

CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN PAR LES MÉTHODES DU RAPPORT DE FRÉQUENCES (FR) ET DU POIDS DE L'ÉVIDENCE (WOE) DANS LA WILAYA DE MILA

Ahmed SERKHANE^{1,2}, Yassine SAIDI¹, Fatma OUKID¹, Fatna MEHDADI¹,
Rabah DJEDDI^{1,2} et Yazid RABAH¹

RÉSUMÉ

L'étude de la susceptibilité aux glissements de terrain est l'une des étapes incontournables pour la gestion des catastrophes, et l'amorçage des activités de planification et d'occupation des sols. À cet effet, un travail de modélisation de la susceptibilité aux glissements de terrain, basé sur les méthodes statistiques bivariées à savoir, le rapport de fréquences (FR) et le poids des évidences (WoE) sous SIG, a été réalisé pour la wilaya de Mila. Avant d'entamer le travail de modélisation, une carte d'inventaire des glissements de terrain a été réalisée sur la base des images satellites multi-sources, d'analyse documentaire et d'investigation de terrain. Aditivement à cela, plusieurs cartes thématiques (lithologie, pente, exposition, précipitation, distance aux routes, etc.) ont été dressées afin de lancer la modélisation. La totalité des glissements inventoriés (429) a été subdivisée en deux parties, 80% pour établir l'apprentissage du modèle et 20% pour sa validation par les courbes ROC-AUC. Les résultats de l'AUC des cartes de susceptibilité ont montré une meilleure précision du modèle WoE par rapport à FR avec des valeurs respectives des taux de succès de 0,774 et 0,767 et des valeurs respectives de taux de prédiction de 0,785 et 0,808, ceci implique une meilleure prise de décision sur la base des résultats de la WoE.

Mots-clés - Glissements de terrain - Cartes de susceptibilité - FR - WoE - Mila.

LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING USING FREQUENCY RATIO (FR) AND WEIGHT-OF-EVIDENCE (WOE) METHODS, MILA WILAYA

ABSTRACT

The study of susceptibility to landslides is one of the essential steps in disaster management, and the initiation of planning and land-use activities. To this end, a modeling study of susceptibility to landslides based on bivariate statistical methods, namely, the frequency ratio (FR) and the weight of evidence (WoE), under GIS, has been carried out for the wilaya of Mila. Before starting the modeling work, an inventory map of landslides was made on

¹Agence du Service Géologique de l'Algérie (ASGA), Lot 11 décembre 1960, El Biar, Algérie.

²Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Bab Ezzouar, Algérie.

Auteur correspondant : Serkhane Ahmed. E-mail : ahmedasga1806@gmail.com.

- *Manuscrit déposé sur l'ASJP* le 27 avril 2023, accepté après révision le 19 mars 2024.*

*ASJP : *Algerian Scientific Journal Platform.*

the basis of multi-source satellite images, documentary analysis and field investigation. In addition to that, several thematic maps (lithology, slope, exposure, precipitation, distances to road, etc.) were drawn up to launch the modeling. The totality of the inventoried landslides (429) were subdivided into two parts; 80% for the model training and 20% for its validation using ROC-AUC curves. The results of the AUC of the susceptibility maps showed a better accuracy of the WoE model compared to FR with respective values of success rates of 0.774 and 0.767 and respective values of prediction rates of 0.785 and 0.808. which means better decision-making based on WoE results.

Keywords - Landslides - Susceptibility maps - FR - WoE - Mila.

I- INTRODUCTION

Les glissements de terrain constituent un défi majeur pour le développement socio-économique dans le monde. En Algérie, plusieurs régions sont affectées par le phénomène de glissements de terrain, la wilaya de Mila en est un bon exemple. Ces derniers peuvent être d'origine sismique ou climatique (précipitations) (Machane *et al.*, 2008 ; Bouhadad *et al.*, 2010 ; Bougdal *et al.*, 2013 ; Bourenane *et al.*, 2015 ; Bourenane *et al.*, 2016 ; Djerbal et Melbouci, 2012 ; Benfedda *et al.*, 2021).

Ils sont très répandus sur le territoire de la wilaya de Mila, particulièrement, au niveau des localités nord de la wilaya, provoquant ainsi la destruction d'importants ouvrages et infrastructures ainsi que l'endommagement des constructions, s'ajoutant au manque de visibilité dans les actions d'urbanisme (Guettouche, 2013 ; Labiod, 2009 ; Bounemour *et al.*, 2022).

On se propose dans ce travail de faire une évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain, basée sur deux méthodes statistiques bivariées, à savoir : la méthode du rapport de fréquences (FR) et la méthode du poids de l'évidence (WoE).

II- CADRE GÉNÉRAL

II.1- Cadre géographique

La wilaya de Mila est située au Nord-Est de l'Algérie (fig. 1), près de 300 km de la capitale

Alger, entre les longitudes 5°45'E et 6°30'E et les latitudes 35°52'N et 36°38'N. Elle est limitée au nord par les wilayas de Jijel et Skikda, au sud par la wilaya de Batna, à l'est par les wilayas de Constantine et Oum El Bouaghi et à l'ouest par la wilaya de Sétif. Elle compte 32 communes pour 13 daïras avec une superficie totale d'environ 3480 km².

II.2- Cadre géologique et géomorphologique général

Géologiquement, la région du Constantinois appartient à la chaîne alpine de l'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébides. Cette chaîne s'étend sur environ 1200 km entre l'Espagne méridionale et l'Arc calabro-sicilien (Durand-Delga, 1969). Localement, la lithologie de la région de Mila se présente avec principalement six (06) unités tectono-sédimentaires (Guiraud, 1973 ; Vila, 1980 ; Mebarki, 1982 et 1984 ; Aris, 1994 ; Benaïssa et Bellouche, 1999 ; Bougdal *et al.*, 2006, Hammachi, 2011) :

- a. le domaine des Hautes plaines plio-quaternaires et des horsts calcaires ;
- b. le bassin néogène Constantine-Mila à dominance argileuse ;
- c. le domaine des nappes à marnes et calcaires marneux ;
- d. la Dorsale kabyle, calcaires jurassiques ;
- e. les massifs gréseux numidiens ;
- f. le domaine du socle granitique et cristallophyllien de la Petite Kabylie d'El Milia.

CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX GLISSEMENTS DE TERRAIN PAR LES MÉTHODES DU RAPPORT DE FRÉQUENCES (FR) ET DU POIDS DE L'ÉVIDENCE (WoE) DANS LA WILAYA DE MILA

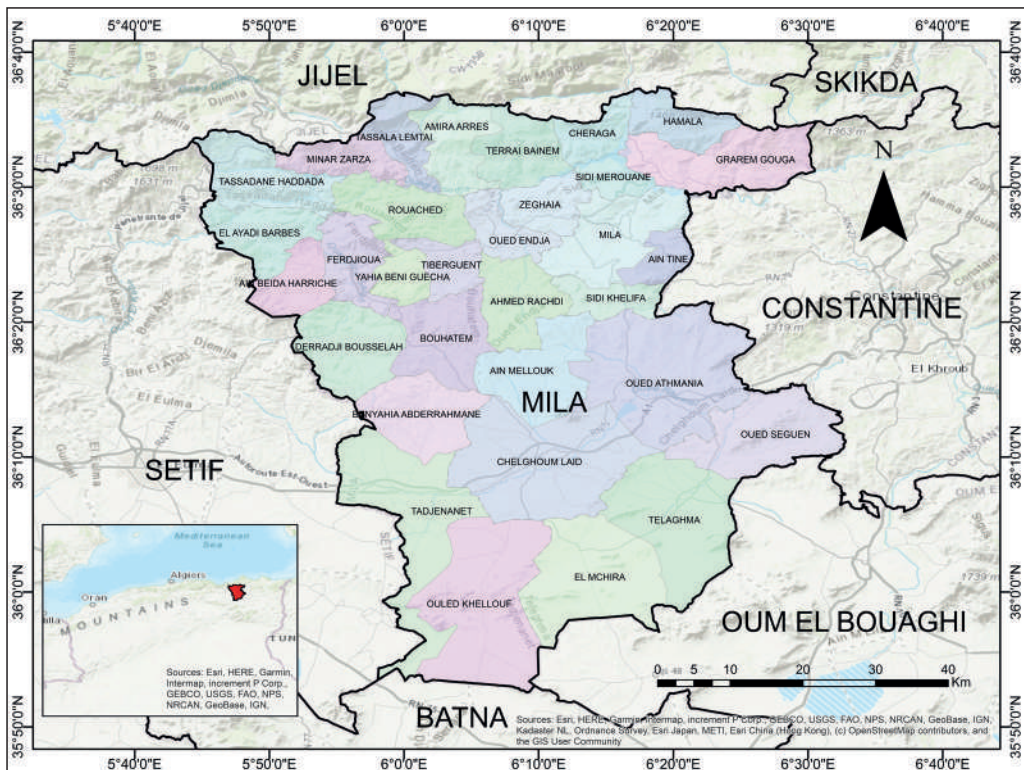


Fig. 1- Situation géographique de la wilaya de Mila.

Geographical setting of the wilaya of Mila.

Le territoire de la wilaya de Mila se situe au sein du bassin néogène de Constantine-Mila, avec un remplissage principalement constitué de dépôts continentaux d'âge mio-pliocène (Benabbas, 2006 ; Labiod, 2009 ; Hammachi, 2011). D'autre part et au sud de ce bassin, émerge le substratum représenté par des massifs calcaires isolés, et un édifice beaucoup plus complexe au nord, constitué de nombreuses séries hétérogènes empilées au cours des phases tectoniques successives (Durand-Delga et Fontboté, 1980 ; Bouillin, 1986 ; Mihoubi et Mebarki, 2017).

