



**CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITÉ AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN  
LE LONG DE LA ROUTE NATIONALE RN 8 AU SUD DE LA VILLE DE LARBÂA  
(NORD-EST DE LA WILAYA DE BLIDA) PAR MODÉLISATION STATISTIQUE  
SOUS SIG  
LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING ALONG THE NATIONAL ROAD RN 8  
IN SOUTH OF THE LARBÂA CITY BY USING STATISTICAL MODELING  
UNDER GIS**

Réception : 03/04/2022

Acceptation : 21/04/2022

Publication : 08/06/2022

BOURENANE Hamid<sup>1</sup>, KERKAR Sim<sup>2</sup> et BEDR Samir<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique CGS, 1 Rue Kaddour Rahim, H-Dey, Alger Algérie, e-mail: [b.hamid@homail.com](mailto:b.hamid@homail.com)

<sup>2</sup>Bureau d'Etude d'Engineering Géotechnique KERATERRA, N°43, 1er étage, Centre des Affaires "El Wouroud", Bab Dzair, (09000), Blida, Algérie, e-mail: [skerkar@keraterra.com](mailto:skerkar@keraterra.com)

<sup>3</sup>Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique CGS, 1 Rue Kaddour Rahim, H-Dey, Alger Algérie ; e-mail: [bedrsamir@homail.com](mailto:bedrsamir@homail.com)

**Résumé** - La cartographie de la susceptibilité ou d'aléa est considérée comme la première étape de la stratégie de réduction des risques de catastrophes naturelles pour la société. L'objectif de ce travail de recherche est de valider la carte de susceptibilité aux mouvements de terrain établie par l'application de l'approche statistique par Rapport de Fréquence (FR), basée sur le système d'information géographique (SIG) pour la zone le long de la route nationale RN 8 au Sud la ville de Larbâa. La méthodologie proposée comprend quatre étapes complémentaires : (i) la cartographie de l'inventaire des mouvements de terrain a été réalisée par l'analyse des photos aériennes et des images satellites de Google Earth et des données d'archives complétées par des observations de terrain. La carte d'inventaire établie montre que le périmètre d'instabilité couvre une superficie de 0,18189 km<sup>2</sup> (18.189 ha) qui représente 10.57 % du périmètre total de la zone d'étude; (ii) sept facteurs de susceptibilité incluant la pente, l'aspect, l'altitude, la lithologie, la distance au réseau de drainage, la distance aux failles et la distance au réseau routier ont été identifiés et considérés pour l'occurrence spatiale des phénomènes ; (iii) évaluation et cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain en tenant compte des événements de mouvements de terrain inventoriés et de leurs facteurs prédisposants à l'aide du modèle de rapport de fréquence (FR) sous SIG et (iv) vérification de la précision et validation du modèle utilisé à l'aide de la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Les résultats validés indiquent que la méthode de FR fournit une bonne précision (78.40 %) pour la prédiction de l'aléa de mouvements de terrain. La carte établie constitue un puissant outil d'aide à la décision en matière d'aménagement et d'urbanisme pour une gestion plus rationnelle des risques de glissement de terrain dans la ville de Larbâa.

**Mots clés** : Mouvements de terrain, susceptibilité, modélisation statistique, validation, SIG, Blida.

**Abstract**-Landslide susceptibility and hazard mapping is considered as the first step in a strategy of reducing the risk of the society from natural disasters. The objective of this work is to validate the landslide susceptibility map produced by the application of the bivariate statistical approach using the Frequency Ratio (FR) model in GIS for the area along the national road RN 8 in the south of the city of Larbâa. For this purpose, the proposed methodology includes the four following complementary steps: (i) landslide inventory mapping was performed from interpretation of aerial photographs, and Google Earth satellite images and geological field investigations; (ii) seven landslide susceptibility factors including slope, aspect, elevation, lithology, distance to drainage, distance to faults and distance to roads were identified and considered for landslide susceptibility analyses; (iii) landslide susceptibility assessment and mapping by considering the inventoried landslide events and their related predisposing

factors using Frequency Ratio (FR) model in GIS and (iv) verification and validation of the accurateness of the used model using the Receiver Operating Characteristics Curves (ROC). The validated results indicate that the FR method provides good accuracy (78.40%) for the prediction of the landslide hazard. The obtained landslide susceptibility map may serve as a useful tool for future land management and development planning in the Blida region.

**Keywords:** Landslide, susceptibility, statistical modelling, validation, GIS, Blida

## 1-Introduction

En Algérie du Nord, les mouvements de terrain comptent parmi les aléas naturels les plus fréquents et les plus dommageables constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social de nombreuses villes [15, 23, 7, 8, 17, 10, 9]. Larbâa située, dans le massif montagneux blidéen au Nord-Est de la wilaya de Blida, est l'une des régions les plus exposées depuis plusieurs décennies à des mouvements de terrain progressifs qui causent des dommages importants à plusieurs ouvrages et infrastructures publiques tels que la route nationale RN 8, la RN 134 et menacent aujourd'hui sérieusement d'autres régions à stabilité précaire (Fig. 1). Ces mouvements progressifs prennent en termes de risque une ampleur de plus en plus grande pour le développement et l'aménagement urbain.

Devant l'importance des dommages de plus en plus importants et les enjeux socio-économiques, les autorités sont alertées d'une part sur la méconnaissance de ces phénomènes, les facteurs de prédisposition et les conditions de déclenchements et leurs non prise en compte dans les projets d'aménagement et d'urbanisme et d'autre part sur l'urgence de leur identification notamment pour leur prévision spatiale et leur prévention. L'absence d'une politique efficace de prévention par le manque d'un système réglementaire pour suivre l'évolution de ce type de phénomène et sa réduction n'a fait qu'accentuer le risque.

En dépit d'un risque avéré, aucun travail de recherche n'a été effectué sur ces phénomènes complexes dans ce secteur. Ainsi, l'inventaire des phénomènes n'est pas établi, les facteurs de prédisposition et les conditions de déclenchements sont encore mal connus et la cartographie conforme de la susceptibilité et de l'aléa est inexistante.

Afin de réduire les dommages aux biens et les pertes de vies humaines, ainsi que de contribuer à la réduction des risques pour l'aménagement et le développement urbain durable de la ville Larbâa, il est nécessaire de générer des cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. La cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain se définit comme une tâche impérative qui peut aider les autorités à réduire les pertes dues aux catastrophes de glissements de terrain en servant de ligne directrice pour une planification durable notamment dans les zones dangereuses. Elle constitue la première étape de toute stratégie de réduction du risque. Le présent article est consacré à la cartographie de l'inventaire et de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans le cadre de l'étude de confortement des falaises d'un tronçon de la route nationale RN 8 entre les PK 35 et PK 38 situé au Sud-Est de la ville de Larbâa.

Selon Varnesen [28], la susceptibilité aux glissements de terrain est définie comme la probabilité spatiale qu'un type de phénomène d'une certaine intensité se produise dans une zone donnée pour des facteurs de susceptibilité donnés. La cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain est liée à la subdivision d'un site donné en zones homogènes et leur classement en fonction de leur degré de susceptibilité aux mouvements de terrain.

Diverses méthodes et techniques de modélisation souvent basées sur SIG ont été développées et appliquées avec succès pour la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain à différentes échelles (régionale, grande, moyenne, et locale). Ces méthodes peuvent être classées en trois groupes : (i) qualitative ou experte ; (ii) déterministes ou géotechniques, et (iii) statistiques ou quantitative [4, 5, 7, 8, 12, 15, 18, 19, 20, 21, 22].

La méthode qualitative est une approche directe, fondée sur l'expérience et les connaissances de l'expert. La susceptibilité aux glissements de terrain est déterminée directement en utilisant les règles de décision subjectives de l'expert pour classer les zones et produire des cartes de susceptibilité qualitative [7, 8, 26, 27].

Les méthodes déterministes sont des méthodes d'évaluation de la susceptibilité ou de l'aléa "mouvements de terrain" réel des versants, représenté par un facteur de sécurité. Le calcul d'un coefficient de sécurité est basé sur la modélisation mathématique des lois physiques qui contrôlent la pente [32]. Les modèles déterministes nécessitent une grande quantité de données liées aux propriétés géotechniques des matériaux. L'obtention de telles données pour de grandes zones n'est pas pratique. Cette méthode n'est donc pas applicable aux échelles moyennes et larges (1:50 000, 1:25 000, et 1:10 000) [7,8, 26, 32].

