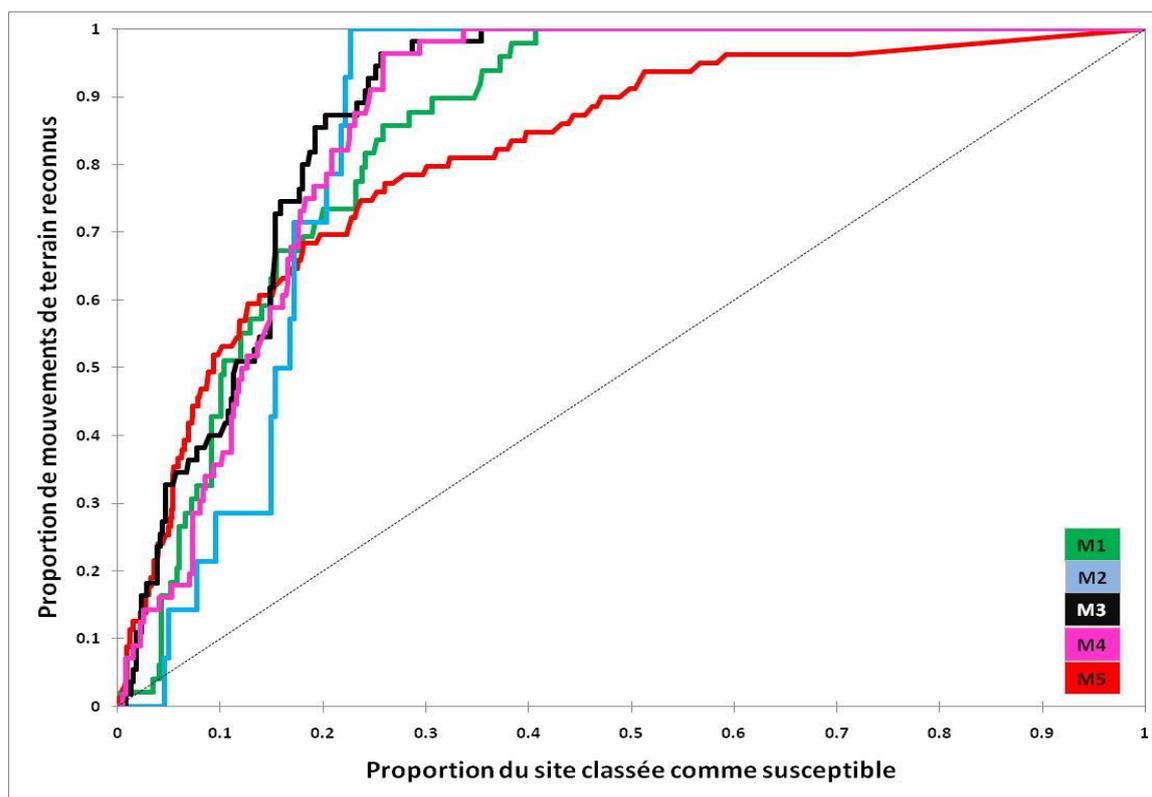


Figure 6 : La courbe de taux de succès pour les 5 modèles sélectionnées ainsi l'AUC de chaque modèle. $AUC = (M1=0,818)/(M2=0,850)/(M3=0,880)/(M4=0,866)/(M5=0,852)$.

4. Conclusion

Les mouvements de terrain dans les zones montagneuses causent d'énormes pertes de vie et de biens chaque année. Dans ces zones, la cartographie de susceptibilité aux instabilités de terrains est devenue une nécessité. Dans cette étude, une base de données SIG a été préparée pour la région d'Al Hoceima en utilisant cinq facteurs prédictifs ainsi que les instabilités de terrain existants, ensuite la théorie d'évidence a été appliquée. L'analyse de la susceptibilité a été entamée en examinant cinq modèles avec cinq différentes combinaisons de facteurs prédictifs. La combinaison qui regroupe les facteurs prédictifs Pente, exposition des versants, lithologie et densité de fracturation s'avère être la meilleure combinaison possible. Elle permet de prédire environ 70% des instabilités existants. Cette étude montre que l'approche adoptée en utilisant les SIG peut donner de bons résultats dans l'analyse des données axées sur le terrain et offre ainsi un outil efficace pour la planification pour tout projet à l'échelle locale. Cependant, il convient de rappeler que les résultats obtenus dans cette étude, les conclusions, présentées ici, devraient être examinés avec soin, et toujours se souvenir qu'ils sont le résultat d'un "modèle de réalité" et non de la réalité elle-même, en effet la méthode présentée doit être validée pour une même combinaison de variables prédictives sur des sites aux caractéristiques environnementales différentes et à différentes échelles, afin de définir sa reproductibilité et l'incertitude associée aux prédictions.

