

N°d'ordre

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Université d'Oran 2
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master « L.M.D »
En Sciences de la Terre
Option : Risques géologiques

Cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires,
comparaison entre les anciennes méthodes et les nouvelles
approches.

-Cas de la frange maritime d'Oran-Est, Nord-Ouest de l'Algérie-

Présentée et soutenue publiquement par :
Mlle : Bennama Amina

Soutenu le: 23 /09/2023 devant la commission d'examen composée de :

Mansour Hamidi	Université d'Oran2	Président
Nadji Abdelmansour	Université d'Oran2	Encadrant
Ablaoui Halima	Université d'Oran2	Examinateur
Roukh Zine El Abidine	Université d'Oran2	Co-encadreur
Bennia Ahmed	Centre des techniques spatiales d'Arzew	Invité

Année 2023/2024

Avant-propos

Avant tout nous remercions dieu qui nous a donné la patience de terminer ce travail

Mes remerciements vont, tout d'abord, à mon Co-encadreur Monsieur ROUKH ZINE EL ABIDINE de m'avoir proposé le thème de ce Mémoire. Il m'a encadré et encouragé pendant cette durée de sa réalisation en orientant ce travail jusqu'à sa réalisation.

Je remercie chaleureusement toutes les personnes qui m'ont aidé pendant l'élaboration de ma mémoire et notamment mon encadreur Monsieur le professeur NADJI ABDELMANSOUR, pour son intérêt durant la rédaction de ma Mémoire.

Je tiens à remercier mon Co-encadreur Monsieur BENNIA AHMED pour son aide indispensable pour la réalisation des cartes.

J'adresse mes remerciements à tous les responsables de CENTRE DES TECHNIQUES SPATIALES D'ARZEW ; et l'administration et à mes amis du Département des Sciences de la Terre.

Je remercie Monsieur MANSOUR HAMIDI et Madame ABLAOUI HALIMA pour avoir accepté de présider le jury.

Je ne peux pas terminer sans remercier pleinement mes Parents, ma mère et mon père pour leur sacrifices et l'éducation ; pour leur encouragements et leur patience durant toutes mes années d'étude. Mes Frères MANSOUR, SID ALI, ABDELHAQ, MILOUD, ABDEREZZAQ et ma petite sœur NESSRINE pour leur patience et leur aide inestimable. Qu'ils trouvent dans ce travail le gage de mon amour et de ma reconnaissance.

Résumé :

Ce mémoire se focalise sur la cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires, avec une étude de cas spécifique dans la frange maritime d'Oran-Est, au Nord-Ouest de l'Algérie. L'objectif principal est de comparer les approches traditionnelles aux méthodes modernes pour évaluer cette susceptibilité. Dans cette étude une cartographie d'inventaire des mouvements de terrains a été établie par l'utilisation des images satellites et des photos aériennes de haute résolution couplée par les levées de terrain et les anciens documents tels que les thèses et les documents techniques élaborés dans cette zone. Un ensemble de facteurs de prédisposition environnementale liés aux mouvements de terrain ont été utilisés afin d'évaluer le niveau de la susceptibilité à travers la région d'étude. Deux approches ont été utilisées afin d'estimer le niveau de susceptibilité, la première méthode bivariée dite Rapport de Fréquence (RF) et une autre basée sur l'utilisation de l'Intelligence Artificielle (IA) dite Régression Logistique (RL). La validation des résultats des deux cartes élaborées par les deux techniques par la courbe de ROC montre que la méthode statistique RF est la plus efficace dans la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain affectant la frange maritime. Cette étude montre l'habileté des deux approches et le SIG a estimé la répartition spatiale de la susceptibilité aux mouvements de terrain. Les résultats finaux peuvent aider les décideurs, les collectivités locales, les géologues à prendre des décisions et des solutions face à ces phénomènes.

Mots clés : mouvements gravitaires, susceptibilité, rapport de fréquence, Intelligence Artificielle, Oran, Algérie.

Abstarct

This thesis focuses on slope movement's susceptibility mapping, with a specific case study of Oran-Est Cliff, in north-west Algeria. The main objective is to compare traditional approaches with modern methods for assessing this susceptibility. In this study, a slope movement inventory map was drawn up using satellite images and high-resolution aerial photos, coupled with field surveys and old documents such as theses and technical rapports produced in the area. A range of environmental susceptibility factors related to ground movements were used to assess the susceptibility level across the study area. Two approaches were used to estimate the susceptibility level, the first one a bivariate method called Frequency Ratio (FR) and the other based on the use of Artificial Intelligence (AI) called Logistic Regression (LR). The validation of the obtained results of the two maps produced by the two techniques using the ROC curve shows that the RF statistical method is the most effective in mapping susceptibility to ground movements affecting the Oran Cliff. This study shows the ability of the two approaches and the GIS to estimate the spatial distribution of slope movement susceptibility. The final results can help decision-makers, local authorities and geologists to make decisions and find solutions to these phenomena.

Key words: Slope movement, susceptibility, frequency ratio, Artificial Intelligence, Oran, Algeria

ملخص

تركز هذه الأطروحة على رسم خرائط قابلية حركة المنحدرات، مع دراسة حالة محددة لجرف وهران الشرقي، في شمال غرب الجزائر. الهدف الرئيسي هو مقارنة الأساليب التقليدية مع الأساليب الحديثة لتقييم هذه الحساسية. في هذه الدراسة، تم رسم خريطة حصر حركة المنحدرات باستخدام صور الأقمار الصناعية والصور الجوية عالية الدقة، إلى جانب المسوحات الميدانية والوثائق القديمة مثل الأطروحات والتقارير الفنية المنتجة في المنطقة. تم استخدام مجموعة من عوامل الحساسية البيئية المتعلقة بالحركات الأرضية لتقييم مستوى الحساسية في جميع أنحاء منطقة الدراسة. تم استخدام طريقتين لتقدير مستوى الحساسية، الأولى طريقة ثنائية المتغير تسمى نسبة التردد (FR) والأخرى يعتمد على استخدام الذكاء الاصطناعي (AI) يسمى الانحدار اللوجستي (LR). إن التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها من الخريبتين المنتجتين بواسطة الطريقتين باستخدام منحنى ROC يوضح أن الطريقة الإحصائية RF هي الأكثر فعالية في رسم خرائط القابلية للحركات الأرضية التي تؤثر على جرف وهران. توضح هذه الدراسة قدرة الطريقتين ونظام المعلومات الجغرافية على تقدير التوزيع المكاني لحساسية حركة المنحدر. ويمكن للنتائج النهائية أن تساعد صناع القرار والسلطات المحلية والجيولوجيين على اتخاذ القرارات وإيجاد حلول لهذه الظواهر.

الكلمات المفتاحية: حركة المنحدر، القابلية، نسبة التردد، الذكاء الاصطناعي، وهران، الجزائر

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude.....	2
Figure 2 : Carte géologique du site étudié ; (Lsa) Matériaux des glissements, (Qmd1) Pléistocène marin niveau ancien, (Qc) Quaternaire Continental, (Mm) Miocène supérieur (Gourinard 1952).....	3
Figure 3 : la topographie de la zone d'étude ; (a) MNT du secteur d'étude, (b) profils en travers ; des sections [AD] in (Roukh 2020).....	4
Figure 4 : Carte piézométrique du plateau d'Oran in (Roukh 2020).....	5
Figure 5: Histogramme des Précipitations moyennes mensuelles (1983-2013)in (Roukh 2020).....	7
Figure 6 : Régime saisonnier de la station d'Oran in (Roukh 2020).....	8
Figure 7 : Histogramme des Précipitations Annuelles ; période (1983-2013) in (Roukh 2020).....	9
Figure 8: Variation des Températures Moyennes Mensuelles –Es Senia-(2000-2009) in (Roukh 2020).....	10
Figure 9: Graphe Pluviothermique, in (Roukh 2020).....	12
Figure 10 : Courbe Ombrothermique, (Roukh 2020).....	13
Figure 11 : Abaque d'indice d'aridité, (Roukh 2020).....	14
Figure 12 : Glissement plan, in (Lahmidi 2021).....	17
Figure 13 : Glissement rotationnel complexe in (Lahmidi 2021).....	18
Figure 14 : Types d'écroulement in (Lahmidi 2021).....	19
Figure 15 : Coulée boueuse, Autoroute de Taïwan ,2010, in (Achour 2017).....	20
Figure 16 : Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin, in (Achour 2017).....	21
Figure 17 : les types de mouvement de terrain selon la classification de (Cruden and Varnes 1996) (Varnes 1978). (a) Les écroulements et chutes de blocs, (b) basculement, (c) glissement de terrain rotationnel et transrotationnel, (d) coulée boueuse, (e) déplacement latéral, in (Roukh 2020).....	22
Figure 18 : classification de la vitesse des glissements de terrains selon les traits géomorphologique (Schlögel 2015) in (Roukh 2020).....	23
Figure.19 : Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain in (Lahmidi 2021).....	25
Figure 20: technique et method d'évaluation de la susceptibilité aux glissement de terrain. (in Lahmidi 2021).....	26

Figure 21 : a) carte d'inventaire des glissements de terrain, b) carte d'aléa des glissements de terrain de l'île de Hong Kong (Chau et al. 2004).....	33
Figure 22 : Carte géomorphologiques de l'aléa des mouvements de terrain (bassin versant de l'Alpago, Italie) (Van Westen et al. 2003).....	34
Figure 23 : Exemple de la cartographie par pondération de facteurs in (Thiery 2007).....	35
Figure 24 : Glissements de terrain G1 et G2, (a) vue aérienne des glissements de terrain G1 et G2 (Image DMC 0.13*0.13), (b) et (c) illustrations photographiques des conséquences directes des glissements de terrain G1 et G2.in(Roukh 2020).....	36
Figure 25 : Logs des sondages réalisés au niveau de la zone des glissements G1 et G2.in(Roukh 2020).....	38
Figure 26 : résultats inclinométriques, (a) inclinomètre INC-9, (b) inclinomètre INC-10, (c), inclinomètre INC-G, (d) inclinomètre I-5, (e)inclinomètre I- (ANA 2019).in(Roukh 2020).....	39
Figure 27 : Position des sondages réalisés pour suivre le niveau piézométrique in(Roukh2020.....	40
Figure 28 : Interprétation géologique (a) géologie de la zone G1 et G2 et tracé section des coupes géotechniques, (b) coupes interprétatives de la structure interne des glissements de terrain (frange maritime). In (Roukh 2020).....	41
Figure 29 : Glissement de terrain G3, G4 et G5 ;(a)limites des glissement de terrain et position des inclinomètres réalisés, (b) image 3D Google Earth des glissements de terrain, (c) vu du glissement de terrain de terrain G5, (d) Eboulement au sommet du G5, (e) Basculement de terrain G5. In(Roukh 2020).....	42
Figure 30: les données inclinométriques, I, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, INCSUPP12 et INCSUPP17. In (Roukh 2020).....	43
Figure 31 : données inclinométriques, I, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, INCSUPP12 et INCSUPP17 (continue) in(Roukh 2020).....	44
Figure 32 : Coupes géotechniques interprétatives de la structure interne des glissements de terrain G3, G4, G5 (in Roukh 2020).....	45
Figure 33 : carte d'inventaire des mouvement de terrain	46
Figure 34 : carte des pentes de la zone d'étude	48
Figure 35 : carte d'aspect de la zone d'étude	49
Figure 36 : carte lithologique de la zone d'étude.....	50
Figure 37 : carte de linéament de la zone d'étude.....	51
Figure 38 : carte de proximités aux réseaux hydrographiques de la zone d'étude.....	52
Figure 39 : carte d'occupation du sol de la zone d'étude.....	53
Figure 40 : carte d'altitude de la zone d'étude.....	54

Figure 41 : carte de la susceptibilité aux glissements de terrain(méthode RF).....	57
Figure 42 : carte de la susceptibilité aux glissements de terrain(méthode LR).....	58
Figure 43 : Courbe de ROC.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Coordonnées des stations utilisées ; in (Roukh 2020).....	6
Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles 1983-2013 St Oran, Source –ANRH in (Roukh 2020).....	7
Tableau 3 : Regroupement des mois trois par trois (Roukh 2020).....	7
Tableau 4: Précipitation moyenne annuelle observée au niveau de la station d’Oran In (Roukh 2020).	9
Tableau 5 : Température moyenne (source ONMM) in (Roukh 2020).....	10
Tableau 6: Statistiques générales, in (Roukh 2020).....	11
Tableau 7 : Les valeurs P/T pour une période (2000-2009), (Roukh 2020).....	12
Tableau 8. Classification des mouvements de terrain selon (Varnes 1978), in (Roukh 2020).....	15
Tableau 9 : Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain, in (Lahmidi 2021).....	21
Tableau 10: classes des vitesses définies par Varnes (1978).....	23
Tableau 11 : les calcule statistique.....	55

Table des matiers

Avant-propos

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Liste des Tableaux

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : CARACTERISTIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. Situation géographique.....2

I.2. Caractéristiques géologiques du site étudié (frange maritime d'Oran Est).....3

I.3. La morphologie de la frange maritime4

I.4. Caractéristique hydrogéologique de la ville d'Oran.....5

I.5. Caractéristiques climatiques de la ville d'Oran6

I.6. Étude des précipitations mensuelles6

I.7. Régime pluviométrique.....7

I.8. Étude des précipitations moyennes annuelles.....8

I.9. Températures : (Station d'E Senia 2000-2009) source ONM10

I.10. Le régime Climatique.....11

I.10.1. Etude de climat.....11

I.11. Synthèse bioclimatique.....13

CHAPITRE II :GENERALITES SUR LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