Les approches quantitatives sont des approches indirectes basées sur des méthodes statistiques « objectives », permettant de limiter la subjectivité de l'analyse qualitative. Leur principe consiste à analyser des relations mathématiques entre les facteurs de prédisposition et l'occurrence spatiale de glissements de terrain (passés et présents) afin d'évaluer quantitativement la probabilité de rupture pour des régions non affectées par des mouvements de terrain.

Actuellement ces méthodes d'analyse spatiale statistiques plus objectives sont de plus en plus utilisées pour cartographier la susceptibilité et l'aléa de « mouvements de versant ». Au cours de la dernière décennie, des modèles statistiques tels que l'analyse statistique bivariée (rapport de fréquence, indice statistique, poids des preuves) et multivariée (régressions linéaires multiples, régression logistique et discriminant) ont été largement appliqués dans le monde entier et fournissent des résultats fiables [7, 8, 21.30, 20, 24, 14, 8, 26, 15, 11].

Les méthodes statistiques fournissent des résultats pleinement satisfaisants et sont désormais considérées comme très rigoureuses, plus objectives et plus appropriées pour la susceptibilité aux glissements à l'échelle moyenne et large en raison de leur potentiel à

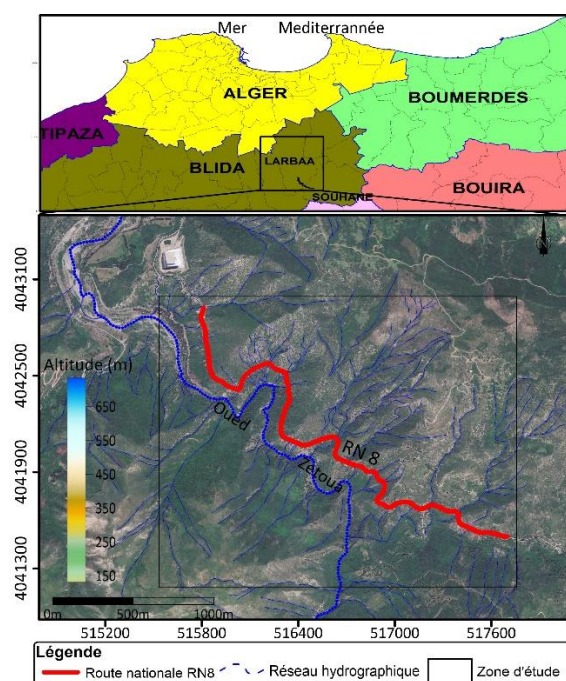
minimiser les erreurs liées à la subjectivité de l'expert. Les techniques d'analyse spatiale probabiliste (statistique) fondées sur SIG et télédétection sont de plus en plus utilisées pour évaluer la susceptibilité des versants aux mouvements de terrain à méso-échelle (1/50 000<sup>ème</sup> - 1/25 000<sup>ème</sup>), mais peu ou pas à l'échelle du 1/10 000<sup>ème</sup>, échelle de la cartographie réglementaire des risques. En Algérie, le zonage d'aléa de mouvements de terrains est basé sur une approche « expert » jugée assez subjective en raison des erreurs d'appréciation de l'expert. Ainsi, cette recherche a pour objectif de tester la validité des méthodes d'analyse spatiale et de modélisations probabilistes pour cartographier la susceptibilité de mouvements de terrains dans le site de Larbaa à l'échelle du 1/10 000<sup>ème</sup>. Le travail passe en revue les progrès récents dans la cartographie des mouvements de terrain et prend en compte les défis que représentent les risques de glissement de terrain dans l'aménagement du territoire afin de mettre en place des politiques et législations durables à des fins d'atténuation et de prévention. Les cartes de susceptibilité peuvent contribuer à la prévention et à l'atténuation des risques et à la mise en place d'une politique de gestion pour un développement durable dans les zones exposées aux glissements de terrain. L'objectif principal est, d'une part, d'expertiser les causes, l'évolution et la cartographie de l'aléa de mouvements de versants le long des talus rocheux et falaises de la route nationale RN 8, et d'autre part de présenter des cartes prédictives de susceptibilité visant à permettre de contrôler et de réduire le risque que peuvent engendrer ces mouvements de terrain le long de ce tronçon routier. Les résultats obtenus à partir de cette étude peuvent constituer un outil précieux et fondamental d'aide aux services concernés et pour les planificateurs routiers de développer une priorité de la zone le long des couloirs routiers nécessitant des mesures de lutte contre les glissements de terrain et afin d'assurer la sécurité du trafic routier menacé

par les instabilités et de réduire les risques associés à ces phénomènes.

## 2-Présentation de la zone étude

### 2.1-Cadre géographique

La zone concernée par la cartographie de susceptibilité aux mouvements de terrain est située au Sud-Est la ville de Larbâa, à 34 km au Nord-Est de Blida et à 24 km au Sud-Est d'Alger (Fig. 1). La zone d'étude concerne le tronçon routier de la route nationale RN 8 entre les PK 36 et PK 38 qui s'étend sur 3,32 km et se trouvant à la limite Est de la commune de Larbâa et Ouest de la commune de Souhane. C'est un secteur qui couvre une superficie totale d'environ 1,72 km<sup>2</sup> avec pour coordonnées correspondantes au quadrillage kilométrique UTM, Fuseau 31, WGS 84 : X varie entre 515537 et 517739m et Y varie entre 4041304 et 4043000 m.



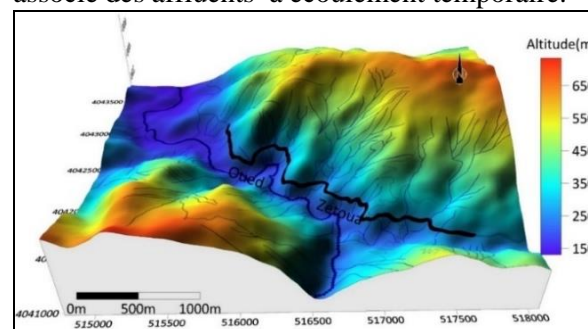
**Fig.1 :** Carte de localisation du site étudié sur le modèle numérique de terrain (MNT)

### 2.2-Cadre géomorphologique

La région d'étude se rattache aux massifs de l'Atlas blidéen situé dans l'Atlas tellien montagneux. Elle regroupe trois domaines morphologiques (Fig.2) : (i) les reliefs montagneux très accidentés du massif blidéen

d'orientation NE-SW se développant à l'Est dont les altitudes peuvent dépasser les 600 m ; (ii) les piémonts orientés Est-Ouest caractérisés par une topographie moins accidentée et mamelonnée où les dénivellations varient de 200 à 600m; (iii) la plaine de la Mitidja à l'Ouest caractérisée par une topographie subhorizontale avec des altitudes entre 50 à 150m.

Le site d'étude correspond au pied des versants montagneux des massifs blidéens d'orientation générale NE-SW qui limitent vers l'Ouest le bassin de la Mitidja et à la faveur des pentes élevées à regard NW qui dépassent les 15° (Fig.2). Les altitudes varient du Sud vers le Nord entre 150 et 700 m. Le versant est découpé par un réseau hydrographique dense orienté généralement N-S, NW-SE et NE-SW dont le plus important est représenté par le cours d'eau du Zetoua au Sud, à écoulement permanent, auquel est associé des affluents à écoulement temporaire.



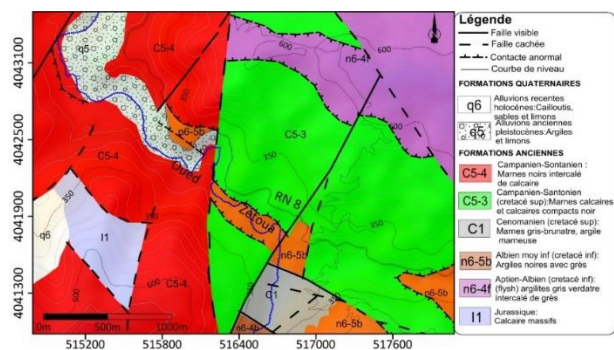
**Fig.2 :** Carte des principaux ensembles morphologiques de la région d'étude d'après le MNT.

