

NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE

PARAMÈTRES ET MÉTHODES UTILISÉS POUR LA CARTOGRAPHIE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

PARAMETERS AND METHODS USED FOR LANDSLIDE MAPPING

MEBIROUK Nadjib¹, MESSAST Salah², AMRANE Moussa³

¹Laboratoire LMGHU, Département de Génie Civil, Université 20 Août 1955 - Skikda, Algérie, mebirouknadjib632@gmail.com.

²Laboratoire LMGHU, Département de Génie Civil, Université 20 Août 1955 - Skikda, Algérie, msalah2007msalah@gmail.com.

³Département de Génie Civil, Laboratoire LGC-ROI, Université de Batna 2, Algérie, moussa.amrane@univ-batna2.dz

Résumé- L'eau a plusieurs effets dans la nature. La variation de la teneur en eau en relation avec la morphologie et la lithologie des terrains provoquent divers phénomènes d'instabilités notamment les glissements qui peuvent être la cause d'importants dégâts : ils affectent les versants naturels ainsi que des talus créés de façon artificielle et constituent une menace pour les infrastructures de base ou les zones habitées.

Plusieurs études ont été publiées dans la littérature dans le but de délimiter les zones ayant une grande susceptibilité aux glissements de terrain. Le but principal de ces études est de prédire la susceptibilité de n'importe quel point situé sur la zone d'étude en fonction des facteurs qui le caractérisent tels que la géologie, la pente, l'altitude, l'occupation de sol, la lithologie, l'hydrogéologie et l'hydrologie. Plusieurs méthodes ont été utilisées avec succès pour cartographier les différents risques associés aux sols non saturés. Cependant, les méthodes d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique ont montré une incroyable capacité à fournir des modèles mathématiques très efficaces en cartographie géotechnique et plus précises que les méthodes classiques.

Cette contribution traite plusieurs aspects de l'évaluation des risques de glissement de terrain notamment à partir de méthodes basées sur l'intégration des SIG avec les méthodes d'IA et d'autres méthodes à savoir : - La méthode des index, la méthode bivariée de la théorie de l'évidence, la méthode multivariée de régression logistique, l'approche par Data Mining et enfin la méthode des Unités de Conditions Uniques. D'abord, plusieurs études ont été collectées et utilisées en formant une synthèse ; cela se poursuit ensuite par un examen critique de l'état de l'art dans l'utilisation des SIG et les méthodes d'IA pour la cartographie et la modélisation des risques des sols non saturés (notamment les glissements).

Mots - clés : Sol Non Saturé, Glissement De Terrain, Réseaux De Neurones, Sig, Intelligence Artificielle.

Abstract- Water has several effects in nature, the variation of the water content in relation to the morphology and the lithology of the land cause several phenomena of instability, in particular landslides which can be the consequence of significant damage: they affect the slopes as well as artificially created embankments, and pose a threat to basic infrastructure or inhabited areas.

Several studies have been published in the literature with the aim of delineating areas with a high susceptibility to landslides. The main goal of these studies is to predict the susceptibility of any point located in the study area according to the factors that characterize it such as geology, slope, altitude, land use, lithology, hydrogeology and hydrology. Several methods have been successfully used to map the different risks associated with unsaturated soils. However, artificial intelligence and machine learning methods have shown an incredible ability to provide mathematical models that are very effective in geotechnical mapping and more accurate than conventional methods.

This contribution deals with several aspects of landslide risk assessment, in particular based on the integration of GIS with AI methods and other methods, such as: - The index method, the bivariate

method of the theory Obviously, the multivariate logistic regression method, the Data Mining approach and finally the Unique Condition Unit method. First of all, several studies were collected and used in forming a review contribution; continuing then with a critical review of the state of the art in the use of GIS and AI methods for mapping and modeling the risks of unsaturated soils (especially landslides).

Keywords: Unsaturated Soil, Landslide, Neural Networks, Gis, Artificial Intelligence.