II.1. Définition.....15

II.2. classifications de mouvements de terrain.....15

II.3. Les types de mouvements de terrain16

II.3.1. Les glissements de terrain.....16

II.3.1.1. Glissement translationnel ou plan.....16

II.3.1.2 Glissement rotationnel ou circulaire.....17

II.3.1.3. Glissements complexe.....17

II.3.2. Les écroulements et chutes de blocs.....18

II.3.3. Les coulées boueuses et laves torrentielles.....19

II.3.4. Le fluage.....20

II.3.5. Les basculements.....20

II.3.6. Le déplacement latéral	21
II.4. Vitesse du glissement de terrain.....	22
II.5. Principales causes des glissements.....	24
II.6. Indices et phénomènes induits par les glissements.....	24
<i>CHAPITRE III : METHODES ET TECHNIQUES D'EVALUATION DE LA SUSCEPTIBILITE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN</i>	
III.1. Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité.....	26
III.1.1. Approches semi-quantitatives.....	27
III.1.1.1. Méthodes d'analyse multicritiques.....	27
III.1.2. Approches quantitatives.....	29
III.1.2.1. Approches statistiques.....	29
III.1.2.2. Méthodes d'intelligence artificielle (IA).....	31
III.1.2.3. Approche probabiliste.....	32
III.1.2.4. Approche déterministe.....	32
III.1.3. L'approche qualitative.....	32
III.1.3.1. La cartographie d'inventaire des phénomènes.....	32
III.1.3.2. Analyse géomorphologique.....	34
III.1.3.3. Cartographie par analyse de pondération de facteurs.....	35
<i>CHAPITRE IV CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AU GLISSEMENT DE TERRAIN DE LA FRANGE MARITIME D'ORAN.</i>	
IV.1. Etude des glissements de terrain cas de la frange maritime d'Oran.....	36
IV.1.1. Glissement de terrain G1_G2.....	36
IV.1.1.1. Géologie et stratification dans la zone des glissements G1 et G2.....	37
IV.1.1.2. Interprétation des résultats inclinomètres.....	39
IV.1.1.3. Données piézométriques des sondages réalisés dans la zone d'étude.....	40
IV.1.1.4. Type des glissements de terrain.....	40
IV.1.2. Glissements de terrain G3, G4 et G5.....	42
IV.1.2.1. Mesures inclinométriques	43
IV.1.2.2. Type des mouvements de terrain.....	44
IV.2. Evaluation de la susceptibilité au glissement de terrain.....	46
IV.2.1. Inventaire des glissements de terrain.....	46
IV.2.2. Facteurs de prédisposition du glissement de terrain.....	47
IV.2.2.1. La pente.....	47
IV.2.2.2. L'aspect (la direction des versants).....	48

IV.2.2.3. La lithologie.....	49
IV.2.2.4. la distance par rapport aux linéaments.....	50
IV.2.2.5. Proximités aux réseaux hydrographiques.....	51
IV.2.2.6. L'occupation du sol.....	52
IV.2.2.7. Altitude du relief.....	53
IV.2.3. calcule statistique.....	54
IV.2.3.1. La méthode statistique de ratio de fréquence.....	55
IV.2.3.2. La méthode statistique régression logistique.....	57
IV.3. validation et comparaison des résultats.....	59
<i>CONCLUSION GENERALE</i>	60
<i>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES</i>	61

Introduction générale

Les mouvements gravitaires, tels que les glissements de terrain, les éboulements et les effondrements, sont des phénomènes géologiques qui représentent une menace sérieuse pour les régions montagneuses et les zones à relief accidenté. La région d'Oran-Est, située dans le Nord-Ouest de l'Algérie, est particulièrement vulnérable à ces types de mouvements en raison de son terrain complexe, de ses conditions climatiques et de ses caractéristiques géologiques spécifiques. La compréhension de la susceptibilité aux mouvements gravitaires dans cette région revêt une importance cruciale pour la sécurité des populations locales et le développement durable de la région.

Au fil des décennies, les approches et les méthodes utilisées pour cartographier la susceptibilité aux mouvements gravitaires ont considérablement évolué. Les anciennes méthodes se fondaient principalement sur des observations géomorphologiques, des enquêtes de terrain et des données historiques d'incidents. Cependant, ces méthodes étaient souvent limitées en termes de précision et de capacité de prévision, ce qui entraînait des risques potentiels pour les populations exposées.

C'est dans ce contexte que les nouvelles approches ont émergé, tirant parti des avancées technologiques dans le domaine de la géomatique, de la télédétection et de la modélisation numérique. Ces approches modernes ont permis d'améliorer considérablement notre capacité à évaluer la susceptibilité aux mouvements gravitaires de manière plus précise et plus efficace. Cette évolution technologique ouvre de nouvelles perspectives pour la gestion des risques, la planification territoriale et la prise de décision dans les régions exposées aux mouvements gravitaires.

Ce mémoire se concentre sur la région de la frange maritime d'Oran-Est, en Algérie, en tant qu'étude de cas. Nous nous efforcerons d'analyser en profondeur les facteurs géologiques, topographiques, climatiques et anthropiques qui contribuent à la susceptibilité aux mouvements gravitaires dans cette région. Plus important encore, nous mettrons en lumière la transition de l'utilisation d'anciennes méthodes à l'adoption de nouvelles approches dans le but d'améliorer la compréhension et la gestion des risques liés aux mouvements gravitaires.

Cette recherche poursuit plusieurs objectifs clés. Tout d'abord, elle vise à comparer de manière critique les méthodes traditionnelles avec les approches modernes en matière de cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires. Ensuite, elle se propose d'illustrer comment ces nouvelles méthodes peuvent être mises en œuvre de manière pratique dans la région d'Oran-Est. Enfin, elle aspire à contribuer à l'élaboration de recommandations pour une meilleure gestion des risques et une prise de décision éclairée dans cette zone, tout en servant de modèle pour d'autres régions du monde confrontées à des défis similaires.

Dans les chapitres à venir, nous explorerons les facteurs de susceptibilité spécifiques à la région d'Oran-Est, examinons les méthodes anciennes et modernes de cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires, et discuterons de leur applicabilité dans ce contexte particulier. Enfin, nous tirerons des conclusions significatives pour l'amélioration de la sécurité et du développement durable de la frange maritime d'Oran-Est et au-delà.

CHAPITRE I :
CARACTERISTIQUE DE LA ZONE
D'ETUDE

I.1. Situation géographique :

La zone d'étude se situe dans la wilaya d'Oran (No de l'Algérie) (Figure1). Elle couvre une superficie de 8,1271 km², avec un périmètre de 29,53 km. La frange maritime se localise exactement entre les coordonnées longitudinales (715384,927018m,724421,110772m) et les coordonnées latitudinales (3961612,552669m, 3954398,002580m), selon le système de projection (WGS_1984_UTM_Zone30N) .

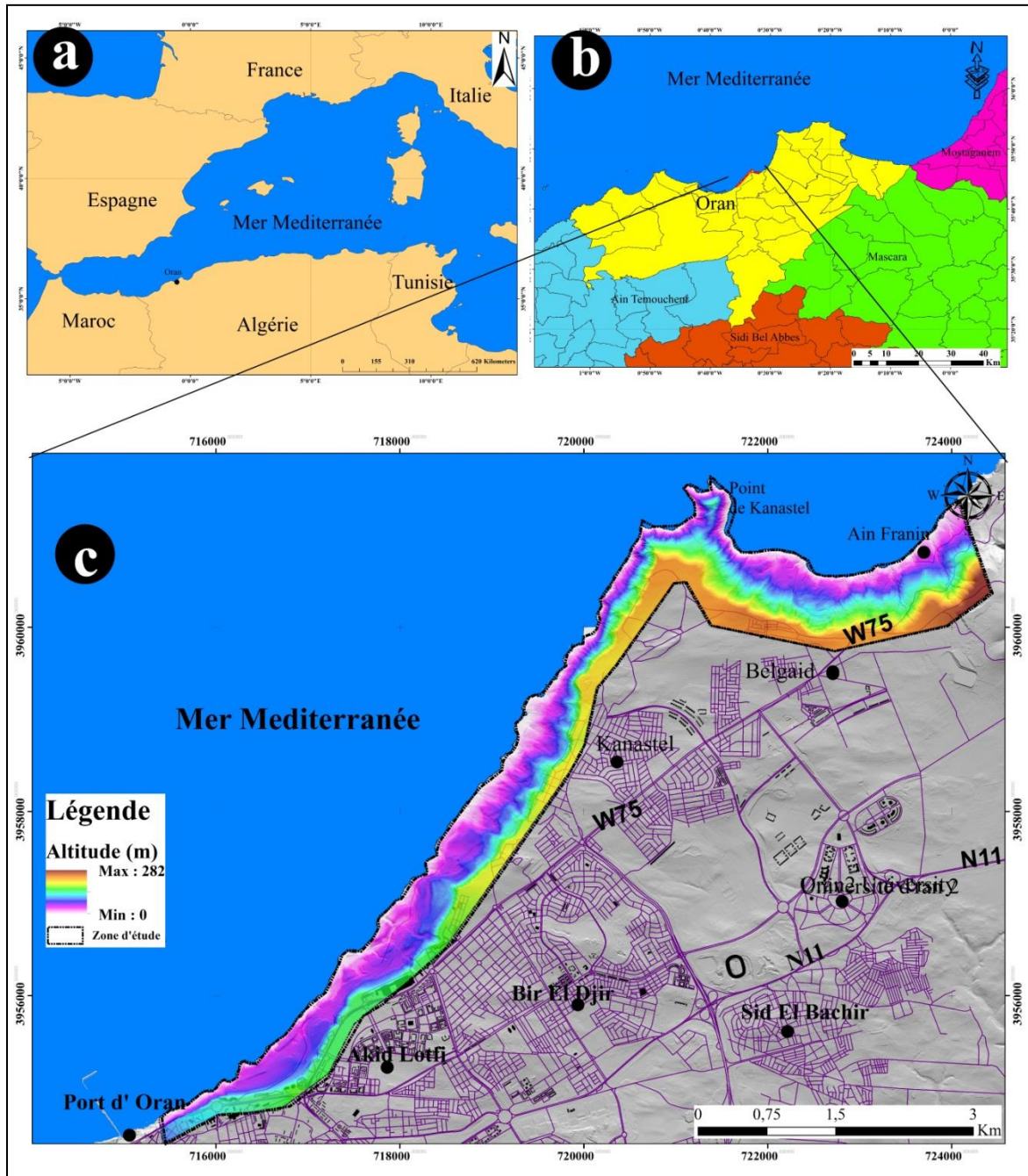


Figure 1: Localisation de la zone d'étude.

I.2. Caractéristiques géologiques du site étudié (frange maritime d'Oran Est) :

Dans cette zone littorale constituée par des formations rocheuses sont d'âge Mio_Pliocène, composées essentiellement de marne, des calcaires et des grès poreux d'âge Pléistocène. Les grès et les grès-marneux (disposés en alternance) sont les formations les plus représentatives et plus fréquemment observées en cette zone. Les hauteurs de la falaise caractérisant la région de Canastel sont constituées de grès-calcaires avec des alternances de marnes en position horizontale à subhorizontale d'âge Pliocène. Ces formations sont observées à la fois sous forme massive et vacuolaire D'autre part, les dépôts récents, sont représentés par des sables siliceux et du gravier recouvert de terre végétale (figure2).

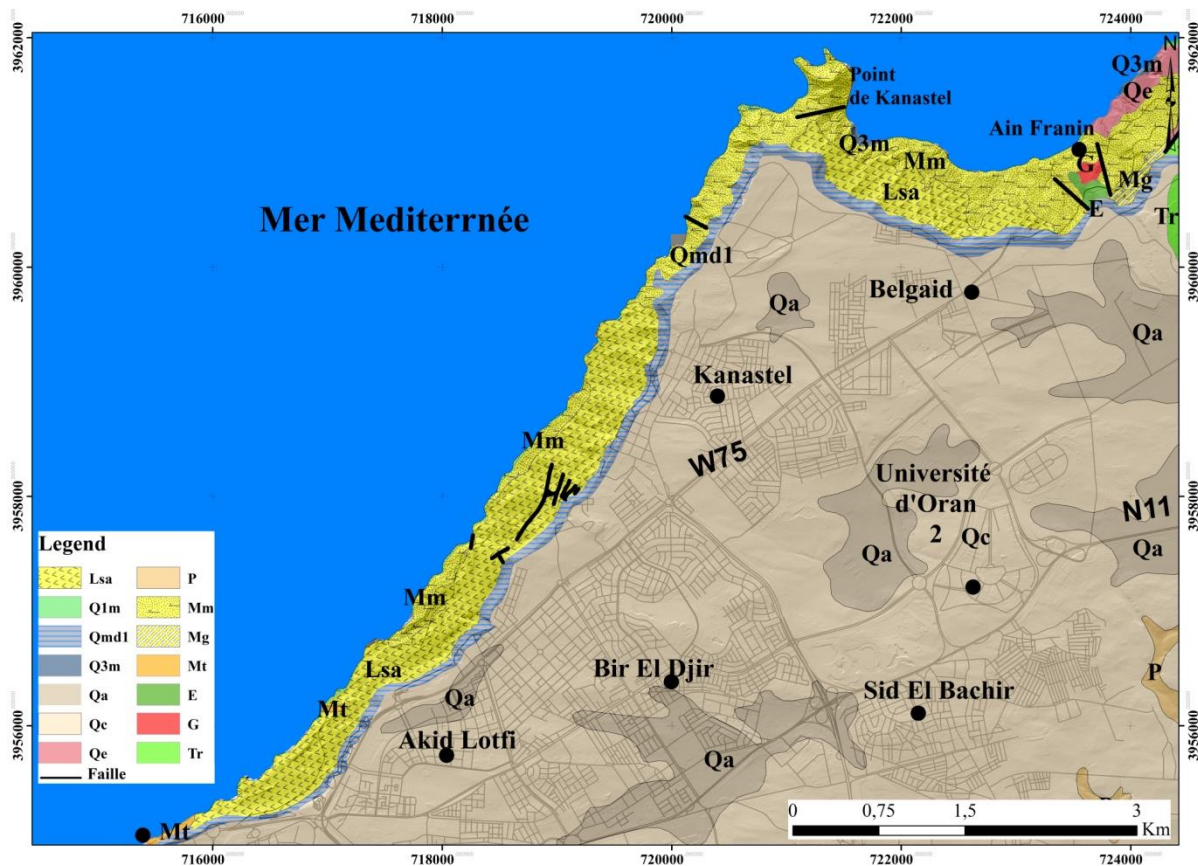


Figure 2 : Carte géologique du site étudié ; (Lsa) Matériaux des glissements, (Qmd1) Pléistocène marin niveau ancien, (Qc) Quaternaire Continental, (Mm) Miocène supérieur (Gourinard 1952)

I.3. La morphologie de la frange maritime :

L'étude des formes du relief est une science souvent revendiquée à la fois par les géographes et les géologues. Ces formes sont en effet, le résultat après l'action de plusieurs agents météoriques érosifs (le vent, l'eau...etc.), et d'action internes (plissements, etc.). L'exploitation des données topographiques tels que les cartes topographiques, les levées topographiques de terrain et le Model Numérique de Terrain (MNT) permettant de mieux comprendre l'état et la morphologie du terrain. Dans cette zone d'étude le MNT donné en (Figure 3.a) est extraire par la restitution de la carte topographique, en utilisant la méthode de Triangulation comme moyenne d'interpolation. Les profils topographique réalisés au niveau du secteur d'étude établis selon les segments (AA', BB', CC', DD') (Figure 3.b) montrent clairement la présence de trois niveaux ou unités bien distinctes : (i) la première unité qui forme le plateau de Canastel dont les altitudes sont supérieures à 180 m avec une pente plus ou moins faible (Figure 3.b), (ii) la deuxième unité caractérisée par une pente raide formée au contre bas de la falaise d'Oran dont l'épaisseur est de l'ordre de 40 mètre, (iii) une troisième unité constituée le versant de la frange maritime dont l'altitude varie entre 0 et 140 mètre.