### 2.3-Cadre géologique

La région de Blida appartient au domaine externe de la chaîne alpine d'Afrique du Nord ou Maghrébides. Dans le secteur d'étude, la série stratigraphique montre des formations géologiques quaternaires au Nord et des formations géologiques anciennes au Sud [29, 6, 1], (Fig.3)

(1) Les formations quaternaires sont représentées par les alluvions récentes, les alluvions anciennes (terrasses alluviales) et les éboulis et dépôts de pente : (i) *Les alluvions récentes*, formées de dépôts fluviatiles situées le long de l'Oued Zetoua à l'Ouest de la RN 8 ; (ii) *Les terrasses alluviales* correspondent aux matériaux grossiers situés sur les versants des vallées creusées par les oueds et se trouvent traversée par la RN 8 à l'Ouest ; (iii) *Les*

éboulis et dépôts de pente (*loupes de glissement*), formés sur les versants-falaises nord du massif le long de la RN 8; sur les rives gauche et droite de l'Oued Zetoua et au pied des falaises marno-calcaires du Crétacé au Nord et Sud du massif et (2) les formations géologiques anciennes sont composé de bas en haut de : (i) Jurassique constitué de calcaire massif gris clair ;(ii) Aptien-Albien caractérisé par le flysch (argilites grises verdâtres intercalées de grès); (iii) Albien moyen inférieur formé d'argiles noires avec de rares intercalations de grès quartzeux ; (iv) Cénomaniens constitué de marnes grises-brunâtres, argile marneuse et calcaire ; (v) Campanien-Santonien-Coniacien supérieur essentiellement constitué de marnes calcaires et calcaires compacts noirs; (vi) Campanien-Santonien représenté par des marnes noires intercalées de calcaire.

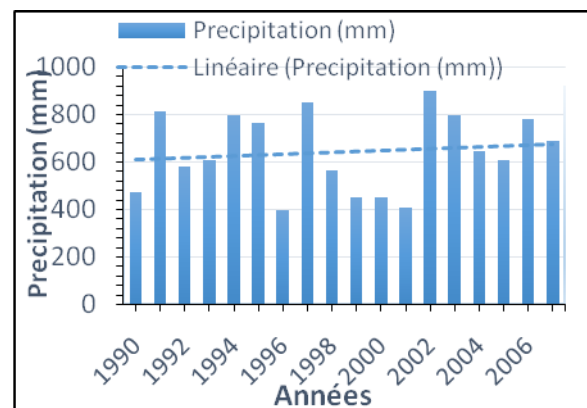


**Fig. 3 :** Extrait de la carte géologique de Tablat à l'échelle de 1/50 000 [1, modifiée]

## 2.5-Cadre climatique

La région de Blida est soumise à un climat méditerranéen humide, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et chaude entre Juin et Septembre et d'une saison humide relativement froide entre Novembre et Mars. L'analyse des données des précipitations annuelles de la station de Larbâa pour la période de 1990 à 2007 (Fig. 4) montre que la région de Larbâa reçoit chaque année une moyenne d'environ 620 mm qui sont réparties de la façon suivante : 431 mm entre Novembre à Mars, 110mm entre Avril et Mai, 87 mm entre Septembre et Octobre, le reste tombant pendant l'été. Les précipitations se caractérisent par une forte variabilité spatio-temporelle traduisant parfois des pluies exceptionnelles avec des crues torrentielles.

Elles constituent, par ailleurs, le facteur déclenchant des mouvements de terrain.



**Fig.4 :** Évolution des précipitations annuelles à la station de Larbâa pour la période de 1990 au 2007 [2]

## 3-Matériel et méthodes

La démarche scientifique de la cartographie de la susceptibilité s'effectue en cinq étapes [28, 12, 25] :

- Collecte et élaboration des bases de données spatialisées adaptées et représentatives des caractéristiques du site d'étude (les données nécessaires et indispensables pour une cartographie de la susceptibilité) ;
- Cartographie de l'inventaire de mouvements de terrain à l'échelle de 1:10 000 sous SIG où chaque phénomène est distingué selon son type, son activité, ses caractéristiques morphologiques, géologiques et géométriques. Cette première étape de l'analyse peut constituer une première approche de la susceptibilité ;
- Cartographie des principaux facteurs de susceptibilité et de déclenchement pour l'occurrence spatiale des phénomènes à l'échelle de 1 :10 000 sous SIG.
- Evaluation et cartographie de la susceptibilité en utilisant des modèles probabilistes par définition des pondérations relatives à chaque facteur mis en cause pour la localisation des phénomènes. La définition de ces pondérations reflète la relation spatiale entre les phénomènes et les facteurs de

prédisposition et se définit par diverses méthodes détaillées ci-après.

- Validation de la carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain.

### 3.1-Préparation de données

#### 3.1.1-Collecte des données et réalisation des bases de données spatiales sous SIG

La collecte et la construction d'une base de données spatiales constitue la première et la principale étape de la cartographie de la susceptibilité et de l'aléa de « *mouvements de versant* ».

Les cartes de susceptibilité ou d'aléa présentent d'importantes différences de précision et de fiabilité en fonction de la disponibilité des données d'entrée qui peuvent être qualitatives ou quantitatives. La qualité et la précision du résultat final sont intimement liées à la qualité et la quantité des données d'entrées.

Les données nécessaires pour évaluer et cartographier l'aléa '*mouvements de versant*' dans la région de Larbâa peuvent être regroupées en deux catégories de variables [25]: (Tableau 1)

(i) Les '*mouvements de versant*' comme variable à modéliser (VM) associées ; (ii) Les '*facteurs de susceptibilité et déclenchant*' comme variable prédictive (VP). Ces données ont été collectées à partir de différentes sources et ont été utilisées pour générer les couches thématiques (Tableau 1).

Ces données collectées ont été intégrées et spatialisées dans une base de données (appelée Larbaa\_Data\_Base et Géo\_Map) sous un SIG en utilisant Ms Access, Map info 12, Surfer 13 et Arc Gis 9 qui permet une meilleure acquisition sous forme numérique et graphique, gestion, d'exploitation et d'analyse spatiale de données géoréférencées dans le même système projection locale de l'Algérie (UTM; WGS 1984; fuseau 31 Nord). Les couches thématiques ont été intégrées sous un maillage de 10 X 10 m. Le traitement statistique des données a été réalisé à l'aide du logiciel Excel 2016.

**Tableau 1** : Variables retenues et base de données spatiales utilisées (Larbâa\_Data Base et Géo\_Map) pour élaborer les cartes de susceptibilité dans la zone d'étude

Catégories de données	Variables	Source
Géomorphologie	Inventaire mouvements de terrain	Analyse des documents disponibles, Analyse des images satellitaires de Google Earth des années entre 2005 à 2011, Analyse des images satellitaires à haute résolution (26 cm de résolution), Interprétation des photos aériennes au 1/10 000 <sup>ème</sup> et des observations de terrain.
	Relief	Gradient de pente Exposition (Aspect) Altitude
Structure géologique	Lithologie	Analyse des cartes géologiques au 1/50 000 <sup>ème</sup> , analyse des photos aériennes au 1/10 000 <sup>ème</sup> et observations de terrain.
	Distance aux failles	
Hydrologie	Précipitation	Données des précipitations couvrant une période de 17 ans (1990 à 2007) provenant de la station météorologique de Larbaa de l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques [3]
	Distance au réseau hydrographique	
Occupation du sol	Occupation du sol	Analyse des documents disponibles, Analyse des images satellitaires de Google Earth des années entre 2005 à 2011, Analyse des images satellites à haute résolution (26 cm de résolution), Interprétation des photos aériennes au 1/10 000 <sup>ème</sup>
Anthropie	Distance au réseau routier	

#### 3.1.2 Cartographie d'inventaire des glissements de terrain

L'analyse de la susceptibilité et de l'aléa de « *mouvements de versant* » nécessite une bonne connaissance des phénomènes

d'instabilité. La carte d'inventaire présente la distribution spatiale et les caractéristiques des phénomènes (type de phénomène, âge, état d'activité, période de retour, leur activité et les mécanismes, etc.). La carte d'inventaire peut

ainsi être considérée comme une forme élémentaire de susceptibilité ou d'aléa.