1-Introduction

Les mouvements de terrain sont des aléas très fréquents. Un glissement de terrain peut être défini sommairement comme le mouvement d'une masse de sol ou de roche le long d'une surface de rupture sous l'effet de la gravité, qui s'amorce essentiellement là où il y a un talus. Un glissement de terrain constitue une menace sous deux aspects. Premièrement, le déplacement de la masse de sol ou de roche provoque le bris ou la destruction des éléments situés sur la portion de terrain en mouvement et peut engendrer des pertes chiffrées en millions de dollars [1 & 2]. Deuxièmement, l'étalement de la masse résultant de ce mouvement, qu'on appelle débris, peut être la source de dommages majeurs, voire meurtriers [3 - 6]. L'aspect des glissements (volume, profondeur, forme de la masse en mouvement) est très divers et dépend de la structure du sous-sol, du type de roche, des infiltrations et des circulations d'eaux souterraines. Toutefois, dans la nature, les terrains susceptibles au glissement sont souvent conditionnés par l'état de non-saturation du massif, d'où une analyse dans ces conditions s'avère parfois fondamentale et nécessaire. Ces dernières décennies, la mécanique des sols non saturés a fait l'objet de plusieurs recherches et beaucoup d'auteurs ont participé à son développement en général et à celui des méthodes d'analyse des glissements de terrains en particulier.

Au fil du temps, plusieurs méthodes de classifications et de cartographies ont été élaborées tenant compte des différents paramètres suscitant les glissements de terrain. Dans cette contribution on se basera sur les méthodes de cartographies les plus connues et les plus utilisées dans la littérature.

Depuis le 17^{ème} siècle, plusieurs chercheurs ont proposé des méthodes pour prédire la susceptibilité aux glissements de terrain et réaliser des cartes de sensibilité des versants afin de présenter les zones sujettes aux risques de glissement de terrain. En outre, il existe de

nombreux types d'approches qui sont utilisées pour la cartographie de la sensibilité aux glissements de terrain. Elles peuvent être classées en trois ensembles en tant que méthodes : qualitatives, semi-quantitatives et quantitatives [6 & 7].

2- Les glissements de terrains

2.1- Généralités sur les glissements

Lors de la survenue d'un glissement, l'analyse des causes se fait par la recherche des différents facteurs déclenchants : ceux-ci peuvent être facilement listés à partir des grandeurs présentées dans les équations d'équilibre, tant sur les forces motrices que sur les forces résistantes.

Le raidissement d'une pente par des terrassements, la surcharge en tête de talus, le remblai construit sur une pente, des déblais à la base de la pente, sont autant d'exemple d'augmentation des forces motrices. Un autre cas est celui des séismes où l'accélération horizontale engendre des instabilités souvent très nocives lorsque le réseau routier d'acheminement de secours est impacté. Des terrassements – même modestes – en pied de versant peuvent aussi entraîner des glissements importants lorsqu'ils sont effectués sur des sites ayant déjà glissés mais actuellement stabilisés. L'écoulement de l'eau sur une pente est aussi une force motrice : la perte de charge lors de l'écoulement se transmet au squelette du sol [8]. L'analyse hydrogéologique du versant est donc essentielle et l'eau agit aussi par son effet sur la résistance mécanique des sols.

Le comportement mécanique des sols à la rupture est représenté par la loi de Coulomb et la résistance au cisaillement comporte un terme de cohésion et un terme de frottement proportionnel à la contrainte normale. Mais les sols sont des matériaux bi- ou tri-phasiques.

Il existe donc une pression interstitielle et l'analyse peut se faire soit en contraintes totales (en considérant le sol comme monophasique) soit en contraintes effectives avec prise en

compte des pressions de l'eau dans les pores du sol.

L'analyse de la stabilité naturelle de la pente avant les travaux qui vont modifier sa géométrie est indispensable. Cette analyse doit inclure les conditions géologiques et hydrauliques. Il peut s'agir aussi d'étudier d'anciens glissements, fossiles potentiellement réactivables : en effet, sur les surfaces des anciens glissements l'angle de frottement résiduel créé par les grands déplacements antérieurs peut être seulement de 20° à 10° et la cohésion résiduelle est quasi nulle. Cela explique des glissements qui apparaissent sur des pentes très faibles lorsque le rôle de l'eau est présent.

2.2- principaux paramètres influençant l'aléa

L'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence (prédisposition). Les paramètres principaux influençant l'aléa « mouvement de terrain » sont la géologie, la morphologie, le couvert végétal, l'eau et les sollicitations cycliques (vents, chocs thermiques, séismes) qui sur plusieurs années provoquent une « fatigue » du matériau et favorisent une baisse de sa résistance [14].