Références

- [1] - Y. THIERY, J. P. MALET, S. STERLACCHINI, A. PUISSANT, & O. MAQUAIRE, Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du sud, France) aux 'mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste: DOCTORAT de l'UNIVERSITE de CAEN. Paris. (2007), 440p.
- [2] - O. MAQUAIRE, Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain) : processus, fonctionnement, cartographie. Mémoire d'habilitation à Diriger des Recherches : Université Louis Pasteur, Strasbourg, (2002) 219 p. + 1 volume d'annexes.
- [3] - D.J. VARNES, Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice. IAEG Commission on Landslides. UNESCO, Paris, (1984), 63 p.
- [4] - A. CARRARA, G. CROSTA, & P. FRATTINI, Geomorphological and historical data in assessing landslide hazard. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(10), (2003), 1125-1142.
- [5] - C. J. VANWESTEN, T. W. J. VAN ASCH, R. SOETERS, Landslide hazard and risk zonation : why is it still so difficult: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, (2006), 167–184.
- [6] - G. BONHAM-CARTER, *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS*: Pergamon Press, Oxford, (1994), 398p.
- [7] - C-J. VAN WESTENET G-F. LULIE, Analyzing the evolution of the Tessina landslide using aerial photographs and digital elevation models. *Geomorphology* 54 (1–2), (2003), 77–89.
- [8] - Y. THIERY, Test of Fuzzy Logic Rules for Landslide Susceptibility Assessment, SAGEO 2006. Colloque International de Géomatique et d'Analyse Spatiale: Recherches & Développements. Strasbourg, (2006), 16 p.
- [9] - J.M. AVENARD, L'érosion actuelle dans le bassin de Sebou. INRA, Rabat, 1965, 114p.
- [10] - G. MAURER, 1968. Les montagnes du Rif central, étude géomorphologique. Thèse d'état. Université de Paris. (1965), 500 p.
- [11] - 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, n° 15. (1981), 439 p.
- [12] - KH. MARGAA, Essai de cartographie des risques naturels : application à l'aménagement de la région d'Al Hoceima (Rif Nord-Maroc). Thèse Doctorat. Université de Franche-Comté, (1994), 196 pp.
- [13] - A. FARES, Essai méthodologique de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate (Rif, Maroc). Thèse Doctorat. Université de Franche Comté. (1994), 177 p.
- [14] - A. SOSSEY, Traitement et intégration des données satellitaires optiques et Radar dans un SIG en vue de l'obtention de carte de l'aléa lié aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif septentrional, Maroc): Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. (2005), 175p.
- [15] - A.N. EL FAHCHOUCH, Weight of evidence model based on GIS to evaluate landslides susceptibility in central Rif of Morocco, water and geosciences, University of Cambridge, UK February 23-25, (2010).
- [16] - O. AZZOUZ, Lithostratigraphie et tectonique hercynienne des terrains paléozoïques ghomarides du Massif des Bokoya (Rif Interne, Maroc). Thèse 3ème cycle, Univ Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, (1992), 208 p.
- [17] - J. ANDRIEUX, La structure du Rif central Etude des relations entre la tectonique de compression et les nappes de mouvements dans un tronçon de la chaîne alpine. Notes & Mémoires, Science de la Géologie, Maroc, n° 235, (1971), 155 p.
- [18] - D. SPIEGELHATER, R.P. KILL-JONES, Statistical and Knowledge Approaches to Clinical Decision-support Systems, with an Application in Gastroenterology », *Journal of the Royal Statistical Society*, vol. 147, n° 1, (1984), 1984 p. 35-77.