La carte d'inventaire détaillée des glissements de terrain dans la zone d'étude a été établie à l'échelle de 1:10 000 sur la base de (Tableau 1): (i) l'analyse et l'interprétation des images satellitaires de Google Earth pour différentes périodes (2005-2018); (ii) l'analyse et l'interprétation de photographies aériennes prises en 1984, 2000 et 2008 aux échelles de 1/20 000, 1/20 000 et 1/10 000 respectivement; (iii) l'analyse fine des formations géologiques, leurs caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques et (iv) vérification et complément par des travaux de terrain.

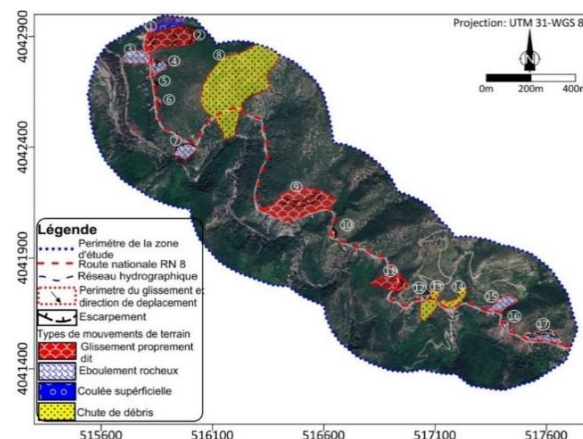
La carte d'inventaire des glissements de terrain montre la répartition spatiale des différents types de glissements de terrain et leurs caractéristiques géométriques (comme la taille, les extensions, la surface, le périmètre, l'angle moyen de la pente et la profondeur approximative de la rupture), caractéristiques géologiques (les discontinuités, fracturation, fissures de tension et la lithologie concernée), les mécanismes de rupture, la couverture terrestre, les caractéristiques géotechniques (altération, friabilité), etc.

Dix-sept (17) mouvements de terrain ont été identifiés et cartographiés dans le site d'étude. Ils sont numérotés de 1 à 17 et présentés sur la carte d'inventaire (Fig. 5). Le périmètre du glissement de terrain couvre environ une surface de 0,18189km<sup>2</sup> (18.189 ha), ce qui représente 10.57 % (1,719 km<sup>2</sup>) du périmètre total de la zone d'étude. Les mouvements de versant cartographiés sont classés selon la classification proposée par Varnes [28] en glissements proprement dit d'une superficie de 53900 m<sup>2</sup> (29,65 %), en coulées de 4760 m<sup>2</sup> (2,60 %), en éboulements de 31060 m<sup>2</sup> (17,10 %), en chutes de débris et chutes de blocs de 92130 m<sup>2</sup> (50,65 %). La taille du plus grand mouvement est d'environ 77500 m<sup>2</sup> tandis que le plus petit couvre une surface de 400 m<sup>2</sup>.

Pour l'évaluation de la susceptibilité et de l'aléa de « mouvements de versant », la carte d'inventaire des glissements de terrain a été divisée (échantillonnée) en deux sous-ensembles distincts : un ensemble de données de modélisation (80 %) a été utilisé pour construire des modèles de glissement de terrain et un ensemble de données d'essai (20 %) a été

utilisé pour valider le modèle (Chung et Fabbri 2003, 2008).

La Fig.5 montre la distribution spatiale des différents types de mouvements de versant drapé sur une image satellitaire.



**Fig.5** : Carte d'inventaire des glissements de terrain de la zone d'étude sur une image satellitaire de Google Earth.

### 3.1.3-Cartographie des facteurs de susceptibilité et de déclenchements des mouvements de terrain

L'analyse de l'inventaire des glissements de terrain a identifié et décrit les principaux facteurs de prédisposition (variable prédictive) à introduire dans le modèle statistique afin d'évaluer et de cartographier la susceptibilité aux mouvements de terrain. Sept facteurs de causalité possibles (Fig.3) incluant la pente, l'aspect, l'altitude, la lithologie, la distance au réseau de drainage, la distance aux failles et la distance au réseau routier ont été identifiés, analysés et des couches thématiques ont été dérivées et préparées principalement à partir (Tableau1) : (i) des bases de données nationales disponibles (cartes géologiques, carte topographique nationale, MNT), des données des précipitations; (ii) des analyses des photographies aériennes et d'images satellites de Google Earth et (iii) des enquêtes de terrain. Les couches thématiques générées dans le logiciel SIG ont été ré-échantillonnées dans une grille de 10 m x 10 m afin de faciliter le calcul et la modélisation.

#### 1-La carte lithologique

L'occurrence du glissement de terrain est étroitement liée à la lithologie et aux variations des propriétés des matériaux. Dans cette étude,

la lithologie peut être classée en sept catégories, comme le montre la Fig.6a. Le pourcentage de densité des mouvements de terrain dans chaque catégorie de lithologie est indiqué sur le Tableau 2. La densité des mouvements de terrain (éboulement, chutes de blocs et chutes de débris) est la plus élevée dans les calcaires du Crétacé inférieur.

## 2-La carte des pentes

Le gradient de la pente est un facteur de contrôle important dans la stabilité de la pente. Plus la pente augmente, plus la probabilité d'instabilité augmente. La carte du gradient de la pente de la zone d'étude a été divisée en quatre catégories de pentes (Fig.6b).

Le pourcentage de densité des mouvements de terrain dans chaque catégorie de pente est indiqué sur le Tableau 2. La densité des glissements de terrain est la plus élevée dans la catégorie supérieure à 40°, suivie par les catégories 30°- 40°, et 20°- 30°. Cela signifie une bonne corrélation entre la pente et la susceptibilité aux mouvements c.-à-d. que la susceptibilité augmente avec l'augmentation de la pente.

## 3-La carte d'aspect

L'aspect peut être défini comme la direction de la pente descendante du taux maximum de changement d'élévation, de 0 à 360°. L'aspect d'une pente est également considéré comme un facteur important qui peut influencer indirectement la susceptibilité aux mouvements de terrain car il contrôle l'exposition à plusieurs conditions climatiques telles que l'exposition au soleil, l'intensité des précipitations et la rétention d'humidité ainsi que la couverture végétale. Dans la zone d'étude, la carte d'aspect a été classée en quatre classes (Fig.6c).

Le pourcentage de densité des mouvements de terrain dans chaque classe d'aspect de pente est indiqué sur le Tableau 2. Il est clair que, sur l'aspect Nord, le pourcentage de mouvements de terrain est relativement faible et qu'il augmente avec l'angle d'orientation atteignant le maximum sur l'aspect Sud et Sud-Ouest. D'après les données de la zone d'étude, les pentes orientées Sud et Sud-Ouest sont plus affectées par les précipitations.

## 4-La carte d'altitude

L'altitude est également considérée comme un autre facteur important dans la stabilité des pentes. Habituellement, l'altitude est associée aux mouvements de terrain en raison d'autres facteurs tels que la pente, l'érosion, les précipitations, les types de sol et l'occupation des sols. Selon la carte d'élévation obtenue, la zone d'étude a été classée en quatre classes (Fig.6d). Le pourcentage de densité des mouvements de terrain dans chaque classe d'altitude est indiqué sur le Tableau 2. La densité augmente avec l'augmentation de l'altitude avec une valeur plus élevée enregistrée dans la classe de 500-600 m.

## 5-Carte de la distance au réseau de failles

Les structures tectoniques, telles que les failles, sont généralement associées à de vastes zones fracturées et à des anomalies de relief abruptes qui présentent des conditions favorables aux glissements de terrain. C'est pourquoi les principales discontinuités structurelles produites par les failles et les fractures ont été incluses comme paramètre dans cette étude.

Par conséquent, une fonction de distance a été appliquée pour créer des zones tampons, à une distance de 50 m autour de la faille/fracture et des catégories de structures tampons ont été définies (Fig.6e). La densité des mouvements de terrain pour chaque catégorie est indiquée dans le Tableau 2.

## 6-La carte de la distance aux réseaux routiers

La distance par rapport aux routes a été considérée comme l'un des facteurs anthropiques les plus importants qui influencent les mouvements de terrain, car les coupes de routes, les excavations importantes, l'application de charges externes et l'enlèvement de la végétation sont des actions les plus courantes qui ont lieu le long des pentes du réseau routier, pendant leur construction et sont généralement les sites qui induisent l'instabilité [5].