2.2.1- Effet de l'eau

L'eau a plusieurs aspects dans le déclenchement des glissements de terrain. Les venues d'eaux dans la nature peuvent être d'origine pluviale ou souterraine provenant de l'amont. Les eaux pluviales peuvent provoquer une érosion de surface et des infiltrations rejoignant les eaux souterraines [9].

Un exemple permet de comprendre l'effet de l'eau. Une pente dans un matériau sableux totalement sec est stable tant que l'angle de talus est inférieur à l'angle de frottement ϕ . La même pente totalement noyée sans écoulement est stable dans les mêmes conditions. Lorsque la pente est soumise à un écoulement dont la surface libre coïncide avec la surface topographique, l'angle d'équilibre limite est de l'ordre de la moitié de ϕ . Pour une nappe en écoulement parallèle à la pente, le coefficient de sécurité (traduisant l'excès de stabilité de la pente) décroît lorsque la nappe se rapproche de

la surface [8] : cela explique les glissements survenant après de fortes pluies provoquant la remontée de la nappe en écoulement.

A cet effet, s'ajoute le rôle de l'eau sur le comportement mécanique des sols non saturés. La non-saturation crée une succion entre les grains de sol qui peut s'interpréter comme une cohésion capillaire.

Celle-ci est très favorable à la stabilité, mais elle disparaît lors de la saturation, causant ainsi le glissement [10].

Une augmentation des forces de percolation pourrait également avoir une incidence sur l'érosion hydraulique interne du sol [15]. En outre, une augmentation de l'infiltration remplirait les vides d'air dans les sols avec de l'eau et la force significative obtenue à partir de la succion du sol serait perdue.

L'augmentation des précipitations entraînera également un excédent d'eau dans les bassins versants causant l'augmentation des débits dans les cours d'eau et des inondations extrêmes [16]. Cela pourrait provoquer l'érosion du pied des pentes naturelles dans les plaines inondables ou en bordure de cours d'eau [15]. Ce processus peut déclencher un glissement de terrain dû à la réduction de la résistance (perte de butée) en pied de falaise. L'érosion de surface peut également se produire par enlèvement de la végétation et augmentation de l'infiltration des eaux de ruissellement.

Enfin, lorsque les argiles sont cisailées sur une surface de glissement, elles subissent une augmentation de la teneur en eau qui diminue leur résistance au cisaillement.

2.2.2- Effet de la température

Les changements de température peuvent affecter la stabilité d'une pente sous au moins trois aspects. Tout d'abord, les changements de température peuvent provoquer des changements dans le couvert végétal (changement du type de végétation ou disparition de la végétation existante). Ces effets entraînent les mêmes conséquences en raison de changements dans les précipitations [17].

Deuxièmement, la température affecte également les eaux souterraines. Comme la conductivité hydraulique du sol est fonction de la viscosité d'un fluide, la vitesse d'infiltration pourrait augmenter en raison d'une élévation de température. En outre, la masse d'eau souterraine subirait une dilatation thermique.

Cette expansion thermique pourrait conduire à une élévation du niveau des eaux souterraines. Par conséquent, une augmentation significative de la température réduira la stabilité de la pente naturelle [17].

Troisièmement, l'augmentation de la température peut dessécher le sol. Alors que dans certains cas, une teneur en humidité plus faible augmentera les paramètres de résistance du sol, elle peut au contraire entraîner des pertes de cohésion du sol, par exemple en raison de la fissuration d'un dépôt d'argile [18]. Ces fissures accélèrent également l'infiltration avec une diminution du facteur de sécurité associé [17].

En milieu montagnard, concernant la température de gel, une hausse ou une baisse de la température en hiver peut soit augmenter, soit diminuer le nombre de cycles de gel-dégel par an (Saad, 2012). En effet, dans une zone où les températures restent négatives longtemps en hiver, le décalage vers le haut de la valeur de la température peut entraîner l'apparition de cycles de gel-dégel.

A l'inverse, pour une zone qui présente des cycles de gel-dégel avec des températures de gel négatives de quelques degrés, une hausse de la température pourrait entraîner un passage de la température du négatif au positif et donc faire disparaître les cycles de gel-dégel en question.