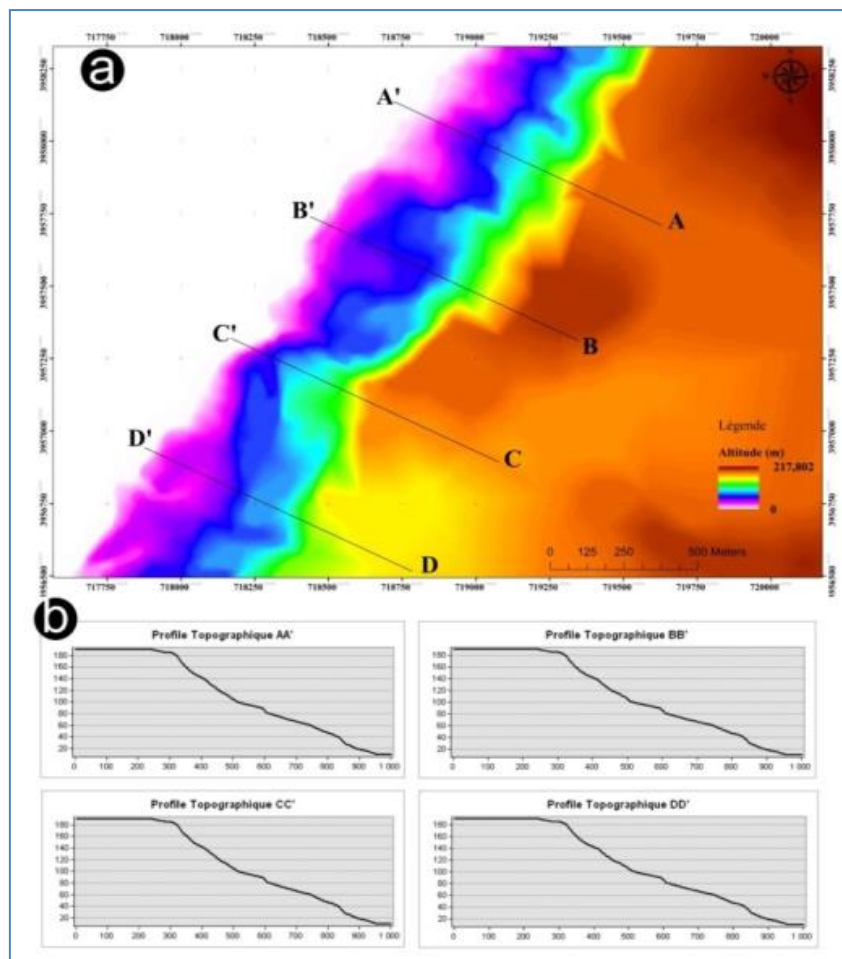


Figure 3 : la topographie de la zone d'étude ; (a) MNT du secteur d'étude, (b) profils en travers ; des sections [AD] in (Roukh 2020)

I.4. Caractéristique hydrogéologique de la ville d'Oran :

L'écoulement des eaux souterraines est lié directement aux caractéristiques de l'aquifère en profondeur. La carte piézométrique du Plateau d'Oran (Figure 4) indique l'existence des plusieurs directions d'écoulements souterraine, On constate qu'un écoulement souterrain NNE-SSW s'oriente en direction de rivage Nord de la Grande Sebkhha d'Oran. Une autre direction W-E indiquant le sens d'écoulement souterrain au niveau d'Es Senia vers l'agglomération de Sidi Chahmi. Une direction d'écoulement souterrain S-N perpendiculaire au port d'Oran, passant par la ville d'Oran les eaux souterraines de la partie Nord d'Es Senia s'écoulent vers la mer. Au niveau de la frange maritime, l'écoulement des eaux souterrain se fait selon une direction spécifique NESW. Dans la région de Sidi Maarouf, l'écoulement est N-S ; s'épandant du Djebel K'har en direction de Hassi Bounif. La circulation des eaux souterraines d'El Hassi se fait selon deux directions distinctes : une direction SSW-NNE marquant un écoulement vers la mer, un autre direction vers Ain El-Beida situe au S-E de la carte (Figure 4) (Benabdellah 2011).

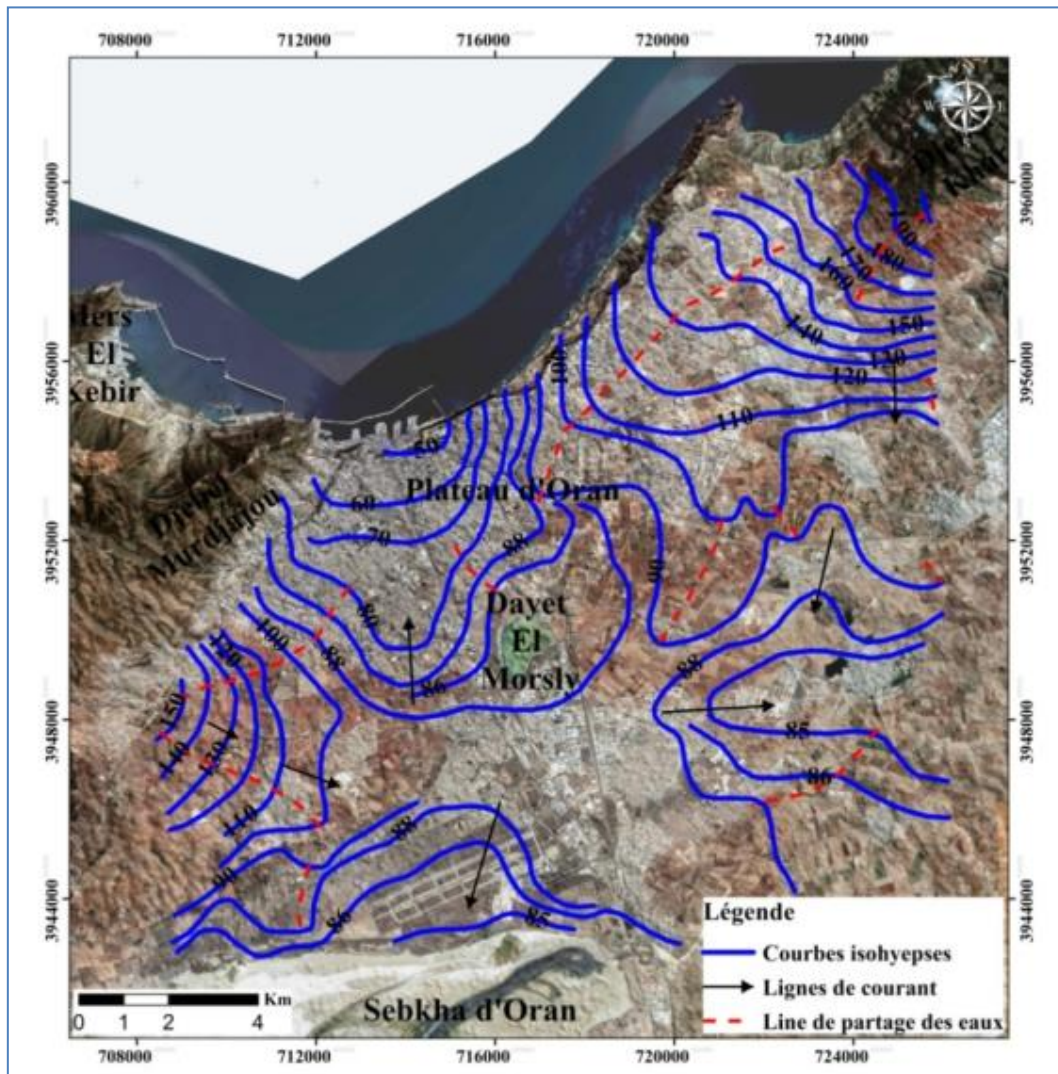


Figure 4 : Carte piézométrique du plateau d'Oran in (Roukh 2020)

I.5. Caractéristiques climatiques de la ville d'Oran :

Le littoral Oranais enregistre depuis plusieurs années une phase de sécheresse anormale qui s'inscrit dans le cadre du changement climatique affectant l'ensemble du globe terrestre. Le déficit pluviométrique est conjugué aux besoins croissants, augmentation des populations, multiplication des activités consommatrices d'eau telle que l'agriculture du fait que l'alimentation en eau pose de sérieux problèmes ; le surplus peut provoquer des phénomènes d'inondations des plaines littorales, la remontée des eaux souterraines et déclenchement des glissements de terrain avec des coulées boueuses parfois dangereuses dans les zones susceptibles.

L'étude climatique est d'une importance primordiale, car grâce aux différents paramètres climatiques utilisés ; en particulier (T° , P) qui sont les facteurs indispensables pour élaborer cette étude.

Les paramètres climatiques jouent aussi un rôle déterminant dans le comportement du régime des cours d'eau superficielles et l'étude du risque hydrique.

Le climat de la région d'étude par rapport au climat du pays se caractérise par un climat contrasté entre un climat méditerranéen au littoral et semi-aride au sud de la région.

Les stations climatiques existantes, sont considérées comme produit représentatif de la région pour produire données fiables, sont celles mentionnées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Coordonnées des stations utilisées ; in (Roukh 2020) .

Station	Code	X	Y	Altitude	Paramètres	Période d'observation
Oran	40438	198.7	272.6	-	P (mm/mois)	(1983-2013)
Oran Es Senia	40438	-	-	-	T ($^{\circ}$ C)	(2002-2012)

I.6. Étude des précipitations mensuelles :

Le tableau représentatif (tableau2) des précipitations moyennes mensuelles durant la période de référence (1983-2013) de la station de d'Oran (**code 40438**) dont les données seront prises comme référence.

L'étude des précipitations moyennes mensuelles a permis d'observer que la période pluvieuse débute au mois d'Octobre et se termine au mois d'Avril. Au cours de cette période on remarque que le maximum des précipitations apparaît en Novembre (53,7 mm) et pour le minimum en Juillet (1,4 mm) (figure 5).

La station enregistre un cumul pluviométrie annuelle faible 370.5 mm et une moyenne mensuelle de 30,87 mm, avec une répartition mensuelle assez régulière.

Tableau 2 : Précipitations moyennes mensuelles 1983-2013 St Oran, Source –ANRH in (Roukh 2020).

Station	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Oran	53.0	45.3	42.7	46.9	27.6	7.6	1.4	3.5	17.1	26.3	53.7	45.4	370,5

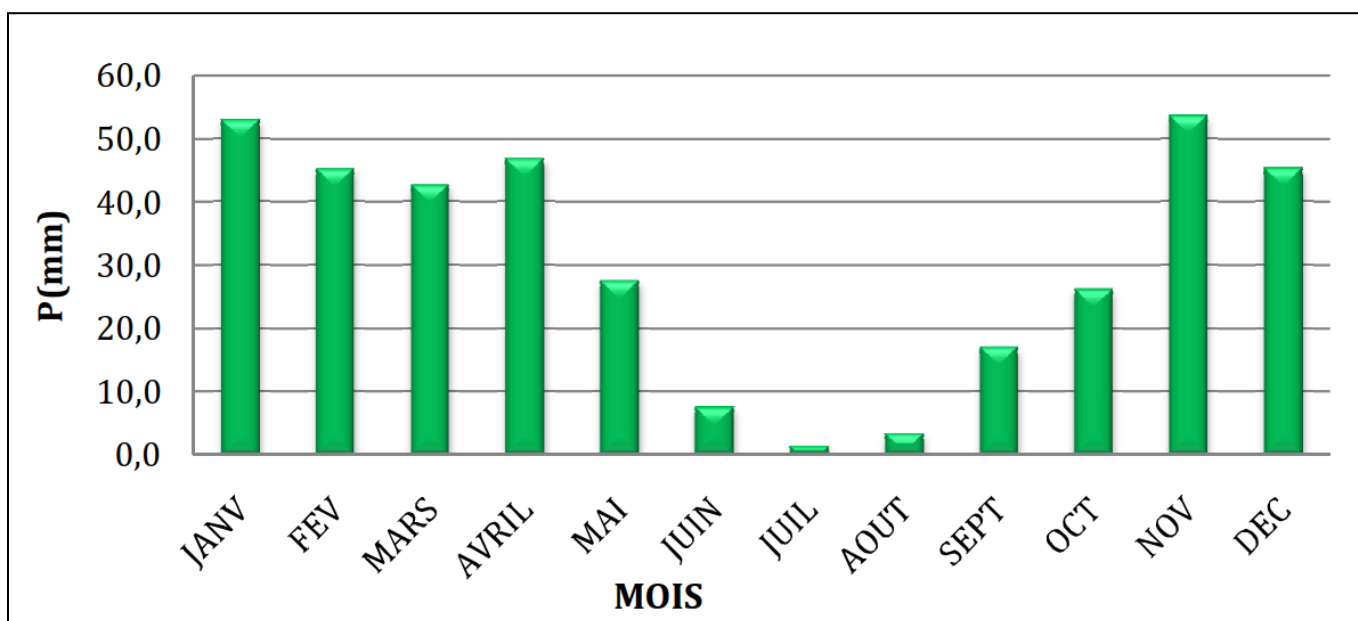


Figure 5 : Histogramme des Précipitations moyennes mensuelles (1983-2013) in (Roukh 2020).

I.7. Régime pluviométrique:

Le regroupement des mois trois par trois, de manière à ce que le mois initial (Tableau.3) de chaque trimestre ou saison contient un solstice ou un équinoxe, a permis à la détermination d'un régime pluviométrique par saison.

Tableau 3 : Regroupement des mois trois par trois (Roukh 2020).

Saisons	Automne (A)			Hiver (H)			Printemps (P)			Eté (E)		
Pluie moyenne mensuelle (mm)	17.1	26.3	53.7	45.4	53	45.3	42.7	45.9	27.6	7.6	1.4	3.5
Total (mm)	97.1			143.7			116.2			12.5		

Ce régime peut nous renseigner sur la période optimale de recharge des aquifères. Dans la station d'Oran, cette période s'étale de l'automne au printemps en passant par l'hiver (figure 6).