Structuralement, la région de Mila fait partie d'un bassin néogène marqué par la tectonique mio-plio-quadernaire (Guiraud, 1973 ; Vila, 1980 ; Meghraoui, 1988). Les failles normales synsédimentaires liées à l'ouverture du bassin sont enregistrées dans les conglomérats de base. Les phases tectoniques successives engendrent

des réseaux de failles E-O et NO-SE dextres, et NE-SO en général senestres (Meghraoui, 1982 et 1988 ; Philip et Meghraoui, 1983 ; Aris *et al.*, 1998). Les travaux de ces derniers ont démontré que le régime de déformation durant le Mio-Plio-Quaternaire est transpressif dextre. Les grandes failles de direction E-O jouent en dextre sous un système en Ridèl, alors qu'à l'intérieur de ce système, les blocs orientés NE-SO jouent en senestre avec une composante inverse. Ceci est notamment mis en évidence dans le bassin néogène de Chlef (Meghraoui, 1982 ; Philip et Meghraoui, 1983).

Sur le plan géomorphologique, la région de Mila appartient globalement à la chaîne tellienne, marquée par une succession de massifs montagneux dans sa partie septentrionale, à l'exemple de Djebel M'Sid Aicha, Djebel Tessala et Djebel Bou Azza, avec des altitudes, respectivement, à 1462 m, 1432 m et 1547 m

(fig.1). Au sud, le relief est dominé par des bas piémonts avec des versants plus ou moins prolongés, dépassant les centaines de mètres à l'exemple de Dj. Chetaba (1316 m), Dj. Grouz (1080 m) et Dj. Maziout (1150 m). Ces piémonts continuent les prolongements des versants nord du plateau de Maracho, avec des pentes généralement fortes, dépassant 25%, particulièrement, dans les environs des zones de Chaabat, du lotissement Boulmerka, de Ben Mahdjoub et de Ben Kara, situés dans la zone d'extension ouest.

De plus, la plus grande superficie de la wilaya de Mila est constituée d'argiles néogènes et de formations conglomératiques (Benabbas 2006 ; Labiod, 2009). Ces dernières sont très sensibles à la présence d'eau avec une plasticité

moyenne à élevée, et constituent donc, des zones susceptibles aux glissements de terrain. Cette susceptibilité est encore plus accentuée par le manque de visibilité dans les actions d'urbanisme (Bounemeur *et al.*, 2022).

III- DONNÉES ET MÉTHODOLOGIE

III.1- Données

Afin de réaliser les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain, une série de données thématiques (cartes thématiques) a été utilisée et présentée ci-dessous :

III.1.1- Carte d'inventaire des glissements

Elle compte un total de 429 glissements de terrain (fig. 2), cette base a été construite en

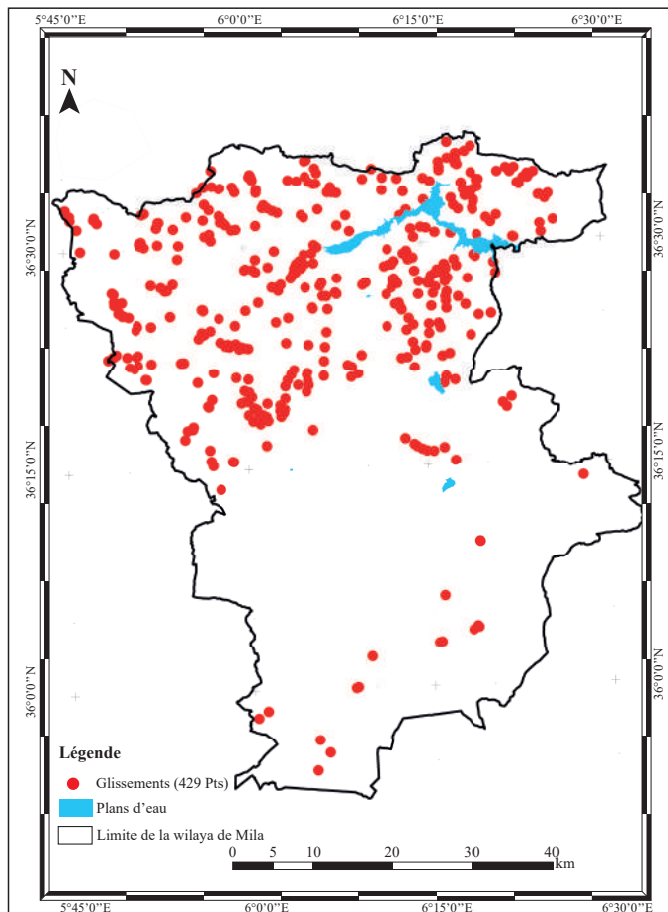


Fig. 2- Carte d'inventaire des glissements de terrain.

Landslides inventory map.

utilisant trois sources principales qui sont : i) les images satellitaires des plateformes ArcGIS Earth, Google Earth et SASPlanet ; ii) les enregistrements historiques, fournis par la documentation qui relate les événements passés (thèses, mémoires, rapports, publications, etc.) ; iii) l'inventaire *in-situ* des glissements de terrain à travers la réalisation de cinq missions de terrain.

III.1.2- Carte lithologique

La lithologie joue un rôle prépondérant dans les études de la susceptibilité aux glissements de terrain, car la réaction ou le comportement des différentes unités lithologiques est différent en fonction des propriétés physico-chimiques du sol. La susceptibilité est par conséquent très

dépendante de la variable lithologie (Carrara *et al.*, 1991 ; Mejia-Navarro et Wohl, 1994 ; Pachauri *et al.*, 1998 ; Dai *et al.*, 2001, Mansouri Daneshvar et Bagherzadeh, 2011, Mansouri Daneshvar, 2014).

La confrontation de la carte lithologique (fig. 3) et de la carte d'inventaire des glissements de terrain de la zone d'étude (fig. 2) révèle que la plupart des glissements de terrain sont situés dans les formations très tendres à tendres du bassin néogène de Mila ainsi que dans la partie nord de la wilaya.

III.1.3- Carte des pentes

L'autre facteur revêtant une grande importance dans les études de la susceptibilité aux glissements

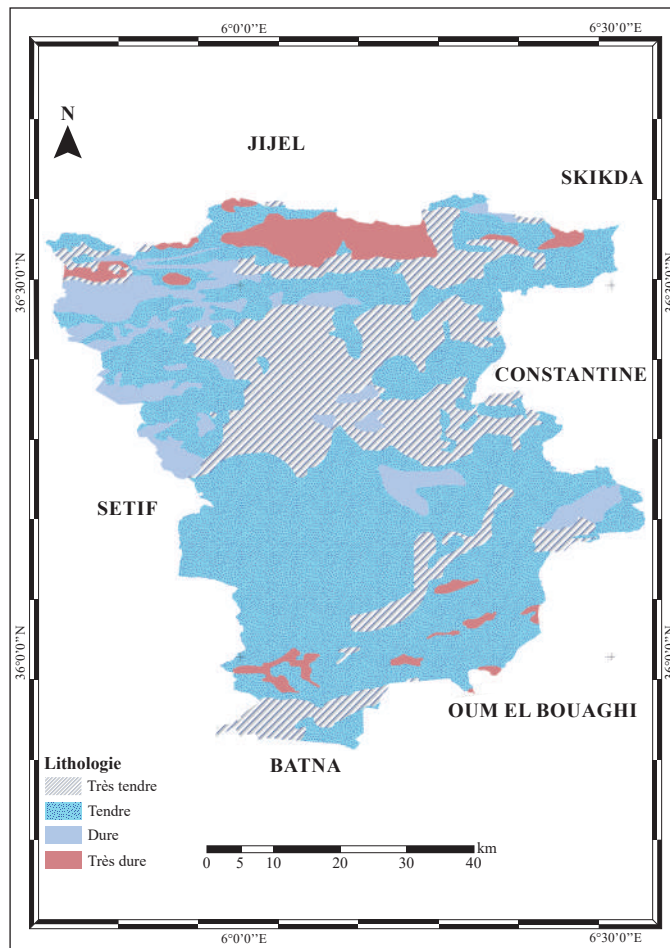


Fig. 3- Carte lithologique de la zone d'étude.
Lithological map of the study area.

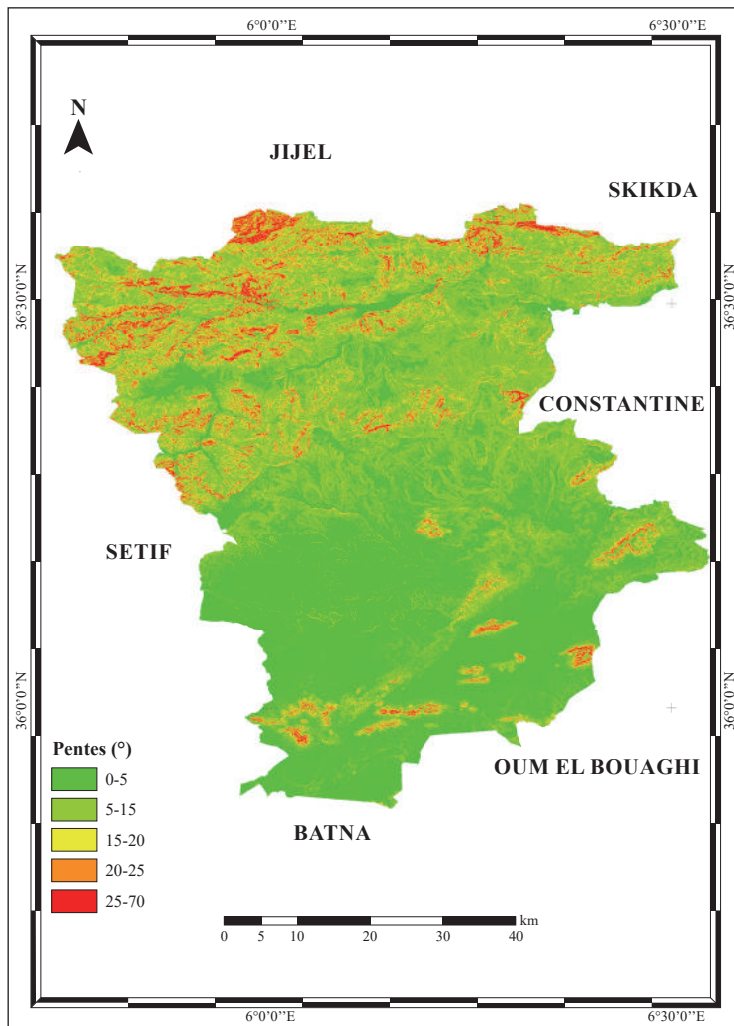


Fig. 4- Carte des pentes issue du MNT SRTM.