2.2.3- Effet de la végétation

La végétation influe de manière significative sur la stabilité des pentes naturelles [15]. Elle a généralement des effets plus positifs (force de renfort des racines pour le sol superficiel, succion du sol maintenue par les racines qui absorbent l'eau, le feuillage intercepte les précipitations réduisant l'infiltration d'eau, les racines permettent la cohésion des particules du sol réduisant l'érosion) que négatifs (les arbres massifs exposés au vent transfèrent les forces du vent au sol par leurs racines déstabilisant le sol, le poids des arbres sur une pente raide a le même effet). La perte de la végétation augmente le risque d'instabilité d'une pente naturelle. Les changements dans le type de végétation dus à une augmentation des précipitations, par exemple le passage de petits arbres à des arbres de grande hauteur, peuvent également nuire à la stabilité à cause de l'augmentation du poids et de l'effet du vent.

Pour résumer, le glissement de terrain n'est pas un phénomène continu, une évolution du

contexte est le plus souvent responsable de son déclenchement :

- pente ;
- montée du niveau phréatique ;
- chargement en tête ;
- déchargement en pied ;
- altération des formations géologiques.

Les actions humaines agissant directement sur le déclenchement de glissements de terrains sont :

- Les terrassements : assez systématiquement, ils visent à aplanir une portion de versant et, sans précaution particulière, créent une décharge à l'amont et une recharge à l'aval de l'ouvrage. C'est le cas le plus rencontré dans les glissements de terrain déclenchés près du réseau routier.
- L'hydrologie : des modifications des écoulements des nappes de versant peuvent augmenter la mise en charge de ces nappes lors des épisodes pluvieux, les canalisations d'eau fuyarde apportent une charge supplémentaire, une poussée hydraulique lorsque le débit permet d'établir une nappe et dégrade les caractéristiques des matériaux.
- L'urbanisation modifie le réseau hydrographique naturel, accélère et concentre les écoulements superficiels.

3-Présentation des méthodes conventionnelles utilisées pour modéliser la susceptibilité aux glissements de terrain

Le domaine de la cartographie est de plus en plus demandé à cause de la nécessité d'avoir des informations rapides et moins coûteuses. Dans la littérature plusieurs chercheurs ont travaillé sur la cartographie des glissements de terrain afin de donner une information rapide avec une précision relative suffisante pour l'utiliser dans l'orientation et le choix de l'emplacement approprié des programmes de développement urbains et industriels. Plusieurs méthodes ont été développées pour la réalisation des cartes de risques. Le tableau suivant regroupe la plupart de ces méthodes.



Tableau 1: Méthodes de cartographie les plus utilisées par les chercheurs dans le monde
Table 1: Mapping methods most used by researchers around the world

Catégorie	Méthode	Type	Citations
Qualitative	Techniques d'inventaire des glissements de terrain	-	(Castellanos Abella and Van Westen, 2008; Foumelis et al., 2004; Xu et al., 2013)
	Méthodes euristiques (évaluation d'experts)	-	(Ayenew and Barbieri, 2005; Guzzetti et al., 1999; Kouli et al., 2010; Tarun K. Raghuvanshi et al., 2014; Tarun Kumar Raghuvanshi et al., 2014; Saha et al., 2002; Turrini and Visintainer, 1998; Wachal and Hudak, 2000)
Quantitative	Approche déterministe	-	(Godt et al., 2008; Huang and Kao, 2006; Krušić et al., 2017; Marin et al., 2021; Nsengiyumva et al., 2019b; Park et al., 2013; Salciarini et al., 2020, 2006)
		Régression logistique	(Althuwaynee et al., 2014; Atkinson and Massari, 1998; Ayalew and Yamagishi, 2005; Bernknopf et al., 1988; Dai et al., 2001; Dai and Lee, 2002; Felicísimo et al., 2013; Goetz et al., 2015; Gorum et al., 2008; Guzzetti et al., 1999; Jade and Sarkar, 1993; Kavzoglu et al., 2015; Lee and Min, 2001; Lee and Sambath, 2006; Nsengiyumva et al., 2019a; Ohlmacher and Davis, 2003; Pradhan and Lee, 2010; Trigila et al., 2015; Umar et al., 2014; L.-J. Wang et al., 2016; Wang et al., 2015; Yilmaz, 2010a, 2009)
	Méthodes Statistiques (multivariées et méthodes bivariées)	Analyses Discriminantes	(Ardizzone et al., 2002; Carrara, 1983; Carrara et al., 2003)
		Pondéré Principal Géographique	(Basu et al., 2020 ; Faraji Sabokbar et al., 2014)
		Modèles additifs généralisés	(Goetz et al., 2011; Park and Chi, 2008)
		Poids de l'évidence	(Aghdam et al., 2016; Ayalew et al., 2004; Dahal et al., 2008; Goetz et al., 2015; Kavzoglu et al., 2015; Nsengiyumva et al., 2019a; L.-J. Wang et al., 2016)
		Rapport de fréquence	(Akgun et al., 2008; Kavzoglu et al., 2015; Lee and Sambath, 2006; Nsengiyumva et al., 2019a;