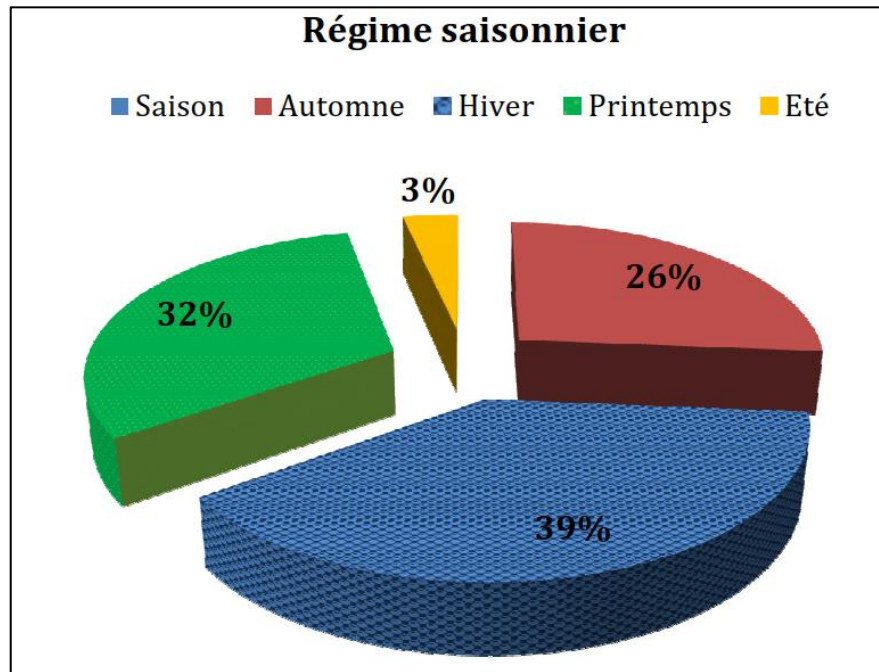


Figure 6 : Régime saisonnier de la station d'Oran in (Roukh 2020).

I.8. Étude des précipitations moyennes annuelles :

Le tableau 4 représente les précipitations moyennes annuelles de la station d'Oran pour la période « 1983-2013 ».

L'étude des précipitations moyennes annuelles permet de remarquer ce qui suit : L'année la plus pluvieuse à été enregistrée (585.80mm) en 1995. Cependant, l'année la plus sèche avec une pluviométrie (191.50mm) en 1992 (Figure 7).

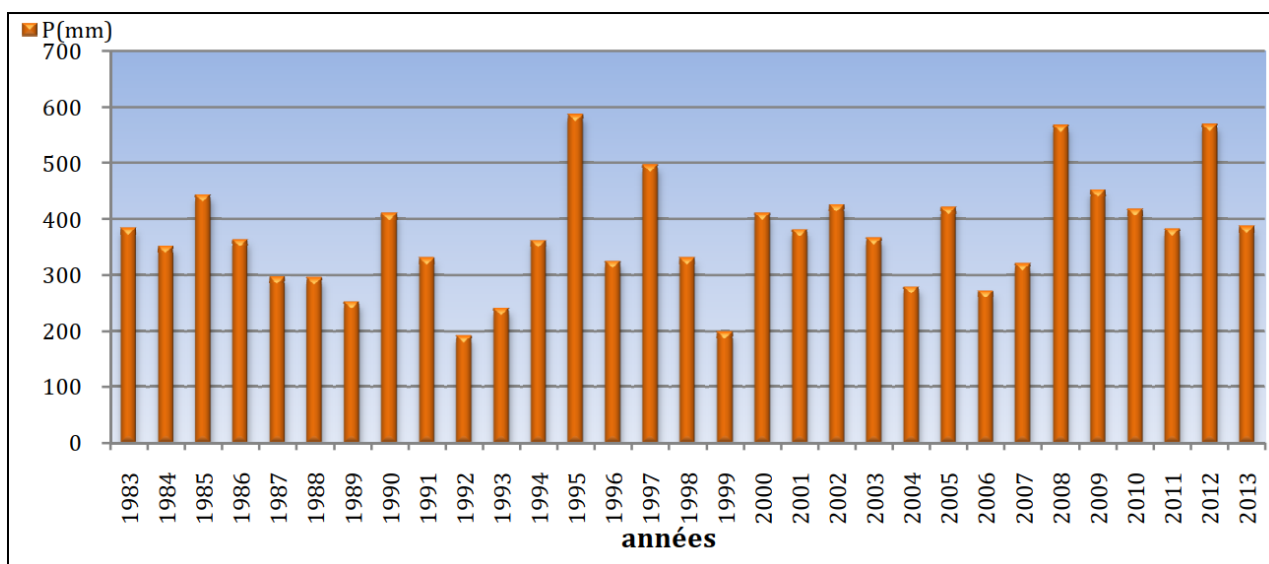


Figure 7 : Histogramme des Précipitations Annuelles ; période (1983-2013) in (Roukh 2020).

Tableau 4: Précipitation moyenne annuelle observée au niveau de la station d'Oran
In (Roukh 2020).

Année	P (mm)
1983	383.10
1984	350.50
1985	442.90
1986	362.20
1987	295.60
1988	294.50
1989	251.80
1990	409.90
1991	329.90
1992	191.50
1993	240.40
1994	361.50
1995	585.80
1996	324.50
1997	496.10
1998	329.60
1999	197.90
2000	410.20
2001	380.50
2002	424.70
2003	366.00
2004	278.70
2005	419.80
2006	270.70
2007	319.20
2008	566.90
2009	451.00
2010	416.50
2011	381
2012	568
2013	386

I.9. Températures : (Station d'E Senia 2000-2009) source ONM :

La température constitue avec les précipitations un paramètre majeur qui permet de définir le climat d'une région, c'est aussi l'un des termes essentiels dans la définition du déficit d'écoulement. Pour notre secteur d'étude, la station d'Es Senia est la seule où nous avons pu disposer d'une série de mesures de ce paramètre pendant la période (2000-2009). Le tableau suivant présente les variations de températures moyennes (Tableau 5).

Tableau 5 : Température moyenne (source ONMM) in (Roukh 2020).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D
T Min moy (°C)	-0,2	1,6	2,4	4,4	7,6	11,6	15,5	16,7	13,0	8,8	4,8	1,5
T Moyenne (°C)	10.95	12.45	14.64	17.29	19.86	23.44	26.82	27.83	24.69	21.00	16.24	12.72
T Max moy (°C)	22,1	23,3	26,9	30,2	32,2	35,3	38,2	39,0	36,3	33,2	27,7	23,9

La région connaît deux saisons distinctes :

Les températures maximales en été selon l'exploitation de la source (ONM), un maximum de 39 °. La saison hivernale froide et rigoureuse atteint une température minimale de (-0,2 °) (Figure 8)

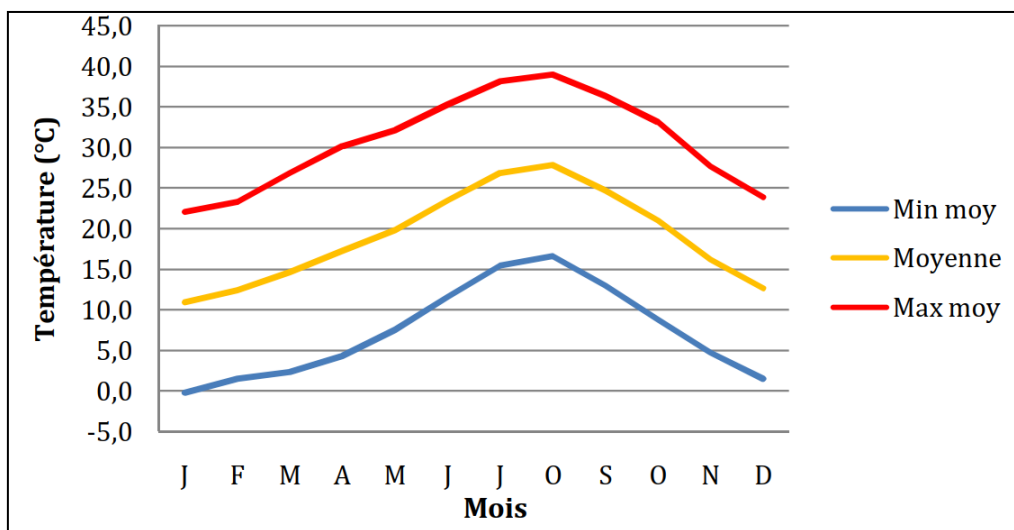


Figure 8: Variation des Températures Moyennes Mensuelles –Es Senia-(2000-2009) in (Roukh 2020).

I.10. Le régime Climatique:

La relation entre la température et les précipitations est tentée à partir de différentes méthodes graphiques ou par des calculs de certains indices testés sur la station d'Oran.

L'étude du climat permet de donner à la région son caractère, son individualité climatique et de bien situer les périodes sèches et humides.

I.10.1. Etude de climat :

- Courbe Pluiothermique (Gausсен et Bagnouls) :

La courbe Pluiothermique proposée par Bagnouls et Gausсен en 1953 est simple et la plus utilisée. Elle permet de calculer la durée de la saison sèche en reportant la pluviométrie mensuelle et la température moyenne mensuelle sur le même diagramme à, l'échelle du graphe notés : $P (mm) = 2 T^{\circ}C$.

La zone comprise entre la courbe pluviométrique et celle des températures constitue la période sèche ou humide. Le mois est considéré sec si $P (mm) < 2T^{\circ}C$. Cette relation permet d'établir les diagrammes Pluiothermique superposable avec ceux de la température qui est à double échelle aux précipitations.

Tableau 6: Statistiques générales, in (Roukh 2020).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	O	S	O	N	D	Annuelle
Précipitation en mm	53.0	45.3	42.7	46.9	27.6	7.6	1.4	3.5	17.1	26.3	53.7	45.4	370,5
T Moyenne (°C)	10.97	12.45	14.64	17.29	19.86	23.44	26.82	27.83	24.69	21.00	16.24	12.72	19°C

On constate que la courbe des précipitations passe au-dessus de la température pendant les mois humides de fin Octobre jusqu'au mois de Mai ; donc la période est excédentaire. La courbe des précipitations passe au-dessous de celle des températures pendant les mois sec de mai jusqu'à la fin du mois d'octobre ; (Figure 9).

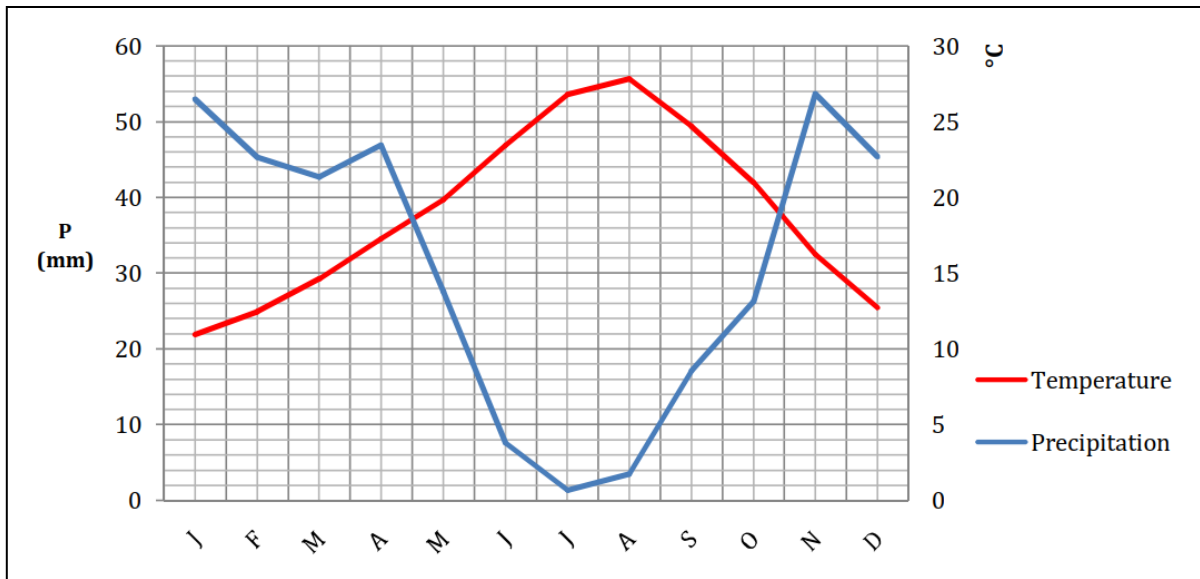


Figure 9: Graphe Pluviothermique, in (Roukh 2020).

- **Courbe Ombrothermique : (méthode d'Euverte) :**

Les graphes Ombrothermiques sont établis en adoptant une progression linéaire pour l'échelle des températures et une progression logarithmique pour l'échelle du besoin en eau (Figure 10)

L'examen d'un tel graphique permet de déterminer :

- La période où la température supérieure à 10°C correspond à la saison chaude ou période de végétation active.
- L'intensité des phénomènes du déficit ou d'excédant.
- Nous permet de définir trois types de climats.
 - 1) Climat très sèche : Eu méditerranées : $P/T < 1$ de juin jusqu'au septembre.
 - 2) Climat sèche : Sub méditerranéennes : $1 < P/T < 2$ en Mai et octobre.
 - 3) Climat humide : montagne ou à tendance océanique : $P/T > 3$ de Novembre jusqu'au février.

Tableau 7 : Les valeurs P/T pour une période (2000-2009), (Roukh 2020).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
P/T	4.8	3.6	2.9	2.7	1.4	0.3	0.1	0.1	0.7	1.3	3.3	3.6

D'après le tableau ci-dessus la station est donc :

- Très sèche : Eu méditerrané en juin, juillet, Aout et septembre qui correspond au rapport P/T < 1.
- Sèche : Sub méditerranéenne en Mai et Octobre, le rapport compris entre 1 et 2.
- Humide : ou à tendance océanique en novembre, décembre, janvier et Février.

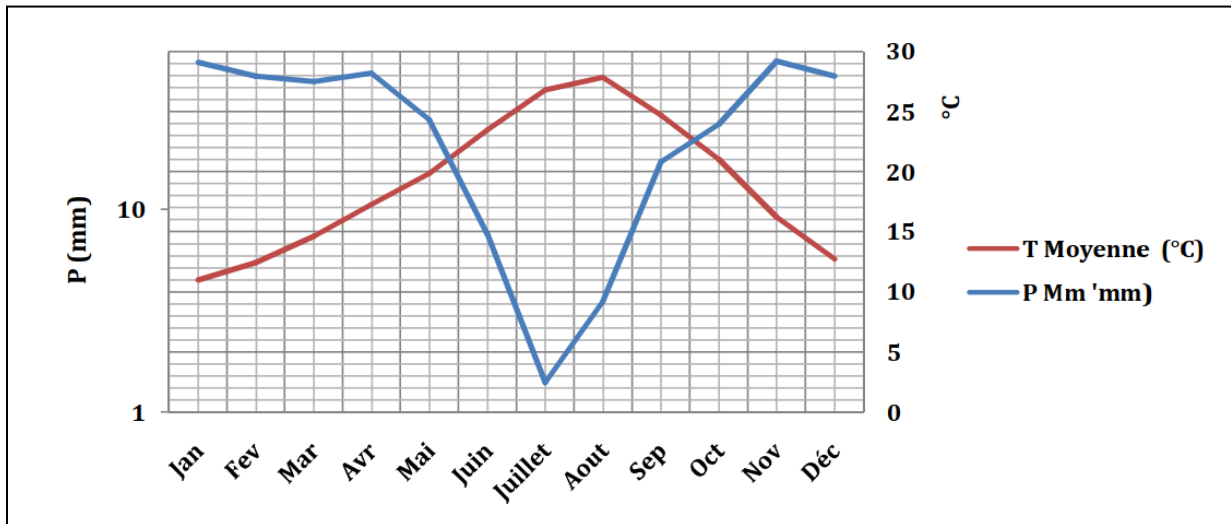


Figure 10 : Courbe Ombrothermique, (Roukh 2020).