Slopes map derived from SRTM DEM.

de terrain est la pente (Clerici *et al.*, 2002). Les glissements de terrain se produisent particulièrement dans les zones à angles de pente élevée (Gökçeoglu et Aksoy, 1996 ; Lee et Min, 2001). Dans cette étude, nous avons subdivisé la carte des pentes en cinq (05) classes (fig. 4), qui mettent en évidence les différences topographiques de la zone d'étude.

III.1.4- Carte d'aspect

L'aspect des versants est également considéré comme un facteur d'importance non négligeable dans les études de susceptibilité aux

glissements de terrain (Carrara *et al.*, 1991 ; Guzetti *et al.*, 1999). Les différents paramètres liés à l'aspect, comme par exemple, l'exposition des versants aux vents et aux précipitations, peuvent contrôler le déclenchement des glissements de terrain (Gökçeoglu et Aksoy, 1996 ; Dai *et al.*, 2001). La carte des aspects de la zone d'étude a été divisée en quatre (04) classes selon l'orientation (fig. 5).

III.1.5- Carte d'occupation du sol

L'occupation du sol est l'un des indicateurs de la stabilité des terrains (fig. 6). Générale-

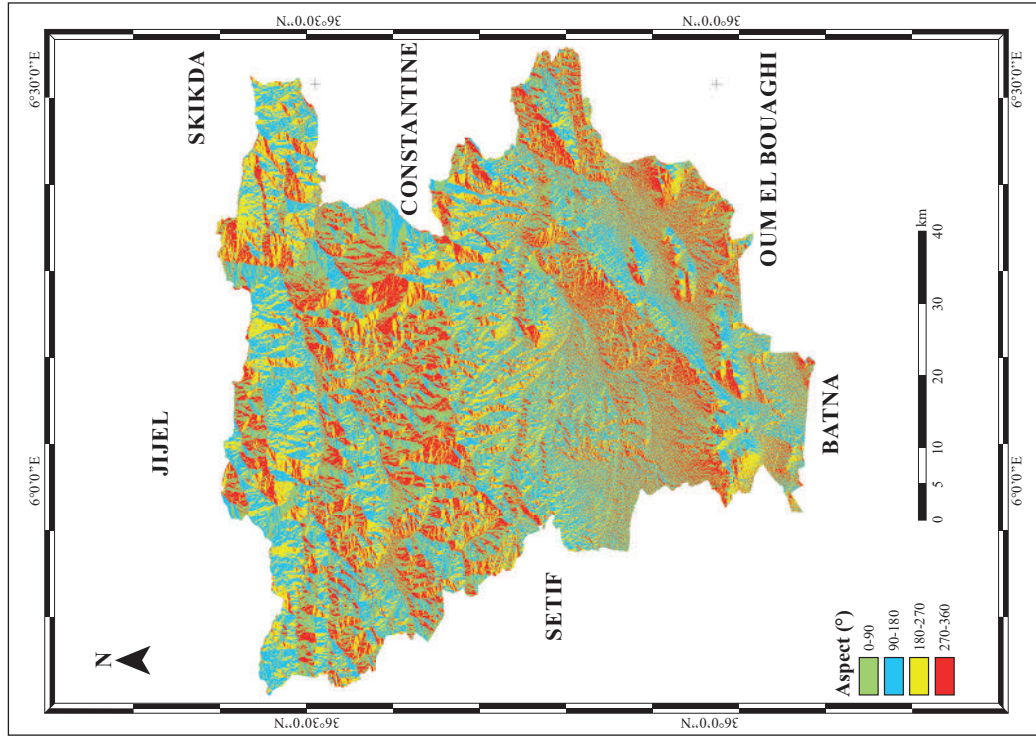


Fig. 5- Carte des aspects.
Aspect map.

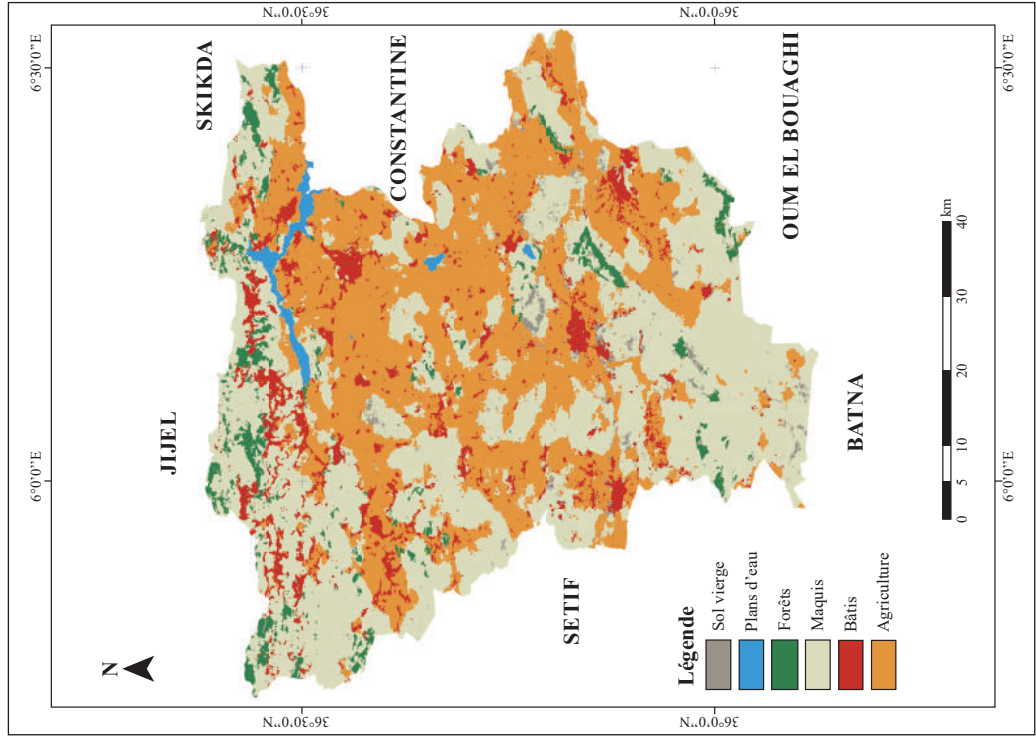


Fig. 6- Carte d'occupation du sol.
LULC map.

ment, la population a tendance à s'installer et à occuper les territoires avec une stabilité plus ou moins confirmée. Les zones non couvertes ou à végétation éparse présentent une érosion plus rapide et une plus grande instabilité que les zones peuplées ou les zones forestières (Turrini et Visintainer, 1998 ; Dai *et al.*, 2001).

III.1.6- Carte pluviométrique

La pluviométrie et les apports en précipitations sont des facteurs hautement influents sur la susceptibilité aux glissements de terrain, en raison du pouvoir d'altération et/ou d'érosion et de transport des eaux de pluies (Finlay *et al.*, 1997 ; Polemio et Petrucci, 2000 ; Huggel *et al.*, 2013). Dans cette étude, nous avons pris en

considération treize (13) classes (fig. 7), dont les valeurs des précipitations varient entre 200 et 1000 mm/an, telles que présentées dans la classification de la carte des pluies moyennes annuelles du Nord de l'Algérie (ANRH, 2005).

III.1.7- Carte de la distance aux cours d'eau

L'un des facteurs de contrôle de l'équilibre et de la stabilité des versants est le degré de saturation des sols. L'érosion des piedmonts et la saturation des sols par les cours d'eau influent négativement sur la stabilité des pentes (Gökçeoglu et Aksoy, 1996 ; Dai *et al.*, 2001). La zone d'étude a été subdivisée en cinq (05) zones tampons (fig. 8) et ce en fonction de la distance au réseau hydrographique.

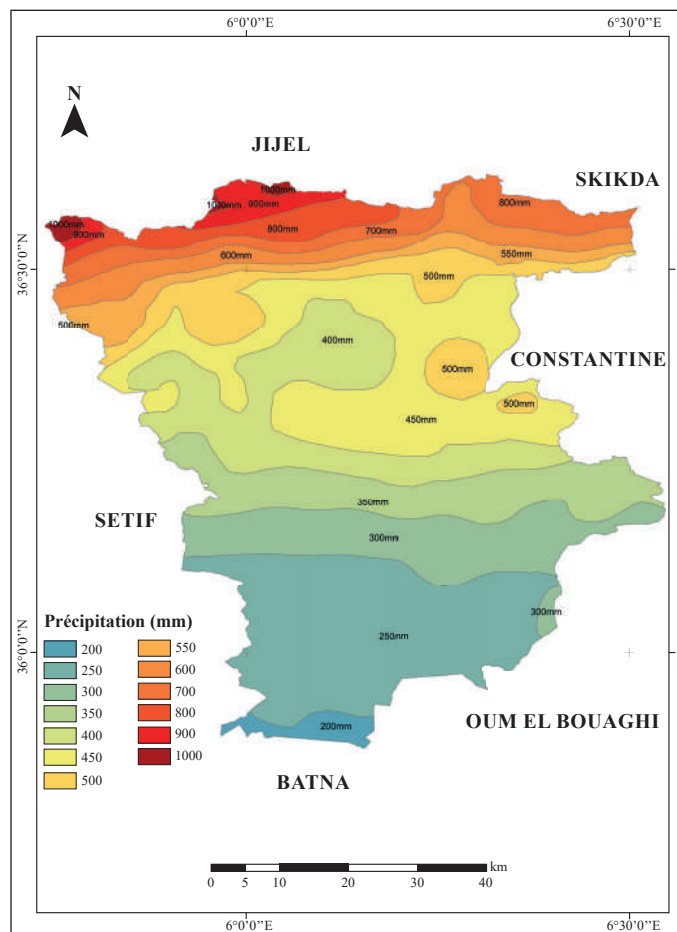


Fig. 7- Carte des précipitations.
Precipitation map.