			Pradhan and Lee, 2010; Silalahi et al., 2019; Trigila et al., 2015; Umar et al., 2014; L.-J. Wang et al., 2016; Q. Wang et al., 2016; Yilmaz, 2009; Zhou et al., 2016)
		Probabilité Conditionnelle	(Yilmaz, 2010a)
		Facteurs de certitude	(Chen et al., 2018; Zhao and Chen, 2020)
		Indice d'entropie	(Bednarik et al., 2012; Chen et al., 2018; Pourghasemi et al., 2012a; Q. Wang et al., 2016)
	Méthodes d'apprentissage automatique	Système d'inférence adaptative neuro-floue (ANFIS)	(Aghdam et al., 2016; Choi et al., 2011; Jaafari et al., 2017; Pradhan, 2013; Pradhan et al., 2010; Sezer et al., 2011; Tien Bui et al., 2012a; Vahidnia et al., 2010)
		Réseau de neurones à rétro-propagation (ANN)	(ALEOTTI et al., 1996; Alimohammadlou et al., 2014; Brown, 2012; Cani ani et al., 2008; Gómez and Kavzoglu, 2005; Lee et al., 2004, 2003; Lee and Evangelista, 2006; Melchiorre et al., 2008; Neaupane and Achet, 2004; Pra dhan and Buchroithner, 2010; Pradhan and Lee, 2010; Tien Bui et al., 2016b; L.-J. Wang et al., 2016; Were et al., 2015; Xu et al., 2016; Yilmaz, 2010a, 2010b, 2009; Zare et al., 2013)
		Réseau neuronal profond (RNP)	(Dao et al., 2020)
		Réseau de neurones convolutifs	(Wang et al., 2019)
Semi-Quantitative	Décision multicritères	Processus de hiérarchie	(Althuwaynee et al., 2014; Komac, 2006; Pourghasemi et al., 2012b; Zhou et al., 2016)
		Combinaison linéaire pondérée	(Ahmed, 2015; Akgun et al., 2008; Ayalew et al., 2004)
		Moyenne pondérée ordonnée	(Ahmed, 2015; Feizzadeh et al., 2014)

4-Discussion

Après l'analyse des méthodes utilisées et des résultats obtenus par plusieurs chercheurs pour la cartographie des risques des glissements de terrain, il ressort que les méthodes qualitatives peuvent être définies comme méthodes simples reposant généralement sur l'expérience et les

jugements d'experts à travers l'utilisation de mesures directes sur le terrain.