Dans cette étude, une carte des distances par rapport aux routes (Fig.6f) a été établie en utilisant les cinq catégories de tampons définies. La densité des mouvements de terrain pour chaque classe de distance a été calculée et le résultat a montré qu'il y a une



bien influence des routes comme l'illustre le Tableau 2. Les résultats montrent bien que la densité augmente quand la distance est proche de la route.

### 7-La carte des distances au réseau hydrographique

L'érosion fluviale au pied des pentes est l'un des facteurs occasionnels les plus courants des glissements de terrain qui peuvent provoquer l'effondrement des berges en raison du sapement des pentes, en particulier dans les zones au relief morphologique intense et au réseau de drainage dense avec les vallées profondes. Ces cas sont principalement observés le long des cours d'eau. La distance par rapport aux rivières est donc considérée comme un facteur important dans la caractérisation des zones susceptibles. Une carte de la distance par rapport aux réseaux hydrographiques (Fig.6g) a été produite afin d'évaluer l'influence des réseaux de drainage sur les occurrences de glissements de terrain. Le Tableau 2 montre qu'il y a une tendance claire qui montre que les endroits proches des rivières ont augmenté l'activité des glissements de terrain.

### 8-La carte des précipitations

Les précipitations sont largement considérées comme le principal facteur de déclenchement des mouvements de terrain. Une carte des précipitations annuelles moyennes établie par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques [2] en 2005 montre que la zone d'étude ne présente pas une variation des précipitations. Pour cela, la carte de précipitations moyenne annuelle de la zone n'est pas présentée.

### 3.2-Évaluation et cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain

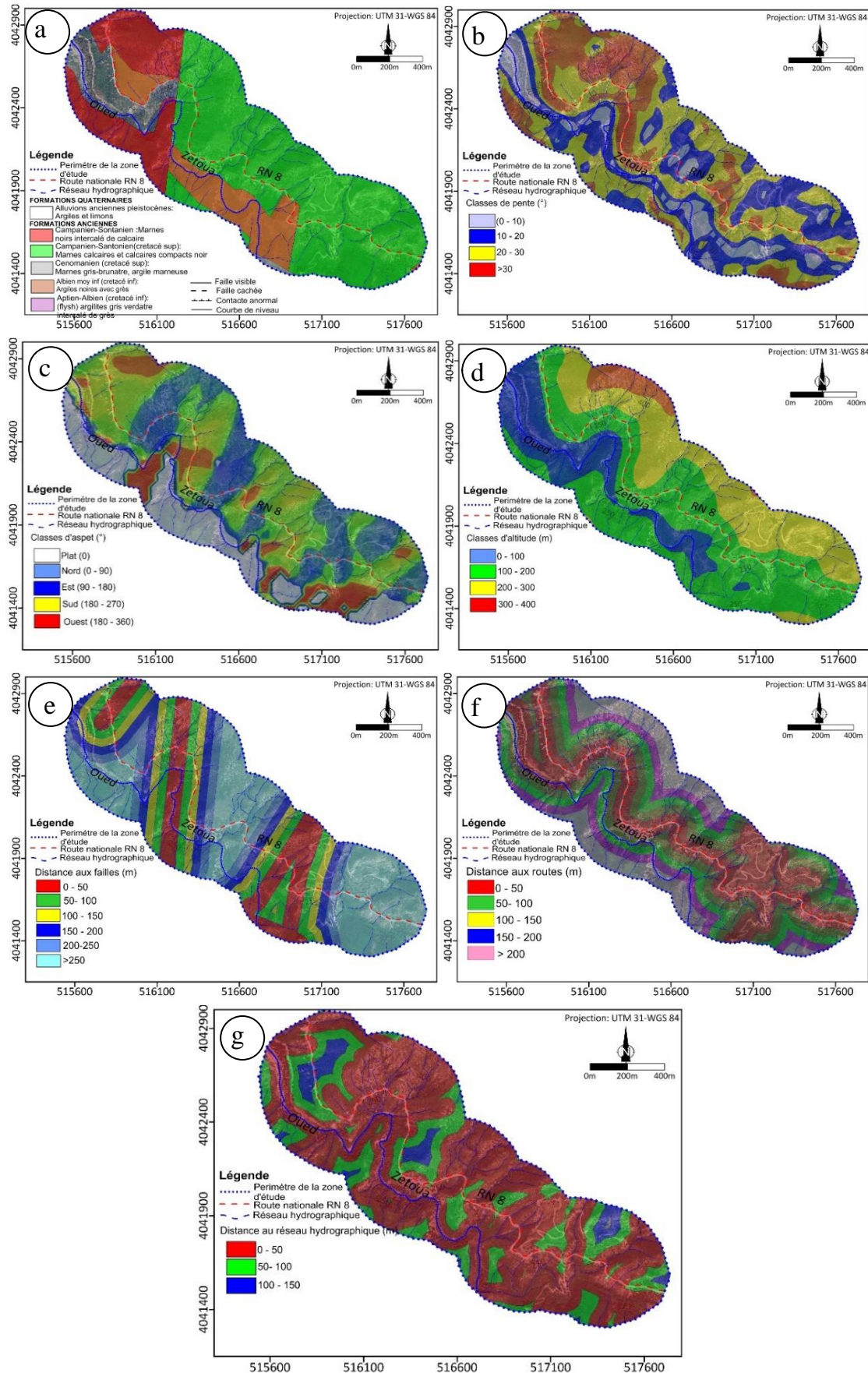
L'évaluation et la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la zone d'étude a été réalisée par l'utilisation du modèle probabiliste simples, le rapport de fréquence (FR) sous techniques SIG. Cette méthode est l'une des plus courantes appliquées dans le domaine des géosciences, en particulier pour l'évaluation de la

susceptibilité aux mouvements de terrain. Elle est basée sur l'identification d'une relation statistique entre la distribution des glissements de terrain (passés et présents) et chaque facteur de prédisposition. Le principe est le même : la distribution spatiale des phénomènes est comparée aux différents facteurs. Par différents algorithmes, une pondération pour chaque facteur est obtenue. Les pondérations sont définies de manière objective, sans intervention de l'expert. Les résultats sont alors appliqués aux zones encore stables mais susceptibles de connaître une rupture future [7, 8].

La méthode FR est la technique bivariée la plus simple à mettre en place permettant d'établir une relation spatiale entre les phénomènes observés et chaque facteur contributif. Le FR est le rapport entre le pourcentage de glissements de terrain dans la classe et le pourcentage de la surface dans la classe. Dans l'analyse des relations, le rapport est celui de la zone où les glissements de terrain se sont produits par rapport à la zone totale, de sorte qu'une valeur de un est une valeur moyenne. Si la valeur est  $> 1$ , cela signifie une corrélation élevée et une valeur inférieure à 1 signifie une corrélation plus faible. L'indice de susceptibilité aux glissements de terrain (Land Slide Susceptibility Index - LSI) est calculé par la somme de chaque valeur du rapport des facteurs comme dans l'équation (1) :

$$LSI = Fr_1 + Fr_2 + Fr_3 + \dots + Fr_n \quad (1)$$

Pour pouvoir calculer le rapport de fréquence de chaque classe de chaque facteur de susceptibilité et extraire les données ou les valeurs de chaque facteurs prédicteurs des couches raster, on a généré un réseau de maillage de 10 X 10m par l'utilisation des techniques du SIG (Map Info). Une fois que le maillage est créé toutes les données de chaque facteur prédicteur et des mouvements de terrain sont intégrées. En utilisant les données de modélisation, les rapports de fréquence de la classe de chaque facteur ont été calculés à partir de leur relation avec les mouvements de terrain. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.



**Fig.6** : Facteurs de susceptibilité aux mouvements de terrain dans la zone d'étude : a) Carte lithologique, b) Carte des pentes, c) Carte d'aspect, d) Carte d'altitude e) Carte de la distance aux failles, f) Carte de la distance au réseau routier et g) Carte de la distance au réseau hydrographique

### 3.3-Validation de la carte de susceptibilité aux glissements de terrain

Pour vérifier la qualité (fiabilité) ou la performance et valider les cartes de susceptibilité, deux méthodes ont été utilisées dans la littérature [13, 31]: (i) la courbe du taux de succès ROC (*Receiver Operating Characteristic*) et (ii) les règles statistiques.