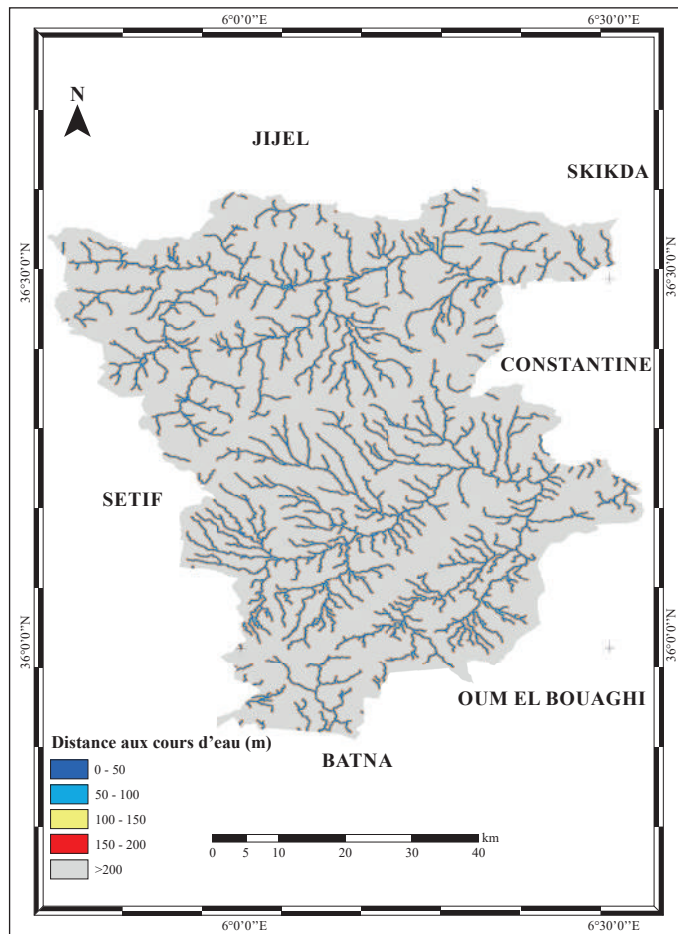


Fig. 8- Carte des distances au réseau hydrographique.
Map of distances to the hydrographic network.

III.1.8- Cartes des distances aux failles

La fracturation est un facteur qui affecte la stabilité des pentes et l'évolution des versants (Varnes, 1984). Ce paramètre est pris en considération dans les études de susceptibilité (Cevik et Topal, 2003), en raison de la relation établie dans une grande majorité des cas, entre la distance aux failles et les glissements de terrain (Gökçeoglu et Aksoy, 1996 ; Pachauri *et al.*, 1998). Dans le cas de la wilaya de Mila et ses environs proches, nous constatons que plus la distance à la faille augmente, plus le nombre de glissements de terrain enregistrés diminue et inversement. Dans cette étude, une

digitalisation exhaustive des failles rapportées dans les cartes géologiques existantes à différentes échelles, a été effectuée. Nous avons retenu cinq (05) zones tampons (fig. 9) pour analyser l'effet des failles sur la distribution des glissements de terrain.

III.1.9- Carte des distances aux routes

La distance aux routes est considérée comme un des facteurs anthropiques de grande importance, avec une influence réelle et démontrée sur le déclenchement des glissements de terrain. En effet, l'ouverture de nouveaux tronçons routiers par l'incision des pentes et l'enlèvement du

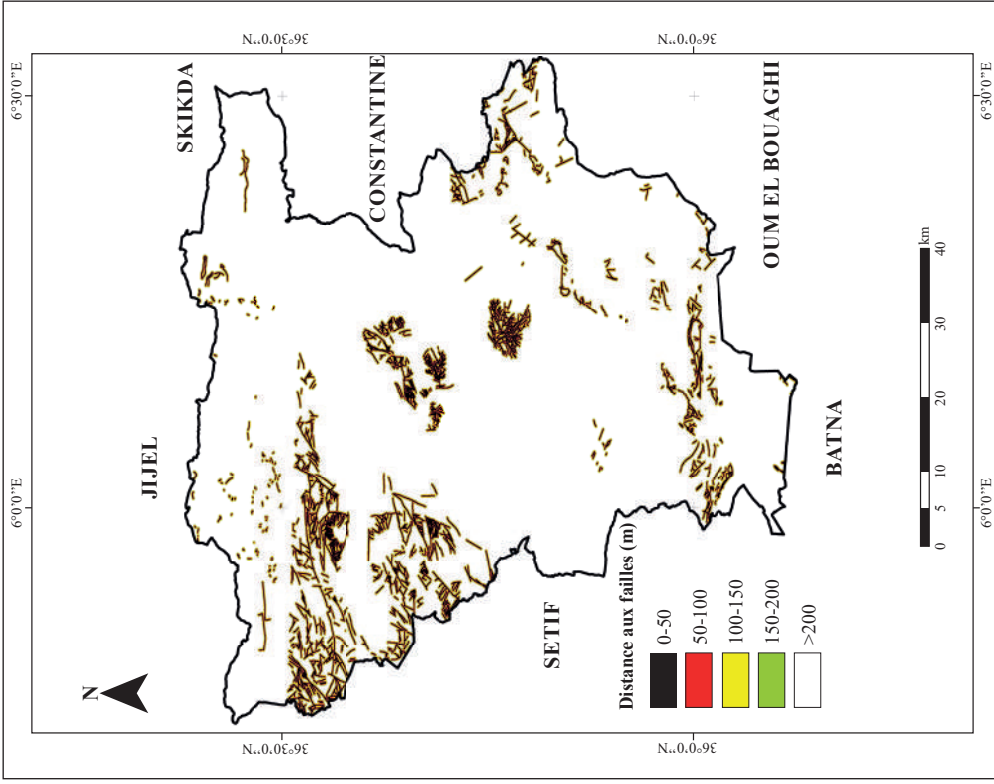


Fig. 9- Carte des distances aux failles.
Map of distances to faults.

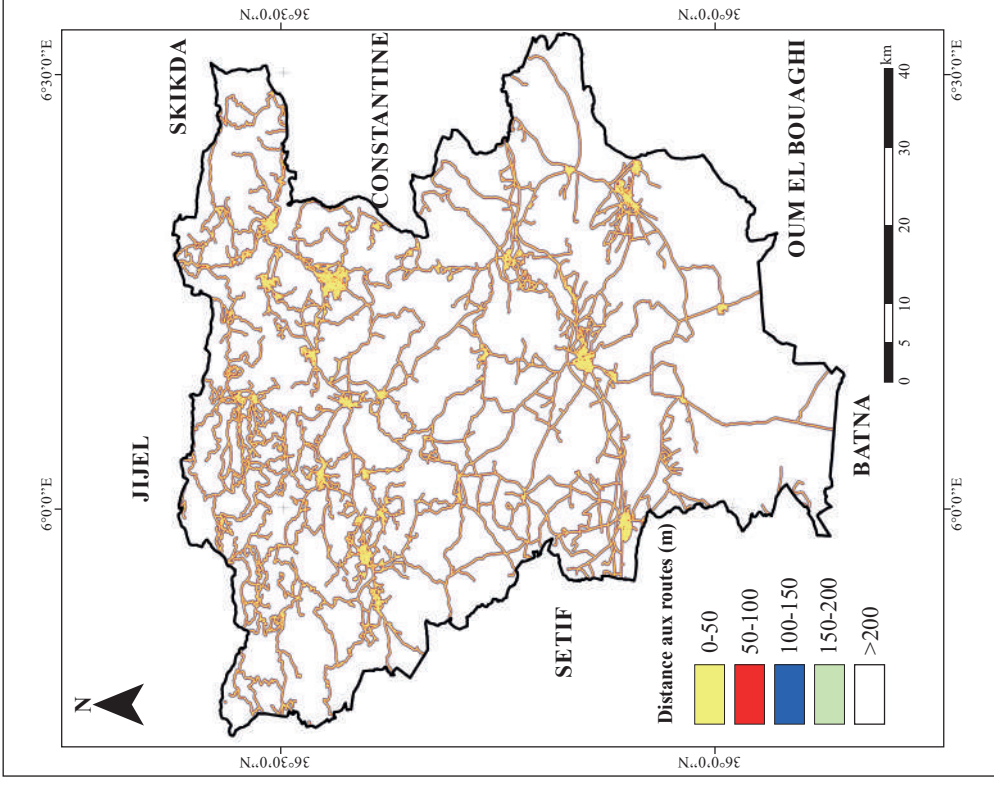


Fig. 10- Carte des distances aux routes.
Map of distances to roads.

pie de ces dernières, ou encore le remplissage des pentes pour élargir et agrandir les routes, réduisent considérablement la cohésion et la résistance des versants, et contribuent aux ruptures de pente (Sidle *et al.*, 2011 ; Seutloali et Beckedahl, 2015 ; Zhao *et al.*, 2018). Dans cette étude, une carte des distances aux routes a été dressée avec cinq (05) intervalles de distance (fig. 10).

III.2- Méthodologie

Il existe plusieurs méthodes pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Dans cette étude, nous vous proposons d'utiliser les méthodes quantitatives bivariées (Guzzetti *et al.*, 1999 ; Bourenane *et al.*, 2015 ; Bourenane *et al.*, 2016 ; Mahdadi *et al.*, 2018 ; Wubalem, 2021). En effet, ces méthodes évitent l'avis subjectif de l'expert et permettent d'obtenir à court terme des cartes fiables et réalistes (Thiery *et al.*, 2005) et s'avèrent particulièrement adaptées aux échelles moyennes (1/100 000 à 1/25 000).

Aussi, les méthodes quantitatives bivariées sont basées sur « la théorie de l'évidence » (Thiery, 2007) qui se résume en trois hypothèses :

- a. les glissements de terrain potentiels se déclencheront selon les mêmes conditions que dans le passé ;
- b. les facteurs de prédisposition sont connus à priori et introduits dans l'analyse ;
- c. l'ensemble des glissements de terrain est inventorié sur l'aire d'étude.