En revanche, les méthodes quantitatives sont des méthodologies objectives et sévères qui dépendent des méthodes statistiques et mathématiques [7]. Ces méthodes ont été utilisées dans le but de réduire la subjectivité des glissements de terrain en combinant des modèles géotechniques et statistiques. Des méthodes intermédiaires ont été utilisées dans les études précédentes et qui peuvent être définies comme une alternative liant les méthodes qualitatives et quantitatives par l'évaluation de l'importance des paramètres d'entrée pour générer des cartes des risques de glissements de terrain. Ces méthodes sont appelées méthodes semi quantitatives [11]. Les qualités de facilité et de performance ont rendu les trois méthodes susmentionnées communes et utiles en raison de leurs expressions simples de la dépendance (c'est-à-dire de la sensibilité aux glissements de terrain) et variables indépendantes (c-à-d facteurs causaux). Les inventaires de glissements de terrain et méthodes heuristiques sont les méthodes qualitatives les plus couramment utilisées [12]. La principale lacune des méthodes qualitatives est leur subjectivité qui est liée au classement expérimental des facteurs de prédispositions aux glissements de terrain résultant des connaissances d'experts [12]. De même, les méthodes quantitatives peuvent être classées en nombreuses sous-classes : méthodes statistiques, déterministes et d'apprentissage automatique [7]. Déterministe (appelée également méthode géotechnique) fait partie des méthodes largement appliquées dans la littérature qui utilisent des paramètres géotechniques déterminés sur le site, combinés aux principes d'ingénierie de l'instabilité des pentes, qui s'expriment en termes de facteur de sécurité, parallèlement à la négligence des facteurs climatiques et humains [12].

La principale limitation de la méthode déterministe est que son utilisation précise nécessite une géotechnique détaillée et des informations hydrologiques difficiles à collecter dans de vastes zones [12].

Par conséquent, ces méthodes sont utiles uniquement pour la cartographie des petites zones à grande échelle [13]. Sinon, les méthodes statistiques peuvent prédire la corrélation entre les facteurs de conditionnement et les glissements de terrain passés au moyen des méthodes bivariées ou multivariées [7]. Parmi les méthodes statistiques couramment utilisées dans la

littérature pour modéliser la susceptibilité aux glissements de terrain, on cite : la régression logistique, le poids de la preuve et le processus de hiérarchie analytique. Cependant, la principal critique a souligné sur les méthodes statistiques est qu'elles nécessitent la distribution normale des facteurs de conditionnement (prédisposition), ce qui n'est pas toujours agréable et elles sont intrinsèquement linéaires. En outre, ces méthodes sont basées sur des hypothèses simplifiées, telles que le comportement linéaire ou une heuristique de production, ce qui rend les méthodes statistiques moins efficaces pour modéliser des phénomènes non-linéaires complexes. Pour surmonter ces limitations, des modèles d'apprentissage automatique ont été proposés pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain qui ont utilisé comme algorithmes sophistiqués dans le but de modéliser les phénomènes non-linéaires et les relations complexes en analysant les facteurs de conditionnement des emplacements des zones qui subissent des glissements de terrain par rapport aux zones stables [7]. L'apprentissage automatique est une approche programmée, qui extrait de manière itérative à partir des données disponibles, les relations sous-jacentes ou les idées cachées afin de construire des modèles analytiques précis [7].

5-Conclusion

Cette contribution présente d'une manière sommaire une bonne partie des méthodes utilisées par beaucoup de chercheurs dans la cartographie des glissements de terrain. Il est à signaler que chaque méthode a ses principes et ses conditions d'utilisation selon la disponibilité des données de base, d'une part, et d'autre part, il est à signaler que les méthodes se basant sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique montrent une très grande efficacité dans ce domaine puisque elles traitent les données d'entrée que ce soit linéaire ou non linéaire par l'utilisation de plusieurs algorithmes afin de sortir un modèle final qui aide à l'établissement des cartes de risque plus précises. L'intégration de l'aspect de non saturation des sols dans l'établissement des cartes de risque vis-à-vis du glissement reflète et explique l'état naturel le plus rencontré dans la nature.

Le rehaussement du niveau de la nappe phréatique engendre la diminution de la contrainte effective en parallèle à

l'augmentation de la pression de l'eau interstitielle. Cette action perturbera l'équilibre du massif et cela peut conduire à des glissements de terrain.

La production d'une carte de risque vis-à-vis des glissements de terrain nécessite, en premier lieu, l'établissement d'une carte de micro zonage sur l'état naturel du sol en tenant compte du niveau moyen des nappes phréatiques et de la lithologie des sols. Ensuite de les exploiter dans l'évaluation de l'aléa de glissement au moyen du procédé numérique ARCGIS, après qu'on les ait fusionnées avec les autres cartes collectées afin de relier chaque point dans la zone d'étude par les facteurs de prédispositions qui le caractérise en s'intéressant par la carte de précipitation qui joue un rôle primordiale dans le déclenchement des glissements. L'intégration des résultats d'analyse des données obtenues par les méthodes d'IA et le SIG conduit à la réalisation de cartes de susceptibilité au mouvement gravitaire de la zone étudiée.