I.11. Synthèse bioclimatique :

Pour appréhender l'étude climatique, nous avons fait appel à quelques indices climatiques tels que:

–Indice d'aridité de Martonne (I)

On peut calculer cet indice par la formule : $I_{(a)} = P / (T + 10)$

Dont :

- P : Précipitations Moyennes annuelles en (mm)
- T : Températures Moyennes annuelles en (c°)

Si:

(I < 5) le régime est hyperaride.

(5 < I < 10) le climat est désertique.

(10 < I < 20) climat semi-aride.

(I > 20) climat tempéré

P=370,5 (mm) ; $I = 370,5 / (19 + 10)$

T= 19 (c°) ; $I_{(a)} = 12,8$

Les résultats montrent que la valeur de la station d'Oran se caractérise par un régime de type plus au moins semi-aride ; caractérisé par des écoulements exoréiques et une couverture herbacée. On détermine ces valeurs à l'aide de l'abaque d'indice d'aridité.

L'indice climatique calculés, ainsi que la visualisation des périodes de sécheresse et de réalimentation pluvial, nous permet de définir que notre secteur est caractérisé par un climat méditerranéen pluvial semi-aride (Figure 11), marqué par un hiver doux et humide et un d'été chaud, le tout sous des conditions géographiques et d'irrégularité évidentes des précipitations.

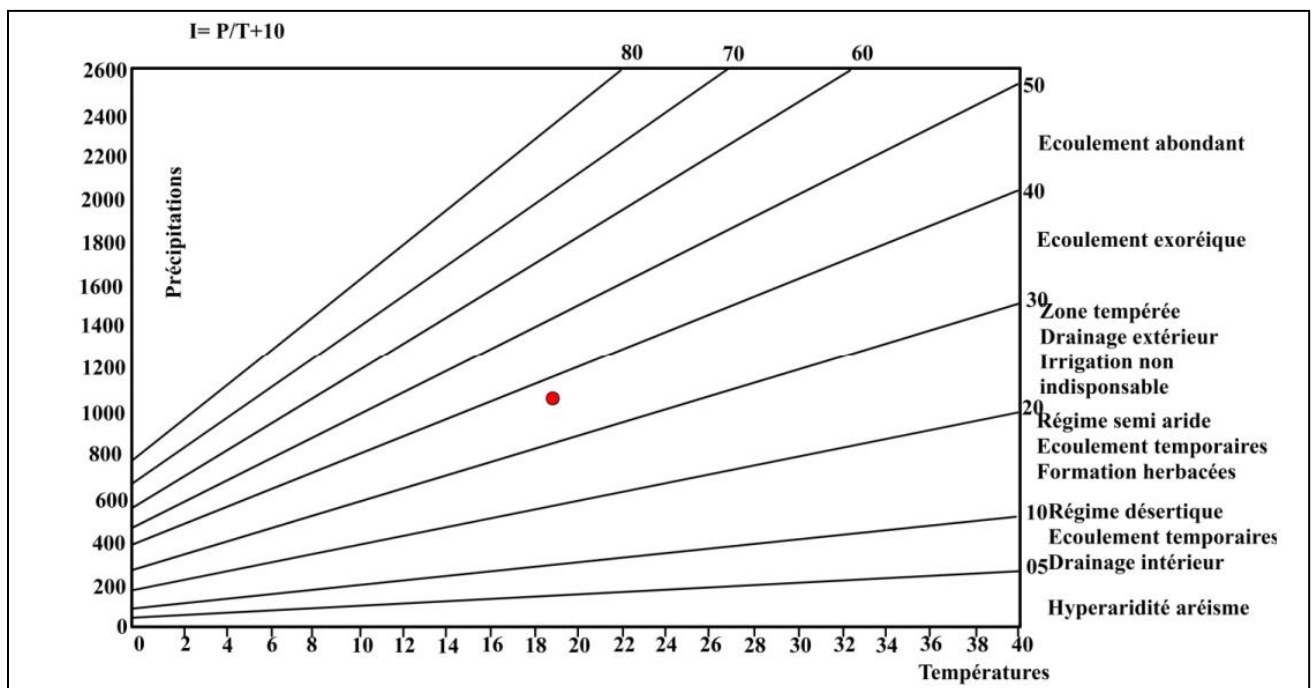


Figure 11 : Abaque d'indice d'aridité, (Roukh 2020).

CHAPITRE II :
GENERALITES SUR LES
MOUVEMENTS DE TERRAIN

II.1. Définition:

Les mouvements de terrains sont liés à plusieurs phénomènes naturels, se manifestant au déplacement brutal d'une masse rocheuse ; le long d'une pente sous l'effet de la gravité, appelées aussi mouvements de versant (Thiery 2007). Les causes de ces phénomènes sont dues à plusieurs facteurs, naturels : les fortes précipitations, les séismes, la fonte de neige...etc. Parfois anthropique liés à la réalisation des routes, des projets, des infrastructures, l'extraction des granulats et déforestations ...etc.

II.2. classifications de mouvements de terrain:

Il existent plusieurs classifications de glissements de terrain (Bell 2003), La classification la plus utilisée celle de (Varnes 1978, Cruden and Varnes 1996) (Figure 17) cette classification est fondée sur le type de mouvement et sur le matériau concerné (Tableau 8).

Tableau 8. Classification des mouvements de terrain selon (Varnes 1978), in (Roukh 2020).

Type de mouvement		type de matériaux		
		Rocher	Débris	Sols
Eboulement (Fall)		Chute de pierre	Chute de débris	Chute de formations superficielles
Basculement (Topple)		Basculement de rocher	Basculement de débris	Basculement de formations superficielles
Glissement (Slide)	Rotationnel	Glissement de rocher	Glissement de débris	Glissement de formations superficielles
	Translationnel	Glissement de rocher	Glissement de débris	Glissement de formations superficielles
Déplacement latérale (Spread)		Déplacement latérale de rocher	Déplacement latérale de débris	Déplacement latérale de formations superficielles
Coulées (Flow)		Coulées de rocher	Coulées de débris	Coulées de formations superficielles
Complexe		Combinaison du deux ou plusieurs types principaux		

II.3. Les types de mouvements de terrain :

II.3.1. Les glissements de terrain :

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture dite surface de cisaillement, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Selon la forme de la surface de rupture, on distingue trois types de glissement :

- Glissement Plan, le long d'une surface plane.
- Glissement Circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe.
- Glissement Quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.

II.3.1.1. Glissement translationnel ou plan :

La masse glissée se déplace vers le bas sur une surface relativement plane : telle qu'une couche mince de caractéristiques médiocres sur un substratum et présente peu de mouvement de rotation ou de basculement vers l'arrière (Figure 12).

Ces mouvements se développent sur :

- i) une discontinuité lithologique.
- ii) au contact des formations superficielles/ roche saine ; (Thiery 2007).

Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètre cubes.

Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (Saturation Du Matériau, Augmentation De Pressions Interstitielles....)
- Les terrassements ;
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosions des berges)
- Les séismes.

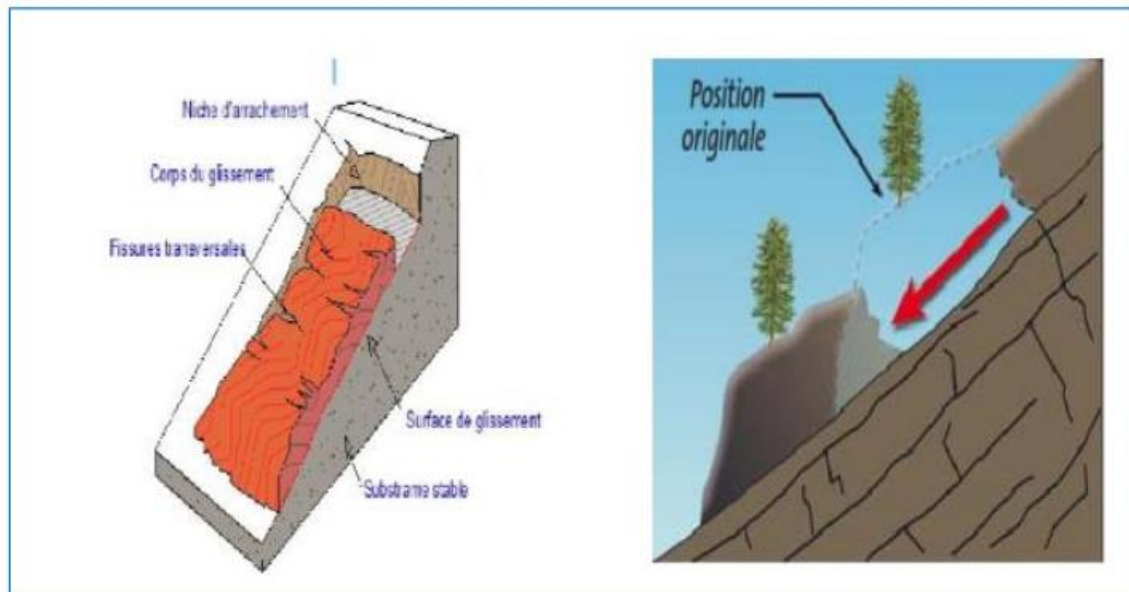


Figure 12 : Glissement plan, in (Lahmidi 2021).

II.3.1.2 Glissement rotationnel ou circulaire :

Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée le long d'une "surface de rupture" dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblai sur sols mous et de déblai en sols homogènes. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes.

Dans ce cas la surface de rupture est incurvée de manière concave vers le haut et ou le mouvement de la masse glissée est plus ou moins rotatif autour d'un axe parallèle au contour de la pente et suivis en aval par une coulée avec des lobes et des bourrelets (figure 17c) ; (Thiery 2007).

II.3.1.3. Glissements complexe :

Lorsque le sol est hétérogène ou anisotrope il peut y avoir formation de glissements "complexes" dont certaines parties correspondent à des mouvements rotationnels et d'autres à des mouvements plans. C'est le cas, en particulier, des remblais sur versants. Les volumes des masses en mouvement varient de quelques mètres cubes à plusieurs dizaines de millions de mètres cubes (Figure 13).

-Principaux facteurs déclenchant

- Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles....).
- Les terrassements.
- L'érosion naturelle (ruissellements, érosion des berges).
- Les séismes.

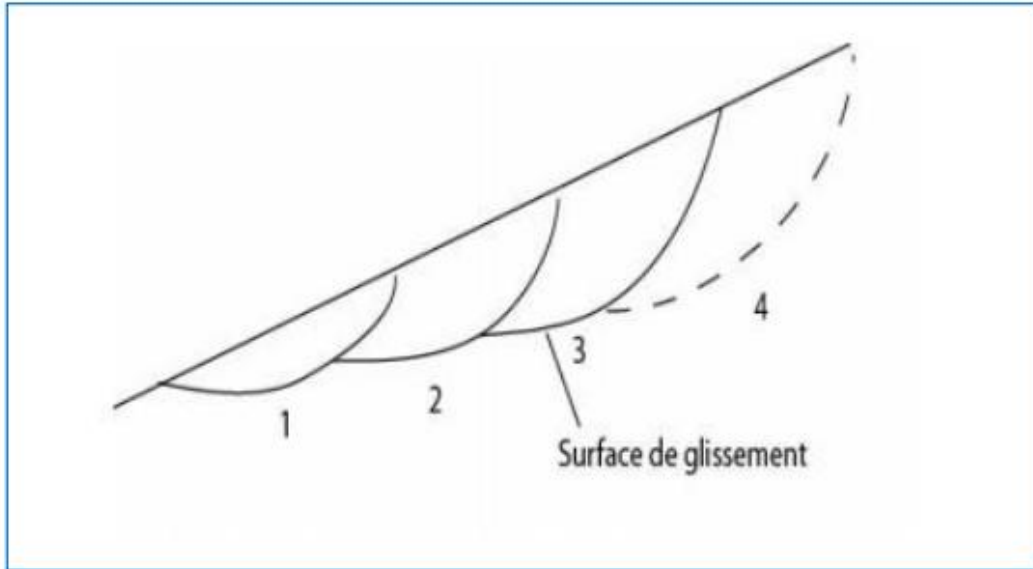


Figure 13 : Glissement rotationnel complexe, in (Lahmidi 2021)

II.3.2. Les écroulements et chutes de blocs :

Ce sont des chutes de pierres, débris et formation superficielle (matériaux géologiques) brutales et soudaines de masses rocheuses importantes, détachées d'une pente abrupte ou d'une falaise (Figure17a), ils se produisent généralement sous forme de chute libre, rebondissant et en roulant qui durent quelques secondes et dont les causes peuvent être internes au massif.

- Dislocation d'une masse rocheuse par altération interne.
- Glissement banc sur banc d'une masse rocheuse stratifiée.
- Ecoulement de masses mises en surplomb par érosion ou dislocation de couches tendres sous jacentes.
- Ecoulement par fluage ou glissement d'une couche sous- jacente Les volumes de sol mis en jeu varient entre une dizaine de milliers de mètres cubes (écroulement en masse) et une centaine de mètres cubes (chutes de blocs).

-Principaux facteurs déclenchant

- Les apports d'eau.
- Les cycles gel-dégel.
- L'altération.
- L'érosion.
- Les séismes.