Dans cette étude, deux méthodes statistiques bivariées seront utilisées afin de cartographier les zones susceptibles aux glissements de terrain dans la wilaya de Mila. Ces méthodes sont considérées comme objectives et fournissent des résultats réalistes :

- a. le rapport de fréquences (FR : Frequency Ratio) ;

- b. le poids de l'évidence (WoE: Weight of Evidence).

La démarche consiste à utiliser des méthodes statistiques bivariées intégrées dans un système d'information géographique (SIG) et visant à identifier des relations statistiques entre la distribution spatiale des glissements de terrain (inventaire et investigations de terrain) et les principales variables prédictives représentées sur des cartes thématiques (lithologie, pentes, hydrologie, occupation du sol, etc.)

III.2.1- Rapport de fréquences (FR)

Le modèle FR est proposé par Lee et Min (2001). Il est défini par le rapport entre le pourcentage de glissements de terrain dans une classe donnée d'une couche thématique donnée, par exemple, le pourcentage des glissements de terrain dans la classe des argiles par rapport à la couche lithologie, et le pourcentage de la surface totale de la même couche. Ceci représente donc, le rapport de la probabilité d'occurrence d'un glissement de terrain et le facteur de conditionnement (Ehret *et al.*, 2010), exprimé par l'équation :

$$FR = \frac{NLC_{pix}/TNL_{pix}}{NC_{pix}/TN_{pix}}$$

Où :

NLC_{pix} : le nombre de pixels des glissements de terrain dans une classe « i » d'un facteur de prédisposition donné ;

TNL_{pix} : le nombre total de pixels des glissements de terrain dans la zone d'étude ;

NC_{pix} : le nombre de pixels de la classe « i » ;

TN_{pix} : le nombre total de pixels de la zone d'étude.

Par conséquent, l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain (LSI) est estimé par la sommation des rapports de fréquence (eq.1) dans la totalité des classes des variables prédictives et en utilisant la formule suivante (Lee et Talib, 2005 ; Lee et Pradhan, 2007 ; Pradhan, 2010) :

$$LSI = FR_1 + FR_2 + FR_3 + FR_4 + \dots + FR_n$$

$$LSI = \sum_{i=1}^n FR_i \dots \dots \dots (eq.1)$$

Où :

FR : le rapport de fréquences de chaque facteur ;

LSI : l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain ;

i : représente les facteurs de prédiction.

III.2.2- Poids de l'évidence (WoE)

Il s'agit d'une méthode statistique non linéaire basée sur la forme logarithmique-linéaire du modèle de probabilité bayésien. Cette technique a été initialement mise en place pour l'évaluation du potentiel minier (Bonham-Carter *et al.*, 1989). Par la suite, une première application à la susceptibilité aux glissements de terrain avec WoE a été rapportée par plusieurs auteurs dont (Agterberg et Cheng, 2002 ; Van Westen *et al.*, 2003 ; Roering, 2012 ; Polykretis et Chalkias, 2018 ; Getachew et Meten, 2021). Cette méthode a pour principe le traitement de la prédictivité d'une valeur indépendante par rapport à une variable dépendante. L'objectif de cette approche est de faire le tri entre les variables par rapport à leurs influences, de ce fait, une variable pertinente est une variable qui intervient considérablement dans la définition du résultat final. Au contraire, une variable non pertinente est une variable dont l'influence est négligeable dans la prédiction du résultat final.

La WoE s'exprime par le calcul des poids positifs et négatifs (W_i^+ et W_i^-), afin de connaître la corrélation spatiale en présence ou en l'absence d'un facteur donné. La formulation de la méthode est comme suite (Bonham-Carter *et al.*, 1989) :

$$W^+ = \ln \frac{\frac{NLC_{pix}}{NLC_{pix} + (TNL_{pix} - NLC_{pix})}}{\frac{NC_{pix} - NLC_{pix}}{(NC_{pix} - NLC_{pix}) + (TNL_{pix} - TNL_{pix} - NC_{pix} + NLC_{pix})}}$$

$$W^- = \ln \frac{\frac{(TNL_{pix} - NLC_{pix})}{NLC_{pix} + (TNL_{pix} - NLC_{pix})}}{\frac{(TNL_{pix} - TNL_{pix} - NC_{pix} + NLC_{pix})}{(NC_{pix} - NLC_{pix}) + (TNL_{pix} - TNL_{pix} - NC_{pix} + NLC_{pix})}}$$

Avec :

NLC_{pix} : le nombre de pixels des glissements de terrain dans une classe donnée ;

NC_{pix} : le nombre de pixels de la classe donnée ;

TNL_{pix} : le nombre total de pixels des glissements de terrain dans la zone d'étude ;

TN_{pix} : le nombre total de pixels de la zone d'étude.

De ce fait, il est procédé au calcul du poids de contraste de chaque classe, qui est la différence entre les poids positifs et négatifs :

$$C = W^+ - W^-$$

La valeur de contraste positive indique des associations spatiales positives et inversement.

La formulation finale de la susceptibilité aux glissements de terrain est donnée par (eq.2) :

$$LSI_{WoE} = \sum C_i \dots \dots \dots (eq.2)$$

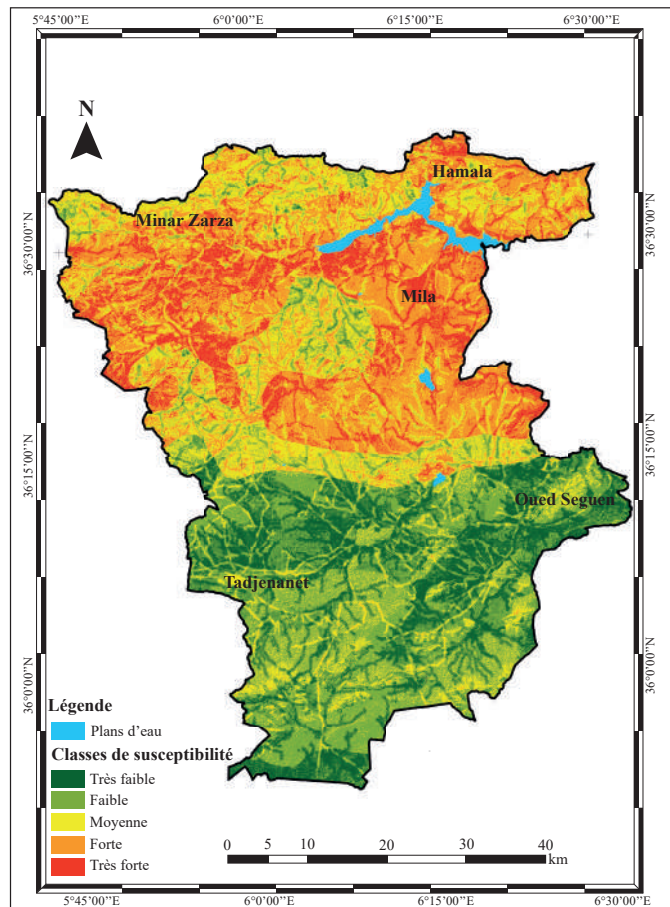


Fig. 11- Carte de susceptibilité aux glissements de terrain par la méthode du rapport de fréquences (FR).
Landslide susceptibility map using the frequency ratio method (FR).

IV- RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1- Résultats

IV.1.1- Cartographie de la susceptibilité par la méthode FR

Les résultats obtenus par la méthode FR (fig. 11) indiquent que les pourcentages des glissements de terrain dans les classes de très faible et de faible susceptibilité ne représentent que 0,2% et 1,8%, respectivement. Concernant la classe modérée ou moyenne, le pourcentage des glissements de terrain est de 9,6%. Cependant, pour les classes de forte et très forte susceptibilité, les pourcentages de glissements de terrain sont respectivement de 46,7% et 41,6%.

Par ailleurs, un examen de la carte de susceptibilité (fig. 11) met en évidence que la très grande majorité des zones à haute susceptibilité aux glissements de terrain se situent dans la moitié nord de la wilaya de Mila principalement au niveau des communes suivantes : Hamala, Grarem Gouga, Mila, Ain Tinn, Sidi Khelifa, Sidi Merouane, Tassala Lemtai, Chigara, Rouached, Ferdjioua, El Ayadi Barbes, Ain Beida Harriche, Minar Zarza et Yahia Beni Guecha. Selon les résultats de la méthode FR, l'ensemble de ces communes est touché d'une manière quasi-globale.

Les communes d'Oued Athmania, Oued Endja, Ain Mellouk, Derrardji Bouselah, Tasadane Haddada, Tiberquent, Terrai Bainem,

Amira Arres, Zeghaia et Ahmed Rachedi, sont quant à elles partiellement impactées par une forte ou très forte susceptibilité.

IV.1.2- Cartographie de la susceptibilité par la méthode WoE

Les résultats de la méthode WoE (fig. 12) dévoilent que les pourcentages des glissements de terrain dans les classes de très faible et de faible susceptibilité ne représentent que 0,1% et 0,7%, respectivement. Concernant la classe modérée ou moyenne, le pourcentage des glissements de terrain est de 5,3%, alors que pour les classes de forte et très forte susceptibilité, les pourcentages de glissements de terrain sont, respectivement, de 24,7% et

69,1%, soit un total cumulé pour ces classes de l'ordre de 93,8%.

La carte de susceptibilité par la méthode WoE (fig. 12) nous renseigne sur les communes à susceptibilité élevée aux glissements de terrain, comme c'est le cas pour certaines communes à l'exemple de Mila, Ain Tinn, Zeghaia, Sidi Merouane, Ferdjioua, etc., avec un très grand pourcentage de susceptibilité aux glissements de terrain.