La précision de la carte produite et la validation du modèle ont été effectuées en comparant les données connues sur la localisation des glissements de terrain avec la carte de susceptibilité (Fig.8).

La courbe ROC est l'une des techniques statistiques qui peuvent être utilisées pour fournir la capacité performance de chaque modèle à prédire les instabilités de terrain et pour comparer les différents modèles. 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 soit classé comme positif. La surface ou l'aire sous la courbe de prévision AUC caractérise la qualité d'un système de prévision en décrivant la capacité du système à anticiper correctement l'occurrence ou la non-occurrence d'un "événement" prédéfini [13, 32]. La relation quantitative-qualitative entre la AUC et la précision des prévisions peut être donnée comme suit : (0,5-0,6) mauvaise; (0,6-0,7) moyenne; (0,7-0,8) bonne; (0,8-0,9) très bonne et (0,9-1) excellente [31].

## 4-Résultats

### 4.1-Calcul et interprétation des valeurs du rapport de fréquence

L'application de la méthode du rapport de fréquence a été réalisée en suivant l'équation 1 des paragraphes précédents. L'évaluation repose sur le calcul de la densité du phénomène par facteur. Pour chaque facteur prédisposant, la densité du mouvement de terrain dans chaque classe de chaque facteur est évaluée. En utilisant l'équation du modèle FR, les valeurs des facteurs de pondération de chaque couche ont été déterminées afin de

générer la carte finale de la susceptibilité par addition des facteurs pondérés. La carte résultante a été reclassée en divisant le nombre total d'éléments (valeur du facteur de pondération), principalement, en cinq classes distinctes selon la méthode de l'écart type : susceptibilité faible, modérée, élevée et très élevée.

Selon les résultats de calcul des FR présentés dans le tableau 2, les caractéristiques lithologiques de la zone d'étude constituent un facteur important dans l'occurrence des mouvements de terrain. La classe de calcaire du Crétacé inférieur est plus susceptible et présente des rapports de fréquence plus élevés. L'angle de pente fait partie des causes de glissement car il est fortement lié aux forces impliquées. Les classes ( $>40^\circ$ ) présentent la valeur la plus élevée de FR (2,926). Les analyses de l'exposition des pentes montrent que la plupart des glissements se sont produits dans la direction Sud et Sud-Ouest. La variation de la végétation dans une zone donnée est un paramètre qui affecte sérieusement les ruptures de pente, et la susceptibilité aux glissements diminue avec la présence de végétation dégradée.

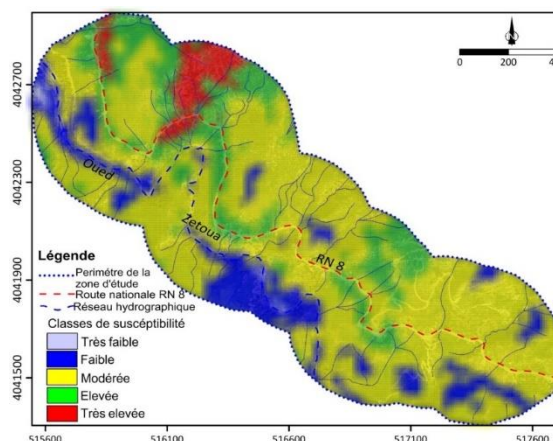
Pour les distances au réseau hydrographique, au réseau routier et au réseau de faille, les valeurs FR indiquent une forte probabilité d'occurrence de mouvements de terrain pour les distances comprises entre 0 et 50 m. Les résultats montrent que plus la distance au réseau hydrographique, au réseau routier et au réseau de faille augmente, plus la fréquence des mouvements de terrain diminuent. Cela signifie que la probabilité de mouvements de terrain augmente avec la distance aux oueds, aux routes et aux failles.

Enfin, les FR de chaque classe de facteur sont additionnés pour obtenir l'indice de susceptibilité aux mouvements de terrain LSI en utilisant l'Eq. (1). Le LSI a été classé en cinq classes de susceptibilité : très faible (3,329- 3.761), faible (3.761-5.379), modérée (5.379- 8.215), forte (8.215-10.233) et très forte (10.233-16.391).

**Table 2:** Les valeurs des rapports de fréquence des facteurs de susceptibilité aux mouvements de terrain

Facteurs	Classes	% de la zone totale (a)	% de la zone de glissements (b)	Rapport de Fréquence (b/a)
Lithologie	q5	9,556	8,607	0,900
	C5-4	17,791	38,109	<b>2,142</b>
	C5-3	57,592	44,847	0,778
	n6-5b	14,613	8,437	0,577
	C1	0,448	0,000	0
Pente (°)	0 - 10	9,911	1,359	0,137
	10 - 20	20,805	5,096	0,245
	20 - 30	34,167	27,350	0,800
	30 - 40	24,879	36,240	1,457
	>40	10,237	29,955	<b>2,926</b>
Aspect	Plat	0,157	0,000	0,000
	Nord	19,751	0,000	0,000
	Sud	16,561	35,957	<b>2,171</b>
	Sud-Ouest	48,734	55,323	1,135
	Nord	14,797	8,720	0,589
Distance aux réseaux hydrographiques (m)	0 - 50	73,451	82,050	<b>1,117</b>
	50 - 100	21,585	16,818	0,779
	100 -150	4,906	1,133	0,231
	>150	0,058	0,000	0,000
Distance aux routes(m)	0 - 50	32,195	42,469	<b>1,319</b>
	50 - 100	22,179	23,499	1,060
	100 -150	17,296	13,307	0,769
	150-200	12,862	10,362	0,806
	>200	15,469	10,362	0,670
Distance aux failles (m)	0 - 50	17,087	29,558	<b>1,730</b>
	50 - 100	13,979	24,858	<b>1,778</b>
	100 -150	12,088	12,288	1,017
	150-200	11,575	5,379	0,465
	200-250	10,214	5,719	0,560
Altitude	250-300	35,023	21,914	0,626
	200 - 300	15,550	5,663	0,364
	300 - 400	47,978	40,544	0,845
	400 - 500	30,408	36,127	1,188
	>500 - 600	5,535	13,986	<b>2,527</b>

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes pour diviser les poids de valeurs en classes, telles que la méthode de l'écart type, la méthode d'égal intervalle et la méthode de la rupture naturelle [5, 30]. La méthode de l'écart-type est appropriée et utilisée dans cette étude en raison de la distribution normale des valeurs de LSI. Cette méthode utilise la valeur moyenne pour générer des classes et nous a permis de diviser le résultat en cinq catégories en ajoutant ou en soustrayant un écart-type à la fois. La carte de la susceptibilité aux mouvements de terrain résultante est présentée dans la Fig.7. Elle montre la répartition de 5 classes de susceptibilité définies comme présenté dans le Tableau 3.

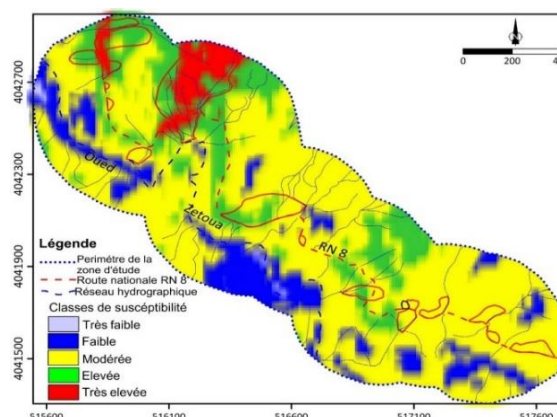
**Fig. 7 :** Carte de susceptibilité aux mouvements de terrain obtenue par la méthode de FR.