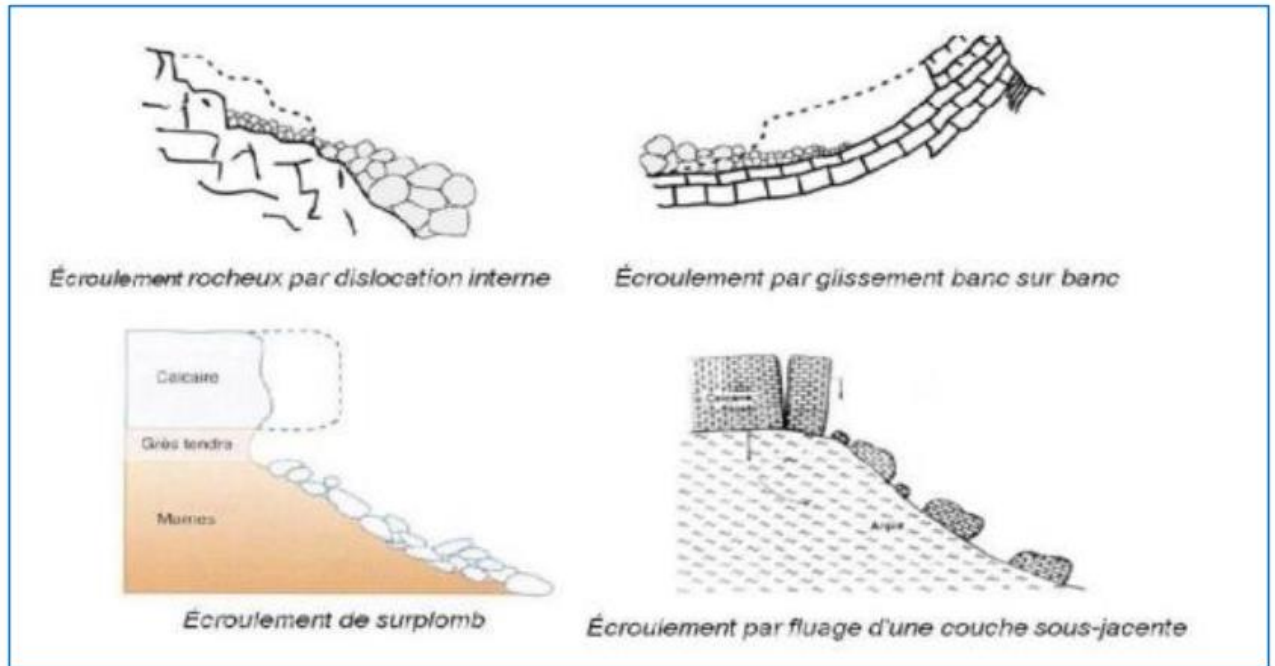


Figure 14 : Types d'éroulement, in (Lahmidi 2021).

II.3.3. Les coulées boueuses et laves torrentielles:

Sont des phénomènes lents ou rapides affectant des masses de matériaux remaniés, soumis à de forte concentration en eau, sur de faibles épaisseurs généralement de 0 à 5 mètres (Zaagane 2015). Les coulées de boue constituent le type de glissement de terrain le plus fluide (figure 15 et 17d). Les pluies torrentielles peuvent provoquées ce genre de phénomène dans les régions montagneuses avec une vitesse qui peut atteindre les 90 km/h.

Principaux facteurs déclenchant

- La disponibilité d'importantes quantités d'eau.
- Fortes précipitations.
- Rupture des digues.
- Rupture des barrages



Figure 15 : Coulée boueuse, Autoroute de Taïwan 2010, in (Achour 2017).

II.3.4. Le fluage:

Le fluage est caractérisé par des mouvements lents et continus, mais à des vitesses faibles. Dans le cas de fluage, il est difficile de mettre en évidence une surface de rupture. Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement au glissement) : en fait le matériau est sollicité à un état proche de la rupture (Figure 16).

II.3.5. Les basculements :

Un basculement est une action spontanée de masse rocheuse qui bascule ou tourne en avant sur un joint ponctuel ou articulaire, puis se sépare de la masse principale qui tombe avant de reculer ou de rouler librement sur la pente (Figure 17b).



Figure 16 : Basculement corniche calcaire lié au fluage des marnes sous-jacentes, falaises du Bessin de Calvados, in (Achour 2017).

II.3.6. Le déplacement latéral :

Se définit comme un glissement latéral d'un sol en pente douce due à la liquéfaction du sol à des profondeurs relativement faibles, et ne fait pas référence aux grands écoulements horizontaux associés à des défaillances de liquéfaction profondes (Figure 17e).

Tableau 9 : Éléments caractérisant les différents mouvements de terrain, in (Lahmidi 2021).

Terrain		Vitesse moyenne	volume	Facteurs déclenchant
Glissement	Sols massifs fracturés	très lente à moyenne	de quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	eau, terrassements
Fluage	Formations meubles	très lente	de quelques m ³ à plus de dix millions de m ³	chargement, évolution du matériau
Ecrolement	massifs rocheux	de très lente à très rapide	de quelques m ³ à plus de dix mille m ³	eau, gel dégel, séisme
Coulée	sols argileux et limoneux lâches	très rapide	de dix à plusieurs centaines de milliers de m ³	très fortes pluies, rupture de digues

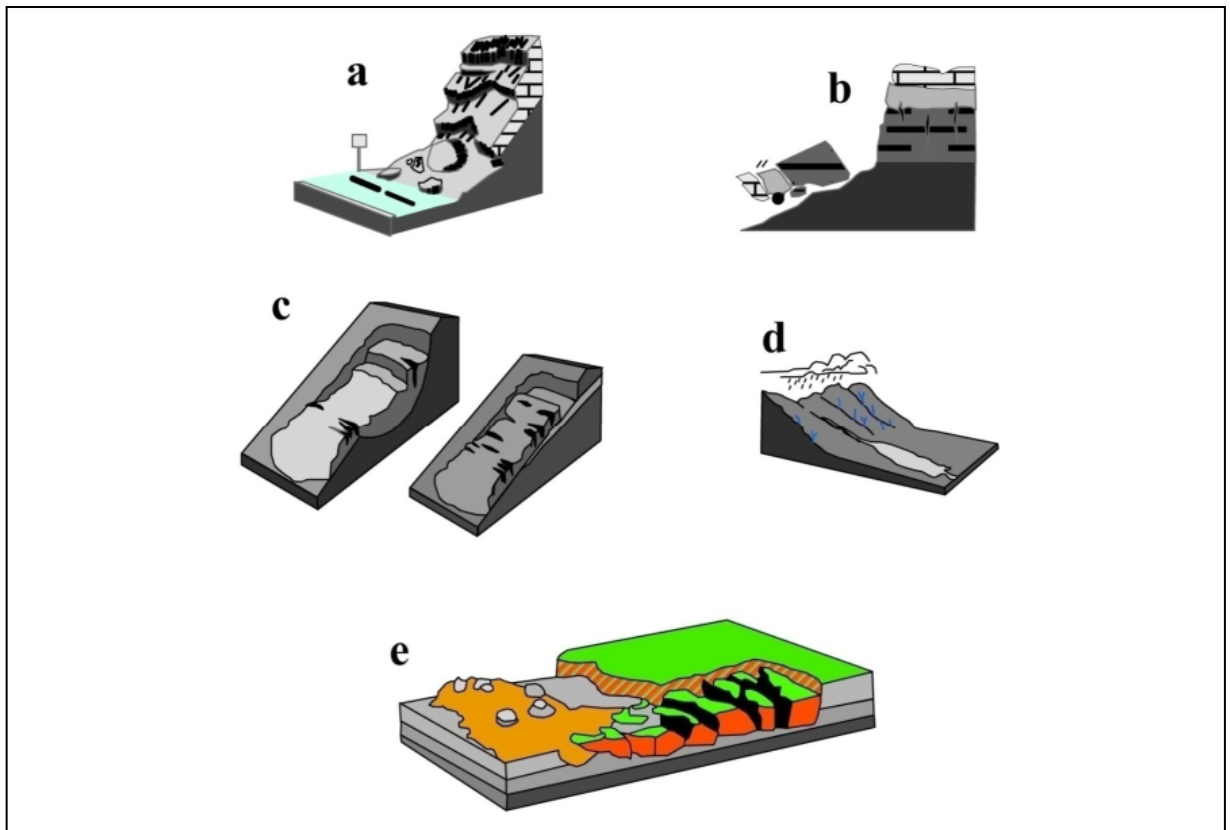


Figure 17 : les types de mouvement de terrain selon la classification de (Cruden and Varnes 1996) (Varnes 1978). (a) Les écoulements et chutes de blocs, (b) basculement, (c) glissement de terrain rotationnel et transrotationnel, (d) coulée boueuse, (e) déplacement latéral, in (Roukh 2020).

II.4. Vitesse du glissement de terrain :

La vitesse de glissement de terrain varie selon le type de mouvement de terrain ; elle varie de quelque millimètre par ans à plusieurs mètres par seconde. La surveillance des glissements de terrains par les méthodes géo spatiales permettant de mieux estimer la vitesse de déplacement d'une masse rocheuse.

Cette vitesse est hétérogène, elle est conditionnée généralement par les caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, géodynamiques et climatiques du milieu. Par exemple, les précipitations de forte intensité et les tremblements de terre de forte magnitude accentuant la vitesse des mouvements de terrain.

Selon la classification de , l'âge du dernier glissement de terrain peut être estimé en fonction des paramètres morphologiques du glissement de terrain (Figure 18) toutefois, dans les zones montagneuses où la végétation est très dense, les glissements de terrain ne sont pas visibles sur le terrain ou par l'analyse spatiale (Schlögel 2015)

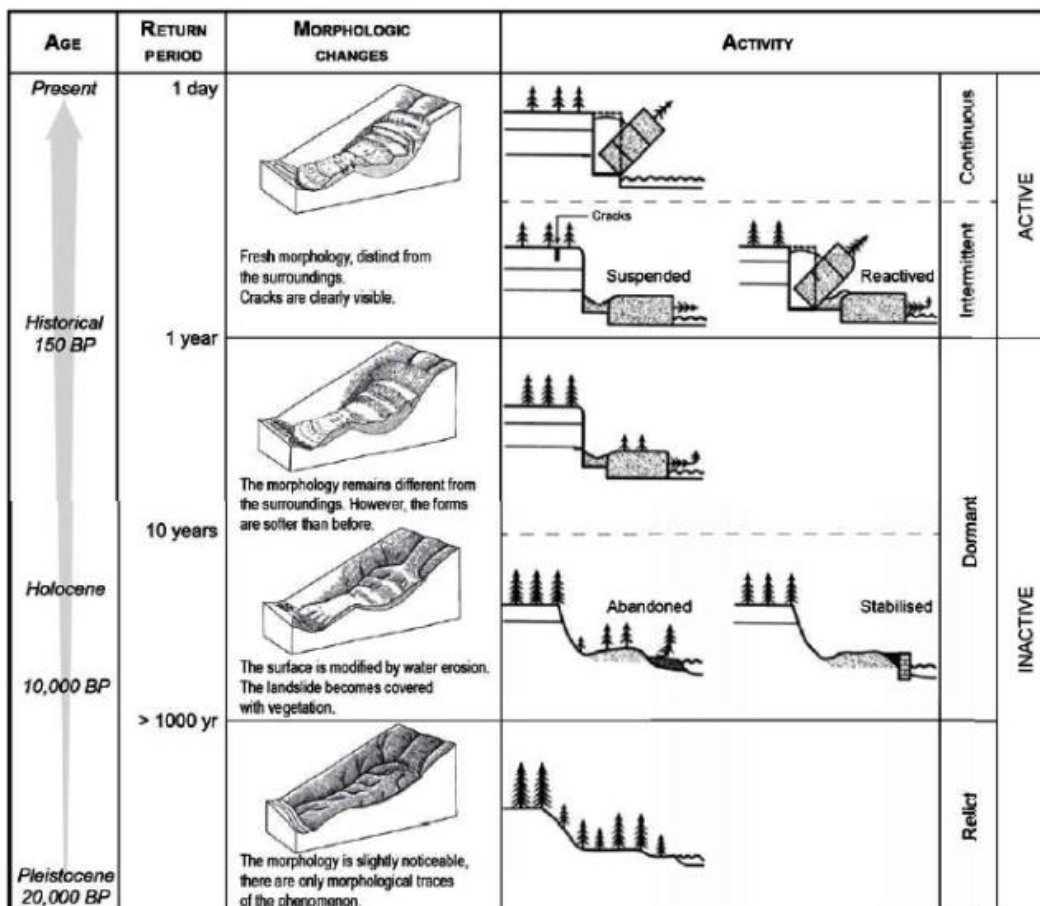


Figure 18 : classification de la vitesse des glissements de terrains selon les traits géomorphologique (Schlögel 2015) in (Roukh 2020).

Tableau 10: classes des vitesses définies par Varnes (1978).

Classe	Description	Vitesse
1	Extrêmement lente	moins de 16 mm/an
2	Très lente	de 1,6 m/an à 16 mm/an
3	Lente	de 13 m/mois à 1,6 m/an
4	Modérée	de 1,8 m/h à 13 m/mois
5	Rapide	de 3 m/min à 1,8 m/h
6	Très rapide	de 5 m/s à 3 m/min
7	Extrêmement rapide	plus de 5 m/sec

II.5. Principales causes des glissements :

Plusieurs facteurs contribuent au déclenchement des glissements, les plus importants étant :

- **La nature des terrains** : La nature de terrains dépend de la :
 - Géométrie de terrains
 - Résistance au cisaillement des sols ou des roches.
- **L'action de l'eau** : l'eau est dans la plupart des cas la cause principale dans la mise en mouvement des terrains.
- **Les actions climatiques** : Les facteurs climatiques prépondérants sont constitués par les apports d'eau. Les autres actions externes, susceptibles de modifier l'état d'équilibre d'un versant, résultent principalement de modifications de géométrie, de chargements et de déchargements.
- **Les causes mécaniques externes** : citons parmi les causes mécaniques externes, le terrassement au pied du talus, les entailles effectuées dans les talus, toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente, les vibrations naturelles (séismes) ou artificielles (explosion, machines ...).
- **Construction sur pente** : La construction de remblais sur pente naturelle diminue de l'ensemble pente et remblai.

II.6. Indices et phénomènes induits par les glissements :

Indices caractéristiques d'activité d'un glissement : niche d'arrachement, fissures, bourrelets, arbres basculés, zone de rétention d'eau, fissuration des bâtiments, déformation des routes, etc. phénomènes aggravants induits par les glissements de terrain:

- formation d'embâcles sur les cours d'eau.
 - laves torrentielles suite à l'apport de matériaux dans les cours d'eau
 - coulées de boue à partir des bourrelets de pieds formés de matériaux remaniés.
- Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité variables : des périodes de vitesse de glissement plus élevée avec des phases de calme apparent.

• Glissements de terrains actifs :

Un glissement de terrain est considéré comme actif si un mouvement peut être constaté. Le déplacement peut être minime, les déformations de moins d'un millimètre étant toutefois difficilement détectables. Les glissements actifs comprennent les glissements présentant des

vitesse plus ou moins constantes à long terme tout comme les glissements avec des phases successives d'accélération. (Figure 19).

• **Glissements de terrains réactivés :**

Désignent les glissements de terrain qui quittent une phase inactive pour entrer dans une phase active. Habituellement, les glissements de terrain réactivés se déplacent le long d'une surface de glissement existante. (Figure 19).

- **Glissements de terrains inactifs :**

Désignent les glissements de terrain restés immobiles pendant plusieurs années.

Ceux-ci se subdivisent en quatre catégories :

- Glissements bloqués.
- Glissements latents.
- Glissements abandonnés.
- Glissements stabilisés. (Figure 19).