IV.2- Discussion

Afin de valider les résultats obtenus concernant la susceptibilité aux glissements de terrain dans la wilaya de Mila, nous avons procédé

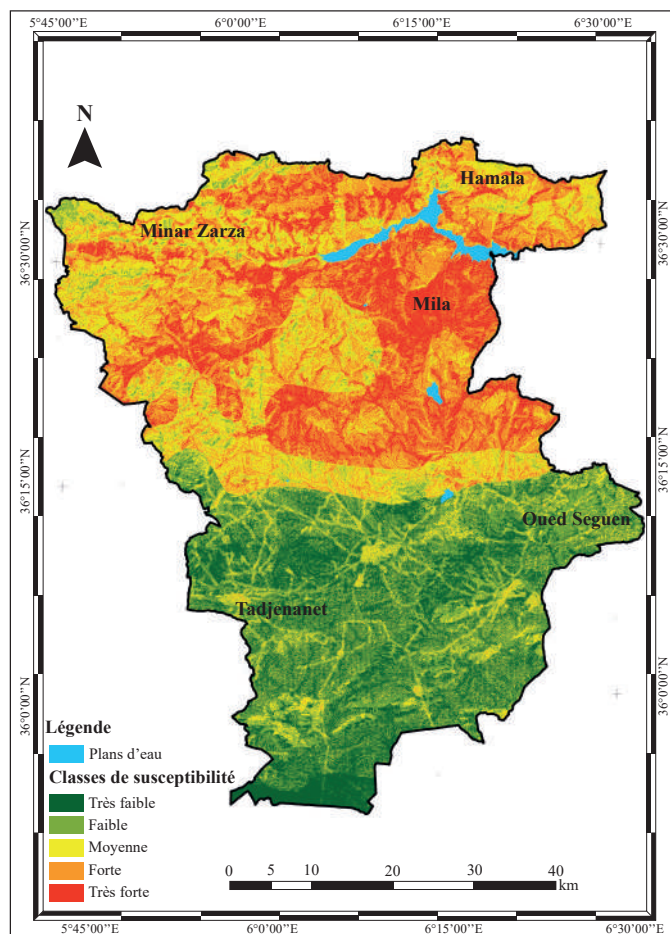


Fig. 12- Carte de susceptibilité aux glissements de terrain par la méthode du poids de l'évidence (WoE).
Landslide susceptibility map using the weight of evidence method (WoE).

à la génération des courbes ROC-AUC (Pimiento, 2010 ; Silalahi *et al.*, 2019). D'abord, les courbes du taux de succès, avec ~80% du nombre total (429) des glissements de terrain inventoriés, soit 351 glissements, représentant un total de 50226 pixels (~45,2 km²), ensuite les courbes du taux de prédiction, avec ~20% du nombre total (429) des glissements de terrain inventoriés, soit 78 glissements, représentant 11700 pixels (~10,5 km²), les résultats obtenus sont représentés ci-dessous (fig. 12).

Il est clair que l'analyse des courbes de validation (figs. 13 et 14), ainsi que les pourcentages des glissements de terrain par classe de susceptibilité et par méthode de traitement statistique (tabl. I) nous indiquent que les résultats du taux de succès et celui de prédiction sont compris, pour les deux méthodes utilisées, entre 0,78 et 0,8, ce qui indique d'après la qualité des modèles prédictifs et en fonction de la valeur AUC des résultats « bons » à « très bons ».

Dans le détail, et concernant les courbes du taux de succès (fig. 13), nous notons que la meilleure méthode en termes de qualité du modèle prédictif est WoE (poids de l'évidence) qui donne une valeur AUC = 0,774, puis la méthode FR avec une valeur AUC = 0,767.

La courbe du taux de prédiction quant à elle (fig. 14) donne aussi la même suite de résultats. Ainsi, la méthode WoE est considérée comme méthode optimale avec un AUC = 0,808, catégorie « très bon », puis la méthode FR avec AUC = 0,785.

V- CONCLUSION

Actuellement, il est très important de procéder à la planification et à la gestion des risques géologiques, plus particulièrement ceux liés aux glissements de terrain ; c'est le moyen le plus optimal et le plus efficace pour anticiper les événements et réduire le nombre de victimes humaines ainsi que les pertes matérielles résultant de ces glissements de terrain.

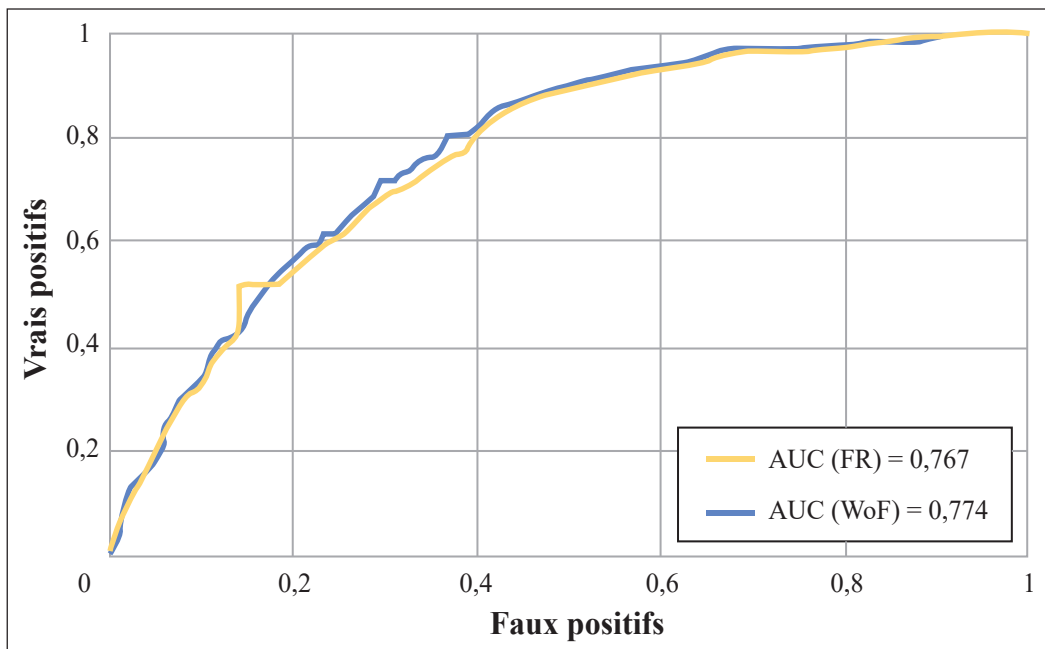


Fig. 13- Courbe du taux de succès ROC-AUC des méthodes FR et WoE.
ROC-AUC success rate curve for FR and WoE methods.

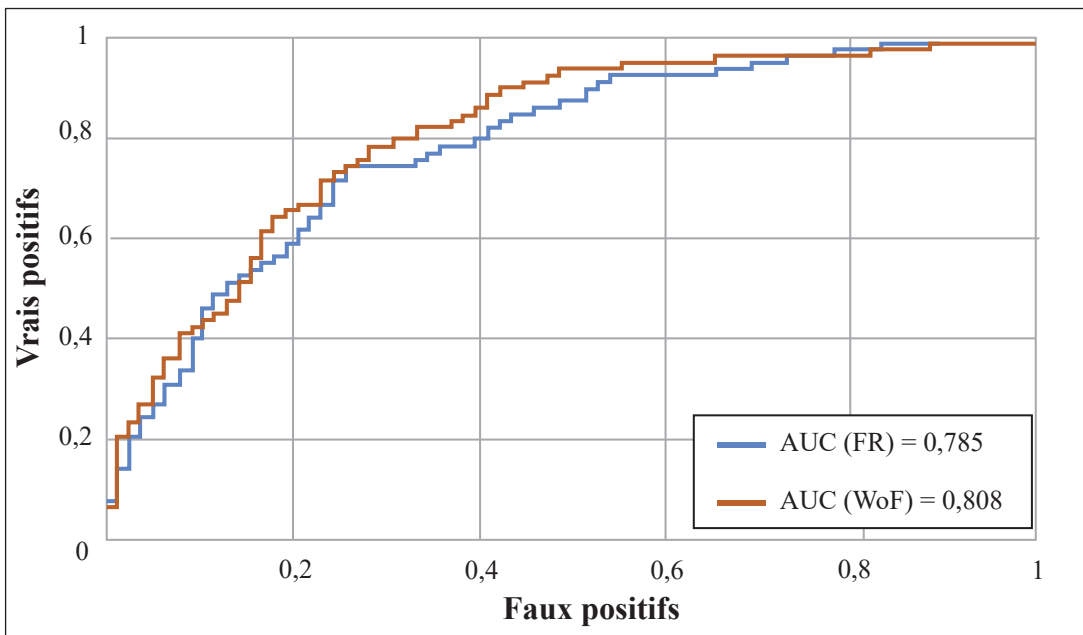


Fig. 14- Courbe du taux de prédiction ROC-AUC des méthodes FR et WoE.
ROC-AUC prediction rate curve for FR and WoE methods.

Tabl. I- Pourcentage de la classe de susceptibilité par rapport à la superficie totale selon les différentes méthodes de traitement et par classe de susceptibilité.

Percentage of susceptibility class to total area according to different processing methods and susceptibility classes.

| Pourcentage des glissements de terrain par méthode et par classe | FR (%) | WoE (%) |
|--|--------|---------|
| Très faible | 12,9 | 15,8 |
| Faible | 25,7 | 21,8 |
| Modérée | 23,3 | 21,6 |
| Forte | 26,2 | 25 |
| Très forte | 11,9 | 15,7 |

La wilaya de Mila a toujours été d'actualité en termes de dommages générés par les glissements de terrain (fig. 15). Le dernier séisme en date du 07 août 2020, de magnitude faible ($M_w = 4,9$) (Benfedda *et al.*, 2021), a engendré des glissements de terrain catastrophiques dont les conséquences financières sont immenses (fig. 15).