- [19] - S. LEEET K. MIN, Landslide susceptibility analysis and verification using a Bayesian probability model. *Environmental Geology*, 43: (2002), 120-131p.
- [20] - L. D. KEMP, G. F. BONHAM-CARTER, G. L. RAINES ET C.G. LOONEY, Arc-SDM: Arc View extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis, (2001), <http://ntserv.gis.nrcan.gc.ca/sdm/>
- [21] - JC. MILLIES-LACROIX, Les mouvements de terrains. Présentation d'une carte prévisionnelle dans le domaine de masse dans le rif (Maroc Septentrional): *Mines et géologie*, n°27. (1968), p45-55.
- [22] - M. MANSOUR, Geodynamic processes and cartography of ground movements in the area of Chefchaouen (District of Bouhalla-Amtrass). Application to the stabilization of main road Nb: 39. Western Rif, Morocco. Thèse doctorat .Université de Paris 07. (1998), 192 p.
- [23] - DJ. VARNES, Slope Movement Types and Processes. In Special Report 176: Landslides: Analysis and Control. In: Schuster, R. L., Krizek, R.J., (Eds), Transport Research Board, National Research, (1978), 11–33.
- [24] - P. ANTOINE, Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur - aspects géologiques. *Bulletin AIGI*, Paris, n°45, (1992), p. 9-24.
- [25] - P. GOSTELOW, Rainfall and landslides. Prevention and control of landslides and other mass movements, edited by: Almeida-Teixeira, M., Fantechi, R., Oliveira, R., and Gomes Coelho, A., CEC, Brussels, (1991), 139-161.
- [26] - J. EL KHATTABI, ET E. CARLIER, Tectonic and hydrodynamic control of landslides in the northern area of the Central Rif, Morocco. *Engineering geology*, 71 (3), (2004), 255-264.
- [27] - G. F. BONHAM-CARTER, F. P. AGTERBERG ET D. F. WRIGHT, Weights of evidence modeling : a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P. and Bonham-Carter, G.F. (eds.) *Statistical applications in the Earth Science*, Geological Survey of Canada Paper 89-9, Ottawa, Canada, (1989), 171-183p.
- [28] - V. AGNESI, C. CONOSCENTI, C. DI MAGGIO, C. IUDICELLO, ET E. ROTIGLIANO, Landslide hazard analysis in the Giardo River Basin (Middle-Western Sicily). *Proceedings of the Workshop on Geomorphological sensitivity and system response*. Università di Camerino-Università di Modena, Camerino, Italy, (2003), pp. 3–11.
- [29] - S. POLIET S. STERLACCHINI, Landslide representation strategies in susceptibility studies using weights-of-evidence modeling technique. *Natural Resources Research*, 16(2), (2007), 121-134.
- [30] - B. NEUHÄUSERET, B. TERHORST, Landslide susceptibility assessment using “weights-of-evidence” applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology*, 86(1-2), (2007), 12-24p.
- [31] - C.J.F CHUNG ET A. G. FABBRI, Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 65:12, (1999), 1389-1399p.
- [32] - A. KHOUAKHI, M. SNOUSSI, S. NIAZI, O. RAJI., Vulnerability assessment of Al Hoceima bay (Moroccan Mediterranean coast): a coastal management tool to reduce potential impacts of sea-level rise and storm surges *Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England)*, *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 65, ISSN 0749-0208, (2013) pp. 968-973.
- [33] - C. XU, X. XU, X. YAO, & F. DAI., Three (nearly) complete inventories of landslides triggered by the May 12, 2008 Wenchuan Mw 7.9 earthquake of China and their spatial distribution statistical analysis. *Landslides*, 11(3), (2014), 441-461.
- [34] - C. Xu, X. Xu, F. Dai, J. Xiao, X. Tan, & R. Yuan, Landslide hazard mapping using GIS and weight of evidence model in Qingshui river watershed of 2008 Wenchuan earthquake struck region. *Journal of Earth Science*, 23, (2012), 97-120.
- [35] - H. R. Pourghasemi, B. Pradhan, C. Gokceoglu, M. Mohammadi, & H. R. Moradi, (2013). Application of weights-of-evidence and certainty factor models and their comparison in landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(7), 2351-2365.