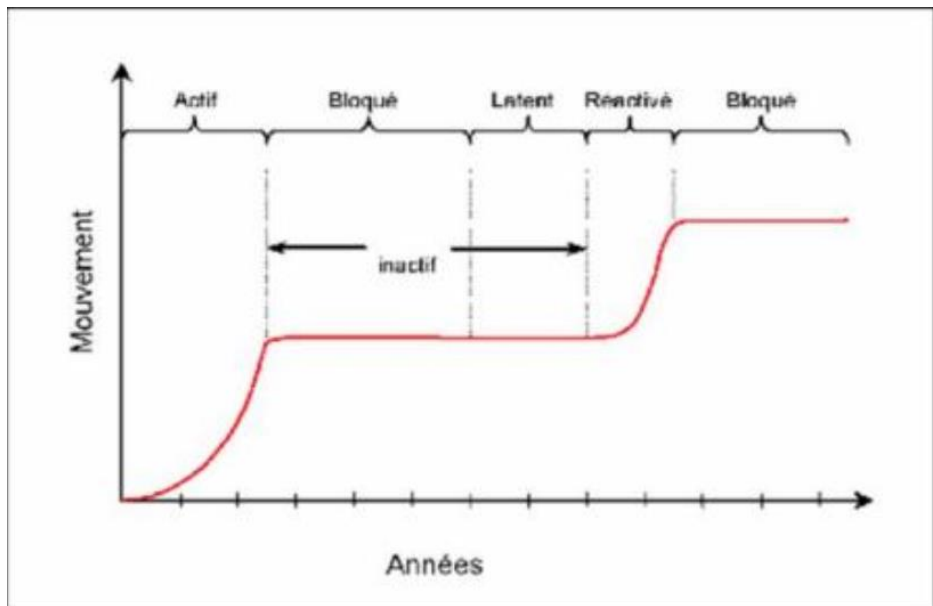


Figure.19 : Différentes phases de l'activité d'un glissement de terrain in (Lahmidi 2021) .

CHAPITRE III :
METHODES ET TECHNIQUES
D'ÉVALUATION DE LA
SUSCEPTIBILITE DES
MOUVEMENTS DE TERRAIN.

III.1. Les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité :

Afin d'évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers, plusieurs approches et techniques ont été proposées. Il s'agit notamment des inventaires des glissements de terrain, du zonage heuristique du terrain et de la vulnérabilité, des méthodes statistiques, des méthodes déterministes, des méthodes probabilistes, etc. (Reichenbach et al., 2018; Corominas et al., 2014; Raghuvanshi et al. 2014; Kanungo et al., 2006; Aleotti et Chowdhury 1999; Guzzetti et al., 1999). D'une manière générale, toutes ces techniques ou approches peuvent être classées en approches qualitatives et quantitatives (fig. 1). Les approches qualitatives comprennent l'analyse ou l'inventaire de la distribution, l'analyse géomorphique et les techniques d'évaluation expertes (heuristiques) qui sont basées sur les connaissances et l'expérience de l'évaluateur (Corominas et al. 2014; Raghuvanshi et al., 2014a). Les approches quantitatives comprennent principalement des techniques statistiques, déterministes, probabilistes et sans distribution (Raghuvanshi et al., 2014; Kanungo et al., 2006). Les approches qualitatives sont considérées comme subjectives (Girma et al., 2015; Raghuvanshi et al. 2014a; Kanungo et al., 2006;; Casagli et al., 2004) considérant que les approches quantitatives sont considérées comme objectives par nature (Girma et al., 2015). Ces derniers temps, des approches quantitatives ont été largement utilisées pour la Susceptibilité aux glissements de terrain et l'évaluation des dangers (Figure 20).

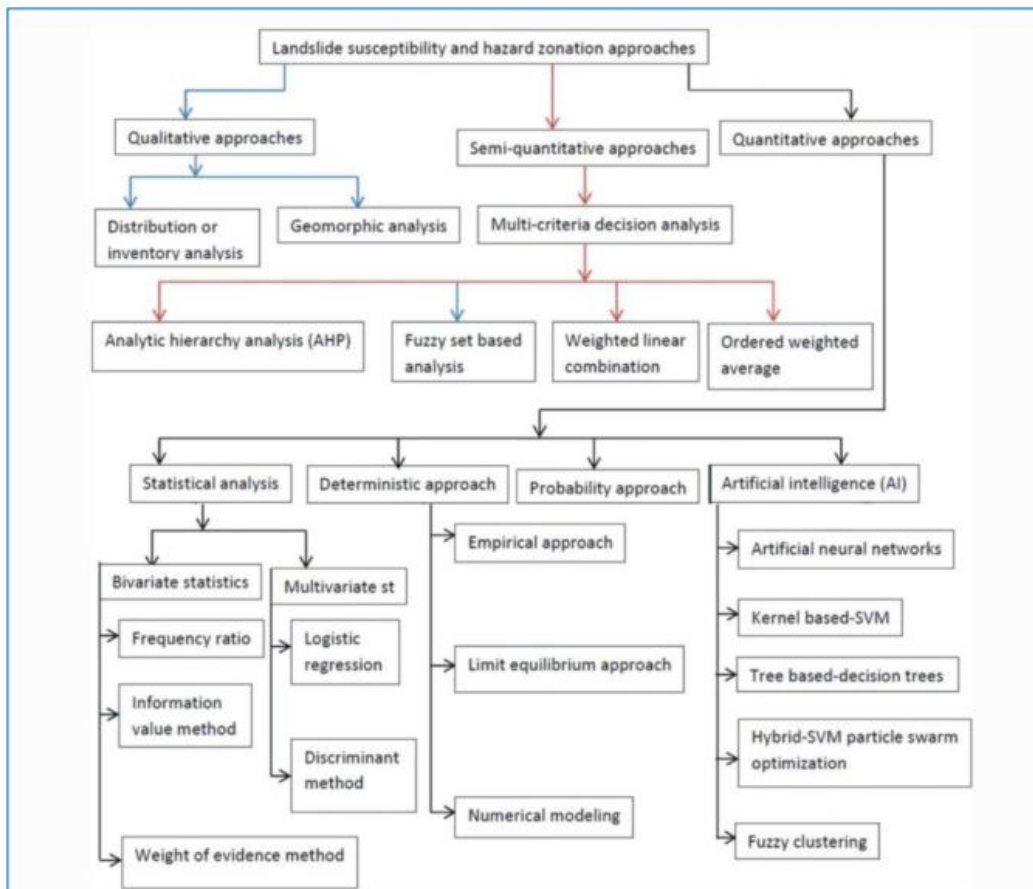


Figure 20: technique et method d'évaluation de la susceptibilité aux glissement de terrain. (in Lahmidi 2021)

III.1.1. Approches semi-quantitatives :

III.1.1.1. Méthodes d'analyse multicritiques :

Ces méthodes sont des approches semi-quantitatives qui sont principalement utilisées pour l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain (Abija et al. 2020; Erenner et al., 2016; Ahmed 2015; Feizizadeh et al. 2014; Kavzoglu et al., 2013; Feizizadeh et Blaschke 2012; Gorsevski et Jankowski, 2010) et les études de zonage des dangers (Bera et al., 2019). Les méthodes qui sont catégorisées dans l'analyse multicritères sont le Processus De Hiérarchie Analytique (AHP), l'analyse basée sur des ensembles flous, la combinaison linéaire pondérée et la moyenne pondérée ordonnée (Bera et al. 2019; Ahmed 2015; Feizizadeh et Blaschke, 2012). Récemment, pour minimiser la subjectivité pendant les facteurs pondérant des approches logiques floues sont également utilisés. Certains sous-groupes susmentionnés de méthodes de décision multicritiques sont examinés dans les paragraphes suivants. Il s'agit de l'AHP, le concept de logique floue et de la méthode de superposition pondérée .

a. Approche de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) :

L'AHP est une approche de prise de décision multicritique qui est utilisée pour évaluer la Susceptibilité aux risques de glissement de terrain et la cartographie de la zonation des dangers. Il s'agit d'une approche systématique qui implique la définition des problèmes, la détermination des objectifs et des solutions de rechange, la formulation d'une matrice de comparaison par paires, la détermination du poids et la recherche d'une priorité globale (Pardeshi et al. 2013; Saaty, 2006). Le glissement de terrain est un processus complexe qui résulte de la combinaison de divers facteurs causatifs (Raghuvanshi, 2019; Chimidi et al., 2017). L'approche AHP peut être appliquée en valeur absolue ou relative de la relation entre les facteurs causatifs et les glissements de terrain. En mesure absolue, chaque alternative est comparée à une alternative idéale tandis que, dans la mesure relative, chaque alternative est comparée à de nombreuses autres alternatives. L'approche de mesure absolue est normative et est conditionnée par ce qui est connu pour être le meilleur. En revanche, l'approche de mesure relative est conditionnée par l'expérience et la capacité de juger les observations d'un évaluateur, de ce fait, elle est de nature descriptive (Pardeshi et al. 2013; Saaty et Vargas, 2006; Saaty, 2006). Chacun des facteurs de causalité du glissement de terrain peut être considéré comme une alternative. De plus, ces facteurs causatifs sont attribués avec des nombres absolus (1 à 9) en fonction de leur importance relative dans l'induction de

l'instabilité de la pente (Yagi, 2003). Ainsi, des matrices de comparaison sont élaborées pour déterminer le ratio de cohérence (RC) et l'indice de cohérence (IC) (Pardeshi et al., 2013).

b. Méthode de superposition pondérée :

La méthode de recouvrement pondéré est une méthode simple et directe qui peut être utilisée pour l'évaluation du risque de glissement de terrain dans la zone donnée (Ayele et al., 2014; Erener et Duzgun 2012; Bachri et Shresta 2010; Intarawichian et Dasananda, 2010). Cette méthode est basée sur l'hypothèse que les conditions qui ont entraîné les glissements de terrain passés si se reproduire à l'avenir dans d'autres zones, encore une fois des glissements de terrain peuvent se produire. Dans la méthode de superposition pondérée, pour chaque couche de facteur causal considérée, chaque cellule est reclassée en fonction de l'échelle préférée en fonction de l'importance par rapport à la contribution que la classe de facteurs particulière peut avoir sur l'occurrence d'un glissement de terrain. Cette échelle préférée est généralement prise de 1 à 9, 9 étant la plus importante par rapport à l'événement de glissement de terrain. Ainsi, toutes les couches de facteurs causatifs sont combinées dans un environnement SIG à l'aide de l'équation du modèle de superposition pondérée. En outre, des poids respectifs sont également attribués aux facteurs causatifs sur une échelle ordinale de 0 à 9. Les nombres numériques attribués à la classe de facteurs sont appelés cotes et les nombres attribués aux facteurs causals respectifs sont connus sous le nom de poids (Kanungo et al., 2006; Lee et al., 2004). Le poids ou la cote plus élevé d'un facteur causal ou de sa classe respective représente sa plus grande importance pour l'occurrence d'un glissement de terrain (Ayele et al., 2014).

$$s = \frac{\sum W_{Ji} S_{ij}}{\sum W_{Je}}$$

Où; J_e est le poids de la 1ère carte de facteurs, S_{ij} est le poids de la classe spatiale de la carte factorielle 'jth', 'S' est la valeur de l'unité spatiale dans la carte en sortie.

c. Méthode logique floue :

Les processus, événements ou fonctions qui changent continuellement peuvent éventuellement ne pas être définis en termes d'événements vrais ou faux, ainsi ces événements ou activités sont exprimées de manière floue. Les choses qui sont vagues ou non claires sont connues comme floues. La logique floue est considérée comme un sur-ensemble de logique booléenne qui est une extension pour traiter les valeurs de vérité partielles qui sont complètement fausses ou complètement vraies (Lee 2007; Chacón et al., 2006; Gorsevski

et al., 2003). La méthode de la logique floue est appliquée dans les études de glissement de terrain pour éviter la subjectivité en raison de la sélection de divers facteurs causatifs multiples (Meten et al. 2015; Chacón et al., 2006). La méthode de la logique floue est basée sur la théorie des ensembles flous dans laquelle les degrés d'appartenance des éléments peuvent avoir différents degrés de confiance dans un intervalle de [0, 1] (Ross 2010; Lee 2007; Kanungo et al., 2006). Il existe divers opérateurs flous qui peuvent être utilisés, ceux-ci sont; 'flou ou', 'flou et', 'produit algébrique flou', 'somme algébrique floue' et 'opérateur gamma'.

$$\mu_{Combination} = \text{Min} (\mu_{un}, \mu_B, \mu_C \text{ Il y a un. } \text{http://www.unece})$$

III.1.2. Approches quantitatives :

III.1.2.1. Approches statistiques :

Les approches statistiques sont les méthodes les plus couramment utilisées pour la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers. Des examens sur diverses méthodes mises au point dans le cadre d'évaluations et de développements antérieurs et ultérieurs de méthodes ont été présentés par Reichenbach et al.(2018), Corominas et al.(2014) et Fell et al.(2008). Certaines des techniques, qui ont été développées plus tôt, ont été abandonnées, certaines méthodes ont été modifiées et de nouvelles techniques sont toujours en cours de développement (Ayalew et Yamagishi 2005). Un examen approfondi de la littérature effectué au cours des présents travaux a révélé que les techniques statistiques qui ont été utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage par les chercheurs précédents peuvent être classées de manière générale dans; Approches statistiques bivariées et multivariées.

a. Approche statistique bivariée :

Les méthodes bivariées, fondées sur la détermination de la densité des glissements de terrain par chaque classe, des différents facteurs générateurs. Pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain par l'analyse statistique bivariée (Van Westen 1993) a suggéré la procédure suivante :

- I. Classification de chaque facteur en un certain nombre de classes pertinentes.
- II. Combinaison les classes des facteurs avec la carte d'inventaire des glissements de terrain (1 pour la présence du glissement et 0 pour l'absence du glissement de terrain) par la technique de la superposition.
- III. Calcul du poids de chaque classe suivant les résultats de combinaison.
- IV. Intégrations du poids de chaque classe suivant les résultats III, combinaison des cartes obtenues par l'addition, classification de l'indice de la susceptibilité en nombre de classes définies, validation du modèle statistique par la combinaison de la carte finale avec la carte d'inventaire.

Plusieurs méthodes ont été proposées par l'utilisation de l'analyse statistique bivariée pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain : la valeur informative (Saha et al. 2005; Yin and Yan 1988), rapport de fréquence (Lee and Talib 2005), la théorie de l'évidence (Lee and Talib 2005; Regmi et al. 2010), méthode de la susceptibilité (Van Westen 1993). Ainsi que d'autres chercheurs utilisent ces méthodes pour différentes régions afin de cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain.