Dans ce travail, nous avons comparé et évalué deux (02) méthodes statistiques bivariées (FR et WoE) pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la wilaya de Mila. Pour chacune de ces méthodes, une carte avec cinq (05) classes de susceptibilité a été produite, soit : faible, très faible, modérée, forte et très forte, qui couvrent respectivement

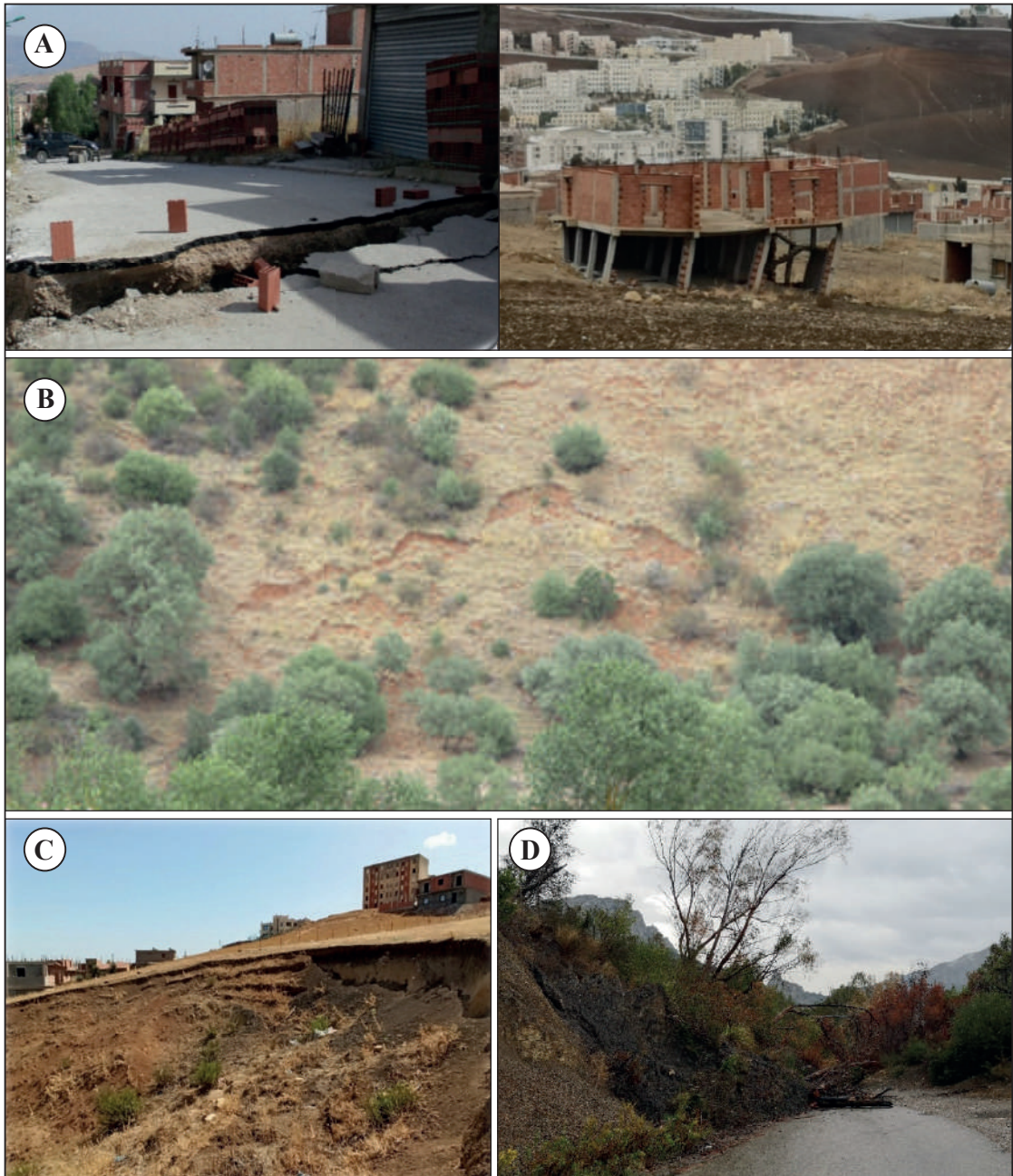


Fig. 15 - Exemples illustrant des glissements de terrain ayant affectés certaines localités de la wilaya de Mila. **A** : El Kharba (commune de Mila) ; **B** : Grarem Gouga ; notons que ces glissements et dommages (A et B) ont été induits par le séisme du 07/08/2020 ; **C** : Bou Hatem ; **D** : Hemala (Hemmam Béni Haroune).

Examples illustrating landslides that affected certain localities in the wilaya of Mila. A: El Kharba (Mila commune); B: Grarem Gouraya; note that landslides and damages (A and B) were induced by the earthquake of 07/08/2020; C: Bou Hatem; D: Hemala (Hammam Beni Haroune).

(tabl. I), 12,9% ; 25,7% ; 23,3% : 26,2% et 11,9% du territoire de la wilaya (méthode FR), et 15,8% ; 21,8% ; 21,6% ; 25% ; 15,7% du territoire de la wilaya (méthode WoE).

Les communes où la susceptibilité est forte à très forte selon la méthode FR sont : Hamala, Grarem Gouga, Mila, Ain Tinn, Sidi Khelifa, Sidi Merouane, Tassala Lemtai, Tassadane Haddada, Chigara, Rouached, Ferdjioua, El Ayadi Barbes, Ain Beida Harriche, Minar-Zarza, Yahia Beni Guecha, le nord de Oued Athmania, Ain Mellouk et Oued Endja, Bouhatem le sud d'Ahmed Rachedi.

Les communes où la susceptibilité est forte à très forte selon la méthode WoE sont : Hamala, Tassala Lemtai, Chigara, Amira Arres, Terrai Bainem, Grarem Gouga, Tassadane Haddada, Minar Zarza, Sidi Merouane, Zeghaia, Rouached, Mila, Oued Endja, El Ayadi Barbes, Ferdjioua, Ain Tinn, Ain Beidha Harriche, Tiberquiuent, Yahia Beni Guecha, Ahmed Rachedi, Sidi Khelifa, Bouhatem, Derradji Bousseleh, le nord d'Oued Athmania et Ain Mellouk.

Enfin, il est important de signaler que les méthodes d'évaluation de la susceptibilité aux risques naturels et aux glissements de terrain, plus particulièrement, présentent certains inconvénients et limites. Tout d'abord, ces méthodes peuvent être sensibles à la disponibilité des données, quantité, et à leur qualité. De plus, certaines données peuvent être sujettes à l'interprétation subjective de l'évaluateur, ce qui peut entraîner une certaine variabilité dans les résultats. Il est donc essentiel de considérer ces limitations et d'intégrer d'autres sources d'informations et d'expertise pour une évaluation plus complète et précise de la susceptibilité. Aussi, nous attirons l'attention sur le fait que la production des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain avec une haute précision et des résultats quasi réels à une échelle régionale, cas de la wilaya de Mila, reste un défi, en raison, principalement, de la nature complexe des glissements

de terrain et de la quantité et la qualité des données disponibles.

Remerciements

Les auteurs de ce papier remercient Mme. TAFER-BAKIR Karima, Ex. Présidente du Comité de Direction de l'ASGA, ainsi que M. RABAH Yazid, Directeur de la Division Cartographie, pour avoir mis à leur disposition les moyens nécessaires afin de mener à bien ce travail, qui est une partie du projet intitulé: « *Inventaire et cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dans la wilaya de Mila* » lancé par l'ASGA en 2021. Nous remercions et exprimons notre gratitude aux reviewers de ce papier pour leurs orientations et corrections.

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRIQUES (ANRH). 2005.** Carte des pluies moyennes annuelles du Nord de l'Algérie.
- AGTERBERG, F.-P. AND CHENG, Q. 2002.** Conditional independence test for weights-of-evidence modeling. *Natural resources research*, 11 (4), pp. 249-255.
- ARIS, Y. 1994.** Etude tectonique et micro-tectonique des séries jurassiques à plio-quaternaires du Constantinois central (Algérie Nord Orientale) : caractérisation des différentes phases de déformations. *Thèse de Doctorat, Université de Nancy I*, 215 p.
- ARIS, Y., COIFFAIT, P. -E., AND GUIRAUD, M. 1998.** Characterisation of Mesozoic–Cenozoic deformations and palaeostress fields in the Central Constantinois, northeast Algeria. *Tectonophysics*, 290 (1-2), 59-85.
- BENABBAS, C. 2006.** Évolution mio-plio-quaternaire des bassins continentaux de l'Algérie Nord Orientale : apport de la photogéologie et d'analyse morphostructurale. *Thèse de Doctorat d'état, Université de Constantine*, 245 p.

- BENAÏSSA, A. AND BELLOUCHE, M.-A. 1999.** Geotechnical properties of some landslide-prone geological formations in the urban area of Constantine (Algeria). *Bull Eng Geol Env*, 57, pp. 301-310.
- BENFEDDA, A., SERKHANE, A., BOUHADAD, Y., SLIMANI, A., ABOUDA, M. AND BOURENANE, H. 2021.** The main events of the July-August 2020 Mila (NE Algeria) seismic sequence and the triggered landslides. *Arabian Journal of Geosciences*, 14 : 1894 <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08301-x>.
- BONHAM-CARTER, G., AGTERBERG, F. AND WRIGHT, D. 1989.** Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. *Stat. Appl. in Earth Sci* 89-9:171-18.
- BOUGDAL, R., BELHAI, D. ET ANTOINE, P. 2006.** Géologie de la ville de Constantine et de ses environs. *Bull. Serv. Géol. Algérie*, vol. 18, pp. 3-23.
- BOUGDAL, R., LARRIERE, A., PINCENT, B., PANET, M. ET BENTABET, A. 2013.** Les glissements de terrain du quartier Bélouizdad, Constantine. *Algérie Bull. Eng. Geol. Env*. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0465-8>.
- BOUHADAD, Y., BENHAMMOUCHE, A., BOURENANE, H., AIT OUALI, A., CHICK, M. AND GUESSOUM, N. 2010.** The Laalam (Algeria) damaging landslide triggered by a moderate earthquake (Mw=5,2). *Journal of Natural hazards*, 54, pp. 261-272.
- BOUILLIN, J.-P. 1986.** Le bassin maghrébin, une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. Fr. t. II (8) n°4*. pp. 547-558.
- BOUNEMEUR, N., BENZAÏD, R., KHERROUBA, H. AND SOUAD-ATOUB, S. 2022.** Landslides in Mila to northeast Algeria : causes and consequences. *Arabian Journal of Geosciences*, DOI:10.1007/s12517-022-09959-7.
- BOURENANE, H., BOUHADAD, Y., GUETTOUCHE, M.-S. AND BRAHAM, M. 2015.** GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bull Eng Geol Environ*, 74 (2), pp. 337-355.
- BOURENANE, H., GUETTOUCHE, M.-S., BOUHADAD, Y. AND BRAHAM, M. 2016.** Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weighting factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. *Arab J. Geosci.* 9 (2) :154.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., DETTI, R., GUZZETTI, F., PASQUI, V. AND REICHENBACH, P. 1991.** GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. *Earth Surf Proc Landforms* 16:427-445 catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8 (1). doi:10.1186/s40677-020-00170-y.
- CEVIK, E. AND TOPAL, T. 2003.** GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). *Environmental Geology*, 44, pp. 949-962.
- CLERICI, A., PEREGO, S., TELLINI, C. AND VESCOVI, P. 2002.** A procedure for landslide susceptibility zonation by the conditional analysis method. *Geomorphology*, 48 (4), pp. 349-364. doi:10.1016/s0169-555x(02)00079-x.
- DAI, F.-C., LEE, C.-F., LI, J. AND XU, Z.-W. 2001.** Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ. Geol.* 40: pp.381-391.