**Tableau 3:** Classes de susceptibilité aux mouvements de terrain obtenues et règles associées.

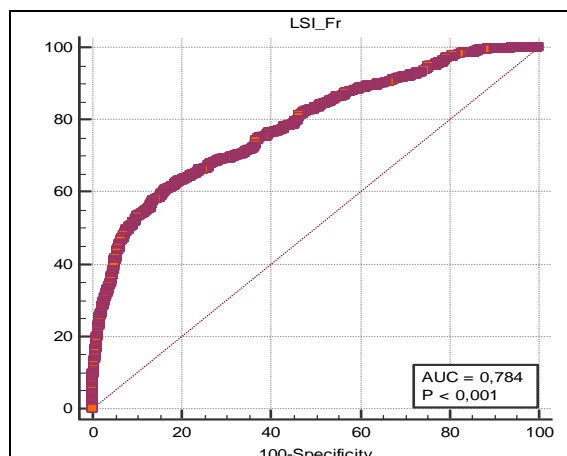
Classe de Susceptibilité	Définition
<i>S1 : Susceptibilité nul à très faible</i>	<i>Aucune possibilité de déclenchement d'un mouvement de versant</i> Les conditions environnementales locales contribuent à renforcer la stabilité des terrains. Zones non exposées ou très faiblement exposées aux mouvements de terrain. La zone est caractérisée par un gradient de pente nul à faible qui varie de 0 à 5°, un réseau hydrographique de densité très faible, le sol est drainé. Les formations géologiques dominantes sont les alluvions récentes du Quaternaires. La zone se localise dans la partie basse de l'oued Zetoua à l'ouest du site d'étude.
<i>S2 : Susceptibilité faible</i>	<i>Possibilité faible de déclenchement d'un mouvement de versant</i> Les conditions environnementales locales (association d'un gradient de pente faible à modéré (5-10°), d'un réseau hydrographique de faible densité, un sol bien drainé) sont <u>faiblement</u> favorables au déclenchement de mouvements de terrain. La zone est caractérisée, par endroits, par la présence locale de rupture de pente qui pourraient conduire à la déstabilisation. Ce sont des zones peu concernées par les mouvements de versant de types superficiels : les quelques phénomènes qui peuvent survenir sont de faible ampleur. Les formations géologiques concernées sont essentiellement les alluvions récentes et anciennes du quaternaires le long des berges de l'oued Zetoua. La zone se localise dans la partie basse sud du site d'étude le long de vallée de l'oued Zetoua.
<i>S3 : Susceptibilité modérée</i>	<i>Possibilité modérée de déclenchement d'un mouvement de versant</i> Les conditions environnementales locales sont <u>favorables</u> au déclenchement de mouvements de terrain (association d'un gradient de pente modéré à fort (10-20°), de sols nus et naturels, d'un réseau hydrographique dense, de présence de ruptures de pentes et de bossellements, d'espaces forestiers non entretenus, de sols faiblement dégradés, d'absence de dispositif de drainage. Ce sont des zones à fréquents indices d'instabilités, qui peuvent être régulièrement affectées par des glissements d'ampleur modérée et, exceptionnellement, peuvent évoluer en éboulements ou glissement de grande ampleur. Il s'agit soit de zones de pente moyenne avec présence d'une formation géologique ou une occupation du sol défavorable (forte altération, dégradation du sol fréquente, fracturation, non maîtrise des écoulements d'eau, etc.) soit des zones de pente forte avec des formations géologiques favorables aux glissements de terrain et éboulements, écroulement, soit encore des zones soumises à la propagation de glissements mais d'ampleur limitées. Les terrains dominants sont essentiellement les marnes et calcaire du Crétacé supérieur. Plusieurs types de versants ont été retenus : les versants sous forêts, le long de la RN 8. Tout projet d'aménagement devra être précédé d'une étude géotechnique spécifique, détaillée (étude de stabilité d'ensemble du site) afin de pouvoir dégager les dispositifs de protection adéquats devant être mis en œuvre avant la construction.
<i>S4 : Susceptibilité élevée à très élevée</i>	<i>Possibilité forte de déclenchement d'un mouvement de versant</i> Les conditions environnementales locales sont <u>très favorables</u> au déclenchement de glissement de terrain avec un gradient de pente supérieur à 20°, d'un réseau hydrographique très dense notamment au niveau des versants abrupts, fracturés, ravinés avec présence d'éboulements, de chutes de blocs, de chutes de débris et de glissements de terrain. L'occupation du sol se traduit par des sols nus, altérés ; la forêt participe peu à la stabilisation du sol. Il s'agit de zones instables de forte susceptibilité où des mouvements de terrain sont avérés. Les formations géologiques concernées sont essentiellement les marnes et argiles saturées, altérées et décomprimées et des calcaires friables et fracturés. Les mouvements de versant induits par les terrassements et leur extension renforcent l'idée d'une susceptibilité forte sur ces versants.

#### 4.2-Validation des résultats

Dans la région d'étude, la courbe ROC a été obtenue en comparant le nombre de pixels de la zone de glissement de terrain (2558 pixels de glissement de terrain) représentant 20% des données d'essai avec la carte de susceptibilité et l'aire sous les courbes a été calculée (Fig. 8). La Fig.9 montre la courbe ROC pour le modèle de glissement de terrain. Les résultats de la validation ont montré que le modèle Fr (78.40 %) montre une assez bonne précision dans la prédiction de la susceptibilité aux mouvements de terrain dans la zone d'étude.



**Fig.8:** Superposition de la carte de susceptibilité et la carte d'inventaire aux mouvements de terrain pour validation de la carte de susceptibilité obtenue

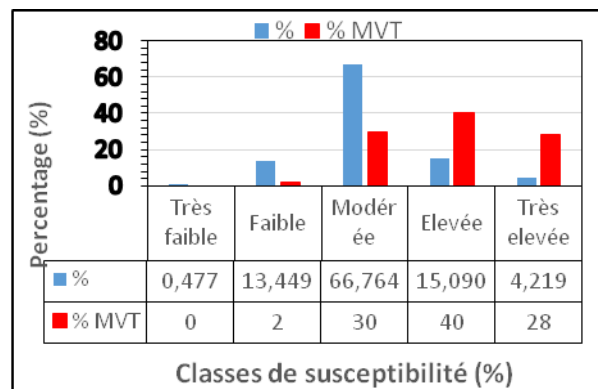


**Fig.9:** Courbes ROC représentant la qualité du modèle utilisé (FR).

La carte de susceptibilité résultante a également été vérifiée et confirmée en utilisant les deux règles statistiques. Les pourcentages de mouvements de terrain dans les cinq classes de susceptibilité ont été déterminés et présentés dans la Fig.10. Cette dernière montre bien que le plus grand pourcentage de mouvements de terrain était réparti dans la classe de susceptibilité élevée et très élevée et que le plus petit pourcentage des mouvements de terrain était située dans les classes de susceptibilité faible et très faible.

La Fig.10 montre que les classes de susceptibilité élevée et très élevée contiennent 40 à 28 % des zones de mouvements actifs, tandis que les zones modérées donnent 30 % des zones de mouvements actifs et qu'environ 2 % des zones de mouvements actifs coïncident avec la classe de faible susceptibilité. Les zones de très faible susceptibilité contiennent 0 % des zones de mouvements actifs. Les résultats montrent clairement que les pourcentages de mouvements de terrain augmentent effectivement de très faible à très forte susceptibilité et que la classe de forte susceptibilité ne couvre que de petites zones.

La carte de susceptibilité générée par la méthode FR contient 0.5 % et 13 % de la zone totale qui est désignée comme étant de très faible et de faible susceptibilité respectivement. Les classes de susceptibilité modérée, élevée et très élevée représentent respectivement 30 %, 40 % et 28 % de la surface totale.



**Fig.10 :** distribution relative des différentes classes de susceptibilité aux mouvements de terrain et zones de mouvements de versant actifs appartenant aux différentes classes

### 5-Conclusion

Le présent travail expose les résultats de la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain réalisé à l'échelle de 1/10 000 pour les falaises et versants rocheux de la route nationale RN 8, au Sud-Est de la ville de Larbâa. La démarche repose, en complément d'un zonage de type « expert », sur la méthode d'analyse spatiale probabiliste par SIG fondée sur le modèle de rapport de fréquence (FR). L'approche est basée sur l'analyse de la relation spatiale entre les facteurs de prédisposition qui ont généré de tels processus dans le passé et les mouvements de terrain. Les résultats obtenus à partir de cette étude peuvent constituer un outil fondamental d'aide aux services concernés afin d'assurer la sécurité du trafic routier menacé par les instabilités et de réduire les risques associés à ces phénomènes

Premièrement, une carte d'inventaire des mouvements de terrain a été préparée sur la base de l'analyse et de l'interprétation des images satellitaires de Google Earth /des photos aériennes, des données d'archives complétée par des observations de terrain. Le périmètre des mouvements de terrain couvre environ une surface de 0,18189 km<sup>2</sup> (18.189 ha), ce qui représente 10.57 % du périmètre total de la zone d'étude. Les mouvements de versant cartographiés sont classés en quatre types : (i) les glissements proprement dits couvrent une superficie de de 29.65 %, (ii) coulée représente 2.6 %, (iii) les éboulements couvrent 17,10 % et (iv) les chutes de débris et de blocs représentent 50,65%.