Références bibliographiques

- [1] Nhu, V.-H., Mohammadi, A., Shahabi, H., Ahmad, B.B., Al-Ansari, N., Shirzadi, A., Clague, J.J., Jaafari, A., Chen, W., Nguyen, H., 2020a. *Landslide Susceptibility Mapping Using Machine Learning Algorithms and Remote Sensing Data in a Tropical Environment*. Int. J. Environ. Res. Public. Health 17, 4933.
- [2] Nourani, V., Pradhan, B., Ghaffari, H., Sharifi, S.S., 2014. *Landslide susceptibility mapping at Zonouz Plain, Iran using genetic programming and comparison with frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models*. Nat. Hazards 71, 523–547. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0932-3>
- [3] Achour, Y., Pourghasemi, H.R., 2020. *How do machine learning techniques help in increasing accuracy of landslide susceptibility maps?* Geosci. Front. 11, 871–883. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.10.001>
- [4] Ermini, L., Catani, F., Casagli, N., 2005. *Artificial Neural Networks applied to landslide susceptibility assessment*. Geomorphology, Geomorphological hazard and human impact in mountain environments. 66, 327–343.
- [5] Kadavi, P.R., Lee, C.-W., Lee, S., 2018. *Application of Ensemble-Based Machine Learning Models to Landslide Susceptibility Mapping*. Remote Sens. 10, 1252. <https://doi.org/10.3390/rs10081252>
- [6] Brenning, A., 2005. *Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 5, 853–862. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-853-2005>
- [7] Kavzoglu, T., Colkesen, I., Sahin, E.K., 2019. *Machine Learning Techniques in Landslide Susceptibility Mapping: A Survey and a Case Study*, in: Pradhan, S.P., Vishal, V., Singh, T.N. (Eds.), *Landslides: Theory, Practice and Modelling, Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Springer International Publishing, Cham, pp. 283–301. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77377-3_13
- [8] Flavigny Etienne (2021), *Les glissements de terrain, Encyclopédie de l'Environnement*, [en ligne ISSN 2555-0950] url : <https://www.encyclopedieenvironnement.org/sol/glissements-de-terrain/>
- [9] Moulin, C., Chapeau C., 2004, *Le glissement de la Salle en Beaumont*, INTEREG III / Atelier 2 / Grenoble 13-15 octobre.
- [10] Guilloux A. et al. 2005., *Note sur la définition des Sols indurés Roches tendres SIRT*. Revue française de Géotechnique, n°111, pp 59-67.
- [11] Hadmoko, D.S., Lavigne, F., Samodra, G., 2017. *Application of a semi-quantitative and GIS-based statistical model to landslide susceptibility zonation in Kayangan Catchment, Java, Indonesia*. Nat. Hazards 87, 437–468. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2772-z>.
- [12] Caniani, D., Pascale, S., Sdao, F., Sole, A., 2008. *Neural networks and landslide susceptibility: a case study of the urban area of Potenza*. Nat. Hazards 45, 55–72. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9169-3>
- [13] Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. *The application of GIS-based logistic regression for*



landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. Geomorphology 65, 15–31.

[14] Bastone V., De la Torre Y.,(2011).*Etude préliminaire de l'impact du changement climatique sur les risques naturels à la Réunion.* Public report France, 135 p.

[15] Bo, NW., Fabius M., Fabius K., (2008). *Impact of global warming on stability of natural slopes.* Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards. Université Laval, Québec, 594 p.

[16] Didier C., Gombert P., Al Heib M., Charmoille A., 2010. *Impact du changement climatique sur la stabilité des cavités souterraines.* Rapport INERIS DRS-10-103862-00411A.

[17] Rathnaweera TD., Palihawadana MP., Rangana HLL., Nawagamuwa UP., (2012). *Effects of climate change on landslide frequencies in landslide prone districts in Sri Lanka.* Civil Engineering Research Exchange Symposium 2012.

[18] Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y., (2004). *Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability.* Rock Mechanics & Mining Sciences 42 (2005) 331–349