- DJERBAL, L. ET MELBOUCI, B. 2012.** Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algérie) : causes et évolution. *Bull. Eng. Geol. Environ.* 71 (3): pp. 587-597.
- DURAND-DELGA, M. 1969.** Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie.* 39, pp. 89-131.
- DURAND-DELGA, M. ET FONTBOTE, J.-M. 1980.** Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. *Rech. Géol. Minières*, t.2, n°115, pp. 67-85.
- EHRET, D., ROHN, J., DUMPERTH, C., ECKSTEIN, S., ERNSTBERGER, S., OTTE, K., RUDOLPH, R. AND WIEDENMANN, J. 2010.** Frequency ratio analysis of mass movements in the Xiangxi Catchment, Three Gorges Reservoir Area, China. *J. Earth. Sci.* 21, pp. 824-834
- FINLAY, P.-J., FELL, R., AND MAGUIRE, P. K. 1997.** The relationship between the probability of landslide occurrence and rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*, 34(6), pp. 811-824. doi:10.1139/t97-047.
- GETACHEW, N. AND METEN, M. 2021.** Weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping of Kabi-Gebro locality, Gundomeskel area, Central Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(1). doi:10.1186/s40677-021-00177-z .
- GÔKÇEOĞLU, C. AND AKSOY, H. 1996.** Landslide susceptibility mapping of the slopes in the residual soils of the Mengen region (Turkey) by deterministic stability analyses and image processing techniques. *Eng. Geol.* 44, pp. 147-161.
- GUETTOUCHE, M.-S. 2013.** Modeling and risk assessment of landslides using fuzzy logic. Application on the slopes of the Algerian Tell (Algeria). *Arabian Journal of Geosciences*, 6(9), pp. 3163-3173. doi:10.1007/s12517-012-0607-5.
- GUZZETTI, F., CARRARA, A., CARDINALI, M. AND REICHENBA, C.-P. 1999.** Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, vol. 31, n°1, p. 181-216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.
- HAMMACHI, R. 2011.** Évolution sédimentaire et paléogéographique des formations néogènes du Constantinois centrale (Algérie Nord oriental). *Mémoire de Magistère, Université de Tébessa*, 150 p.
- HUGGEL, C., GRUBER, S. AND KORUP, O. 2013.** Landslide Hazards and Climate Change in High Mountains. *Treatise on Geomorphology*, pp. 288-301. doi:10.1016/b978-0-12-374739-6.00367-5.
- LABIOD, F. 2009.** Mouvement de masses et instabilité des terrains dans le bassin versant de l'oued Mila. Caractérisations et enjeux socio-économiques. *Thèse de Magistère, USTHB, Alger*, 186 p.
- LEE, S. AND MIN, K. 2001.** Statistical Analysis of Landslide Susceptibility at Yongin, Korea. *Environmental Geology*, 40, pp. 1095-1113.
- LEE, S. AND TALIB, J.-A. 2005.** Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis. *Environmental Geology*, 47(7), pp. 982-990.
- LEE, S. AND PRADHAN, B. 2007.** Landslide Hazard Mapping at Selangor, Malaysia Using Frequency Ratio and Logistic Regression Models. *Landslides*, 4, pp. 33-41. https://doi.org/10.1007/s10346-006-0047-y.
- MACHANE, D., BOUHADAD, Y., CHEIKHLOUNIS, G., CHATELAIN, J.-L., OUBAICHE, E.-H., ABBES, K., GUILLIER, B. AND BEN-**

- SALEM, R. 2008.** Examples of geological and geomorphological hazards in Algeria. *Journal Natural Hazards*, 45, (2), pp. 295-308.
- MAHDADI, F., BOUMEZBEUR, A., HADJI, R., KANUNGO, D.-P. AND ZAHRI, F. 2018.** GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, N-E Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17). doi:10.1007/s12517-018-3770-5.
- MANSOURI DANESHVAR, M.-D. 2014.** Landslide susceptibility zonation using analytical hierarchy process and GIS for the Bojnurd region, northeast of Iran. *Landslides*, vol. 11, n° 6, pp. 1079-1091.
- MANSOURI DANESHVAR, M. -D. AND BAGHERZADEH, A. 2011.** Landslide hazard zonation assessment using GIS analysis at Golmakan Watershed, northeast of Iran. *Frontiers of Earth Science*, 5, pp. 70-81.
- MEBARKI, A. 1982.** Le bassin de Kébir-Rhumel - hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau. *Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle*, Université Nancy II, France, 304 p.
- MEBARKI, A. 1984.** Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kébir Rhumel. Edit *Office des Publications Universitaires*. n°8, Algérie.
- MEGHRAOUI, M. 1982.** Etude néotectonique de la région NE d'El Asnam et relation avec le séisme du 10/10/1980. *Thèse de 3^{ème} cycle*, Univ. Paris, 210 p.
- MEGHRAOUI, M. 1988.** Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie. Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. *Thèse doct. Univ. Paris VI*, 356 p.
- MEJIA-NAVARRO, M. AND WOHL, E.-E. 1994.** Geological hazard and risk evaluation using GIS: methodology and model applied to Medellin, Columbia. *Bull. Assoc. Eng. Geol.* 31, pp. 459-481.
- MIHOUBI, N. ET MEBARKI, A. 2017.** Bassin du Haut-Rhumel : contexte hydrogéologique et fuites d'eau du barrage de Hammam Grouz. *Sciences & Technologie n°45*, pp. 131-140.
- PACHAURI, A.-K., GUPTA, P.-V. AND CHANDER, R. 1998.** Landslide zoning in a part of the Garhwal Himalayas. *Environ. Geol.* 36, pp. 325-334.
- PHILIP, H. AND MEGHRAOUI, M. 1983.** Structural analysis and interpretation of the surface deformation of the El-Asnam earthquake of October 1980. *Tectonics*, 2, pp. 17-49.
- PIMIENTO, E. 2010.** Shallow landslide susceptibility : modelling and validation. Department of Physical Geography and Ecosystem Science. *Lund University*, pp. 25-29.
- POLEMIO, M. AND PETRUCCI, O. 2000.** Rainfall as a landslide triggering factor an overview of recent international research. *Landslides in research, theory, and practice*, pp. 1219-1226.
- POLYKRETIS, C. AND CHALKIAS, C. 2018.** Comparison and evaluation of landslide susceptibility maps obtained from weight of evidence, logistic regression, and artificial neural network models. *Natural Hazards*, 93(1), pp. 249-274. doi:10.1007/s11069-018-3299-7.
- PRADHAN, B. 2010.** Landslide susceptibility mapping of a catchment area using frequency ratio, fuzzy logic and multivariate logistic regression approaches. *Journal Indian Society Remote Sensing*, Vol. 38, pp. 301-320.

- ROERING, J. 2012.** Landslides limit mountain relief. *Nature Geoscience*, vol. 5, n° 7, pp. 446-447.
- SEUTLOALI, K.-E. AND BECKEDAHL, H.-R. 2015.** A review of road-related soil erosion: an assessment of causes, evaluation techniques and available control measures. *Earth Sciences Research Journal*, vol. 19, n° 1, pp. 73-80.
- SIDLE, R.-C., FURUICHI, TAKAHISA, AND KONO, Y. 2011.** Unprecedented rates of landslide and surface erosion along a newly constructed road in Yunnan, China. *Natural Hazards*, vol. 57, pp. 313-326.
- SILALAH, F.-E.-S., PAMELA, A.-Y. AND HIDAYAT, F. 2019.** Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. *Geoscience Letters*, 6(1). doi:10.1186/s40562-019-0140-4.
- THIERY, Y. 2007.** Susceptibilité du bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant : cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. *Thèse de Doctorat, Université de Caen Basse-Normandie*, 443 p.
- THIERY, Y., JEAN-PHILIPPE, M., SIMONE, S., ANNE, P. ET OLIVIER, M. 2005.** Analyse spatiale de la susceptibilité des versants aux glissements de terrain. *Revue Internationale de Géomatique*, 15 (2), pp. 227-245. 10.3166/ri.15.227-245. Hal-00276824.
- TURRINI, M.-C. AND VISINTAINER, P. 1998.** Proposal of a method to define areas of landslide hazard and application to an area of the Dolomites, Italy. *Eng. Geol.* 50, pp. 255-265.
- VAN WESTEN, C.-J., RENGERS, N. AND SOETERS, R. 2003.** Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. *Natural Hazards*, vol. 30, n°3, pp. 399-419. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e.
- VARNES, D.-J. 1984.** Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *UNESCO, Paris*, 68 p.
- VILA, J.-M. 1980.** La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris*, 3 vol., 665 p.
- WUBALEM, A. 2021.** Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uat-zau catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenvironmental Disasters*, 8 (1), 1.
- ZHAO, Y., HUANG, Y., LIU, H., WEI, Y., LIN, Q. AND LU, Y. 2018.** Use of the normalized difference road landside index (NDRLI)-based method for the quick delineation of road-induced landslides. *Scientific reports*, 8(1). doi:10.1038/s41598-018-36202-9.