Deuxièmement, sept facteurs de causalité possibles incluant la pente, l'aspect, l'altitude, la lithologie, la distance au réseau de drainage, la distance aux failles, la distance au réseau routier, ont été identifiés, analysés et considérés pour l'occurrence spatiale des phénomènes. Troisièmement, l'évaluation et la cartographie de la susceptibilité ont été réalisées en utilisant le modèle de fréquence FR fondé sur les SIG. L'évaluation par l'application de cette méthode consiste à définir les relations entre les facteurs responsables de l'occurrence des mouvements de terrain et leur distribution spatiale. Quatrièmement, la carte de susceptibilité établie a été validée après vérification de sa qualité de fiabilité ou performance en utilisant les deux règles statistiques : (i) les pourcentages de mouvement de terrain augmentent avec l'augmentation du degré d'aléa avec un grand pourcentage observé de mouvements de terrain devrait appartenir à la classe d'aléa élevé et (ii) la classe d'aléa élevé devrait couvrir seulement une petite zone.

La carte de susceptibilité générée par la méthode FR contient 0.5 % et 13 % de la zone totale qui est désignée comme étant respectivement de très faible et de faible susceptibilité. Les classes de susceptibilité modérée, élevée et très élevée représentent respectivement 30 %, 40 % et 28 % de la surface totale. L'examen de la carte d'inventaire des mouvements de terrain et de susceptibilité obtenue a permis le repérage des zones instables dont on a défini, pour chacune d'elles, le degré d'aléa et l'urgence des traitements (surveillance, protection et confortement).

La carte ainsi établie peut servir d'outil d'aide à la décision en matière de sécurité du trafic routier permettant une meilleure prise en compte de l'aléa de mouvement de terrain dans les perspectives du développement urbain et économique et de réduire les risques associés à ces phénomènes.

## Références bibliographiques

- [1] ANGCM (2009), *Carte géologique de Tablat à l'échelle de 1/50 000*
- [2] A.N.R.H Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, *carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (2 feuilles, une*

*notice de 49 p.)*, Ministère de l'Équipement, Alger, Ed. I.N.C, 2005.

[3] ANRH Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, *Inventaire des données de précipitation et de température de la région de Blida (Précipitations et températures mensuelles et annuelles pour les périodes 1990-2007)*, 2020.

[4] Aleotti P., Chowdhury, R., *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives*. Bull. Eng. Geol. Environ., 58:21–44 1999. <https://doi.org/10.1007/s100640050066>

[5] Ayalew, L., Yamagishi, H., The application of GIS-based logistic regression for susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65 (1–2), 15–31 2005.

[6] Blès, J.L., *Etude tectonique et microtectonique d'un massif autochtone tellien et de sa couverture de nappe : le Massif de Blida (Algérie du Nord)*. Bull. Soc. Géol. France, (7), t. XIII, n°5-6, p. 498-511. 1971.

[7] Bourenane, H., Bouhadad, Y., Guettouche, M.S., Braham, M., *GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria)*. Bulletin Engineering Geology and Environment. 2014. DOI 10.1007/s10064-014-0616-6

[8] Bourenane, H., Guettouche, M.S., Bouhadad, Y., Braham, M., *Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weights factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods*. Arabian Journal of Geoscience. 2016. DOI 10.1007/s12517-015-2222-8

[9] Bourenane Hamid, Braham Massinissa, Bouhadad Youcef, Meziani Aghiles, *A Spatial distribution, controlling factors and failure mechanisms of the large-scale landslides in the urban area of Azazga city (northern Algeria)*. Environ Earth Sci 80, 3132021a. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09607-5>

[10] Bourenane Hamid, Bouhadad Youcef, *Impact of land use changes on landslides*

*occurrence in urban Area: The Case of the Constantine City (NE Algeria)*. Geotech. Geol. Eng., 2021. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01768-1>

[11] Bourenane Hamid, Meziani Aghiles , Ait Benamar Dalila (2021b), *Application of GIS-based statistical modeling for landslide susceptibility mapping in the city of Azazga, Northern Algeria*. Bull. Eng. Geol. Environ., 2021. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02386-0>

[12] Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. *GIS technology in mapping landslide hazard*. In Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.), *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 135–176. 1995

[13] Chung, C.F., Fabbri, A.G., *Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping*. Natural Hazards, 30, 451–472. 2003.

[14] Demir, G., Aytakin, M., Akgun, A., *Landslide susceptibility mapping by frequency ratio and logistic regression methods : an example from Niksar-Resadiye (Tokat, Turkey)*. Arab J Geosci. 2015. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1332-z>

[15] Demir, G., *Landslide susceptibility mapping by using statistical analysis in the North Anatolian Fault Zone (NAFZ) on the northern part of Suşehri Town. Turkey* Nat Hazards 92:133–154. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3195-1>

[16] Djerbal, L., Melbouci, B., *Le glissement de terrain d'Ain El Hammam (Algerie): causes et évolution*. Bull. Eng. Geol. Environ., 71:587–597. 2012. <https://doi.org/10.1007/s10064-012-0423-x>

[17] Djerbal, L., Khoudi, I., Alimrina, N., Melbouci, B., Bahar, R., *Assessment and mapping of earthquake-induced landslides in Tizirt City. Algeria* Natural Hazards 87(3):1859–1879. 2017. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2831-5>

[18] Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali M., Reichenbach P., *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central*

*Italy*. Geomorphology 31:181–216. 1999. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00078-1)

[19] Lee S., Min K., *Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin, Korea*. Env.Geol. 40,1095–1113. 2001. <https://doi.org/10.1007/s002540100310>

[20] Ozdemir A., Altural T., *A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for land slide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey*. 2012. J Asian Earth Sci. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2012.12.014>

[21] Pradhan B., Lee S., *Delineation of landslide hazard areas using frequency ratio, logistic regression and artificial neural network model at Penang Island, Malaysia*. Environ. Earth Sci. 60:1037–1054. 2010. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0245-8>

[22] Pourghasemi H.R., Pradhan B., Gokceoglu C., *Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran*. Nat Hazards 63(2):965–996. 2012.

[23] Riheb H., Abderrahmane B., Yacine L., Mustapha B., El Madjid A., CcAD, *Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria*. Quat Int 302(2013):224–237. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.11.027>

[24] Shahabi H., Ahmad B.B., Khezri S., *Evaluation and comparison of bivariate and multivariate statistical methods for landslide susceptibility mapping (case study: Zab basin)*. Arab. J. Geosci., 2012. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0650-2>

[25] Soeters, R., van Westen, C.J., *Slope instability, recognition, analysis, and zonation*. In Turner, A.K., Schuster, R.L., (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation*, Transportation Research Board, Special Report 247. 1996. National Research Council, Washington, 129–177.





[26] Thiery Y., Malet J.P., Sterlacchini S., Puissant A., Maquaire O., *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: application to a complex mountainous environment*. *Geomorphology*, 9 (1-2), 38-59. 2007.

[27] Van Westen, C.J., Van Asch, T.W.J., Soeters R., *Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, 167–184. 2006.

[28] Varnes D.J., *Landslide Hazard Zonation, a review of principles and practice*. IAEG Commission on Landslides. 1984. UNESCO, Paris, 63 p.

[29] Vila J.M., *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens*, PhD thesis, Paris VI Univ. 1980.

[30] Yalcin A., Reis S., Aydinoglu A.C., Yomralioglu T., (2011). A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *CATENA* 85:274–287. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.01.014>

[31] Yesilnacar E., Topal T., *Landslide susceptibility mapping: a comparison of logistic regression and neural networks methods in a medium scale study, Hendek region (Turkey)*. *Eng. Geol.* 79(3–4) 2005. 251–266. [doi:10.1016/j.enggeo.2005.02.002](https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.02.002);

[32] Zhou G., Esaki T., Mitani Y., Xie M., Mori J., *Spatial probabilistic modeling of slope failure using an integrated GIS Monte Carlo simulation approach*(2003). *Eng. Geol.* 68:373–386. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(02\)00241-7](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(02)00241-7)