1-Méthode d'analyse fréquentielle (rapport de vraisemblance) :

Parmi les approches statistiques bivariées L'analyse de fréquence est la méthode la plus couramment utilisée (Chimidi et al. 2017; Hamza et Raghuvanshi 2017; Girma et al., 2015; Lee et Min, 2001). Cette méthode utilise la corrélation entre chacune des classes de facteurs responsables et la distribution spatiale des glissements de terrain passés dans la région (Chimidi et al., 2017; Girma et al., 2015; Mounq-Jin et al. 2014; Akgun et al., 2012; Pradhan et Lee 2009; Lee, 2005). La méthode d'analyse de fréquence est basée sur le rapport entre les glissements de terrain dans une classe de facteurs en pourcentage des glissements de terrain et la surface de la classe de facteurs en pourcentage de la zone entière.

2-Méthode du « Weights of Evidence » poids de la preuve (WOE) :

La méthode du poids de la preuve (WOE) est largement utilisée pour la prévision des zones potentiellement sensibles aux glissements de terrain (Süzen et Doyuran, 2004; Van Westen et al., 2003; Van Westen, 1993). Cette méthode est utilisée pour combiner l'ensemble de données des glissements de terrain au moyen d'une approche quantitative axée sur les données. Avec la méthode WOE probabilité préalable (Prior), Probabilités conditionnelles (Cond) et les poids négatifs et positifs de la vulnérabilité aux glissements de terrain peuvent

être calculés. Pour 'Prior_p' la densité de glissement de terrain doit être calculée comme le nombre total de pixels dans la zone couverte par les glissements de terrain par rapport au nombre total de pixels dans la zone étudiée.

b. Approche statistique multivariée :

La vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers au moyen d'une approche statistique multivariée sont fondés sur la relation entre la contribution relative de chacun des facteurs causatifs et la vulnérabilité totale aux glissements de terrain dans la région (Nandi et Shakoor, 2009; Kanungo et al., 2009; Ayalew et Yamagishi 2005; Süzen et Doyuran 2004; Dai et al., 2001). Dans les méthodes multivariées d'analyse de la Susceptibilité aux glissements de terrain, le pourcentage de glissements de terrain pour chaque pixel est déterminé et la couche de données sur la présence ou l'absence de glissements de terrain est développée par analyse statistique. Les méthodes statistiques multivariées couramment utilisées pour la vulnérabilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers sont les suivantes: Modèle de régression logistique, modèles de régression multiple et analyse discriminante (Kanungo et al., 2006; Guzzetti et al., 1999; Chung et Fabbri 1995; Van Westen 1993; van Westen 1994; Yin et Yan, 1988).

III.1.2.2. Méthodes d'intelligence artificielle (IA) :

La méthode de l'intelligence artificielle (IA) utilise certains des concepts statistiques. Cependant, ces méthodes sont basées sur des hypothèses, des algorithmes prédéterminés et des résultats. Les méthodes d'IA conviennent lorsqu'une relation mathématique directe ne peut être établie entre la cause et l'effet. Il existe un certain nombre de méthodes d'IA ou de méthodes d'apprentissage automatique (Kavzoglu et al., 2018) qui peuvent être utilisées pour les études sur les glissements de terrain. Ceux-ci peuvent être classés comme ; réseaux neuronaux artificiels (ANN), méthodes basées sur le flou, hybrides, basées sur le noyau et basées sur l'arbre (arbre de décision). En outre, il existe un certain nombre de sous-méthodes sous chaque catégorie, pour instantané, ann-adaptive neuro-fuzzy système d'inférence, réseau neuronal de rétro-propagation, etc.

III.1.2.3. Approche probabiliste :

Afin d'évaluer la Susceptibilité aux glissements de terrain et le zonage des dangers, le degré de relation entre la distribution passée des glissements de terrain et les facteurs causatifs est converti en une valeur basée sur une fonction de distribution de probabilité. L'approche probabiliste aide à prédire la probabilité de distribution spatiale et temporelle des glissements de terrain dans la zone donnée (Lari et al., 2014; Guzzetti et al., 2005b). L'approche utilise la comparaison de la distribution spatiale des glissements de terrain avec les facteurs causatifs considérés (variables explicatives) dans un cadre de théorie probabiliste (Lari et al. 2014; Kanungo et al., 2009; Straub et Schubert, 2008). L'approche probabiliste, bien que considérée comme quantitative, présente un certain degré de subjectivité dans l'attribution des poids à divers facteurs causatifs (Kanungo et al., 2006). Ainsi, l'approche probabiliste peut être considérée comme semi-quantitative.

III.1.2.4. Approche déterministe :

L'approche déterministe tient compte de l'évaluation des risques de glissement de terrain selon les lois mécaniques. Ces méthodes comprennent des méthodes empiriques (Raghuvanshi, 2019; Liu et Chen, 2007; Hack 1998; Anbalagan 1992; Romana 1985; Selby, 1980), méthodes cinématiques (Raghuvanshi, 2019; ZainAlabideen et Helal 2016; Karaman et al., 2013; Kulatilake et al., 2011; Goodman, 1989), modélisation statique des pentes infinies (Pack et al., 1998; Dietrich et al., 1995), modélisation dynamique des pentes infinies (Simoni et al., 2008; Baum et al., 2002), 2-D (Sharma et al., 1995; Hoek et Bray, 1981) et l'équilibre limite 3D et la modélisation numérique (Raghuvanshi, 2019; Tang et al., 2016; Karaman et al., 2013; GEO-SLOPE 2011; Gitirana Jr. et al. 2008; Stead et al., 2006; Hungr et Rawlings, 1995). Les principaux facteurs qui sont pris en compte pour les techniques déterministes sont; la géométrie de la pente, les caractéristiques de discontinuité et sa relation avec la pente, l'état des eaux souterraines et le drainage de surface.

III.1.3. L'approche qualitative :

Est basée sur l'opinion de l'expert (Leroi 1996), elle est souvent classé en trois types :

III.1.3.1. La cartographie d'inventaire des phénomènes :

Dit carte de constat, qui présente l'outil fondamental pour l'établissement des cartes géomorphologiques ainsi pour évaluer le taux de la susceptibilité aux glissements de terrain. L'utilisation du système d'information géographique SIG facilite l'établissement

de ces cartes (Van Westen et al. 2006; Van Westen 2000) grâce à différents supports tels que les photos aériennes, images satellite couplées à levées de terrain et les compléments de documents historiques. La carte d'inventaire résultante décrit pour chaque glissement, le type de mouvement, l'état d'activité, la direction principale du mouvement, l'épaisseur estimée du matériau mobilisé, et les dates relatives à leur activité (Wieczorek 1984). La carte d'inventaire est considérée comme une forme élémentaire de carte d'aléa (Guzzetti et al. 2012; Soeters and van Westen 1996). Par exemple (Chau et al. 2004) sont utilisés la carte d'inventaire pour cartographier l'aléa du glissements de terrain de l'île de Hong Kong (Figure 21), où 921 informations de glissements de terrain affectant la zone d'étude entre 1984 et 1996 suivies par l'élaboration d'une carte d'aléa de plusieurs niveaux (0.25, 0.75, 1.25, 2.4 et 5 unités) chaque unité correspond à 1.23 glissement ; par km².

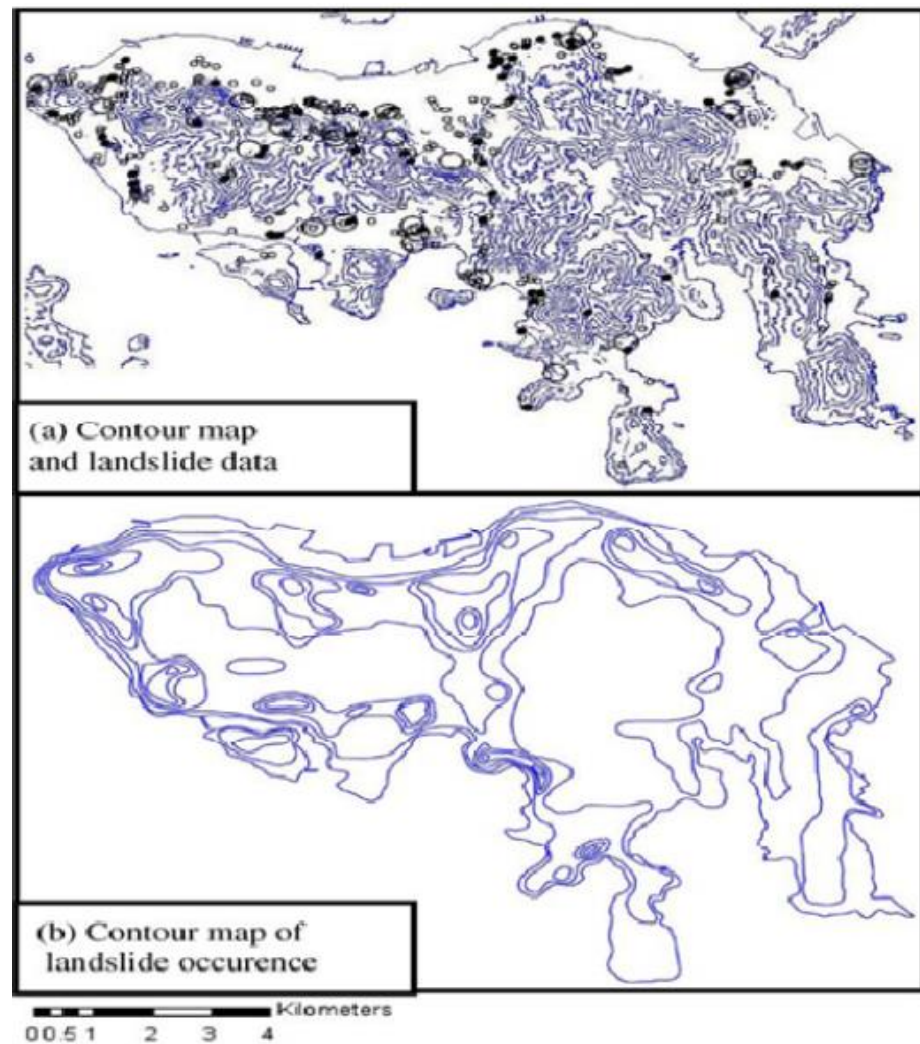


Figure 21 : a) carte d'inventaire des glissements de terrain, b) carte d'aléa des glissements de terrain de l'île de Hong Kong (Chau et al. 2004).

III.1.3.2. Analyse géomorphologique:

Cette méthode dite cartographe direct ou expert (Soeters and van Westen 1996; Van Westen 2000) dans cette méthode c'est l'expérience et les compétences en mouvement de terrain du géologue qui permet d'identifier précisément l'aléa. Parmi les premières cartes géomorphologiques utilisées en domaine des risques liés au mouvement de terrain, on a la carte ZERMOS (Zone d'Exposition au Risque de Mouvement de Sol et sous sol), c'est une carte de synthèse à moyenne échelle (1/20.000 ou 1/25.000) s'appuyant sur l'analyse, à un moment donné, du mouvement de terrains existants et des facteurs prouvant avoir des instabilités des terrains. La carte ZERMOS, à travers le zonage des terrains, a pour objet d'estimer la probabilité pour que un événement survienne, sur un territoire donné, tel que les mouvements des terrains. Les auteurs ont constitué une grille d'évaluation qui permet de déterminer, pour chaque type de phénomène (cas d'instabilités rocheuses et de glissements de sols), le degré d'aléa (0, 1, 2, 3 ou 4 en degré croissant), d'après son intensité (liée au type de phénomène et à sa dynamique) et sa modalité d'occurrence temporelle. Les cartes ZERMOS présentent une première vision cartographique du risque (Humbert 1977). L'analyse géomorphologique fournit une évaluation rapide de l'aléa pour un secteur donné en tenant compte d'un très grand nombre de facteurs (Thierry 2007). La Figure 21 présente une carte géomorphologique utilisée comme un support direct à cartographie l'aléa des glissements de terrain réalisé par (Van Westen et al. 2003) appliqué au bassin versant de l'Alpago, Italie (Figure 22).

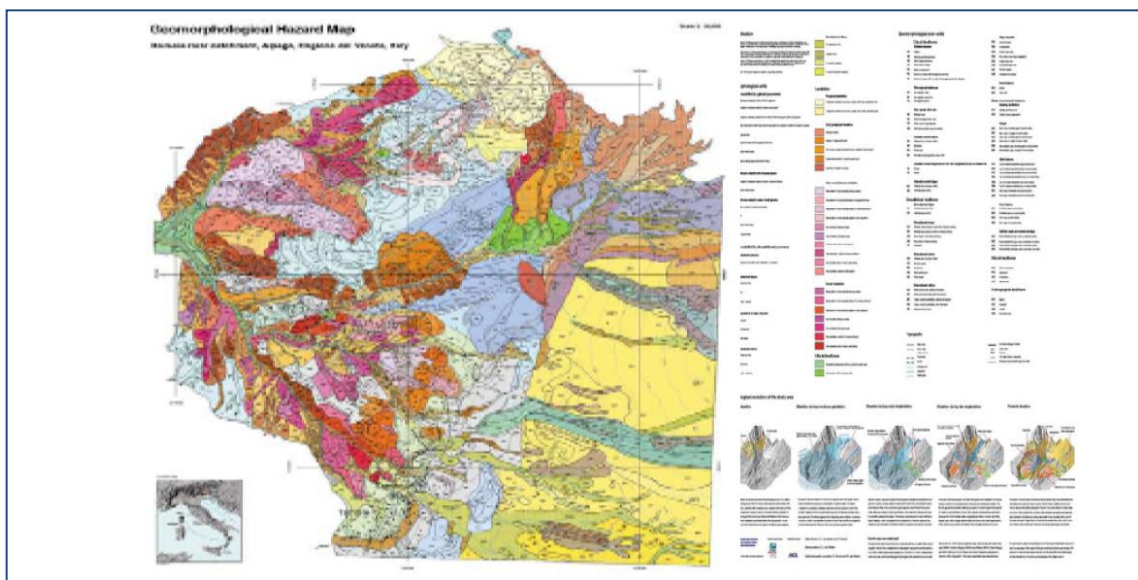


Figure 22 : Carte géomorphologiques de l'aléa des mouvements de terrain (bassin versant de l'Alpago, Italie) (Van Westen et al. 2003).

III.1.3.3. Cartographie par analyse de pondération de facteurs :

dans cette approche, l'expert sélectionne et cartographie les facteurs les plus influents à la stabilité du versant (Aleotti and Chowdhury 1999). Ensuite, il convient d'attribuer à chaque facteur une valeur en rapport avec sa contribution dans la génération des instabilités (Guzzetti et al. 1999). Chaque carte additionnée ou superposée pour produire en conséquence une carte d'aléa (Stevenson 1977) ; (Figure 23).

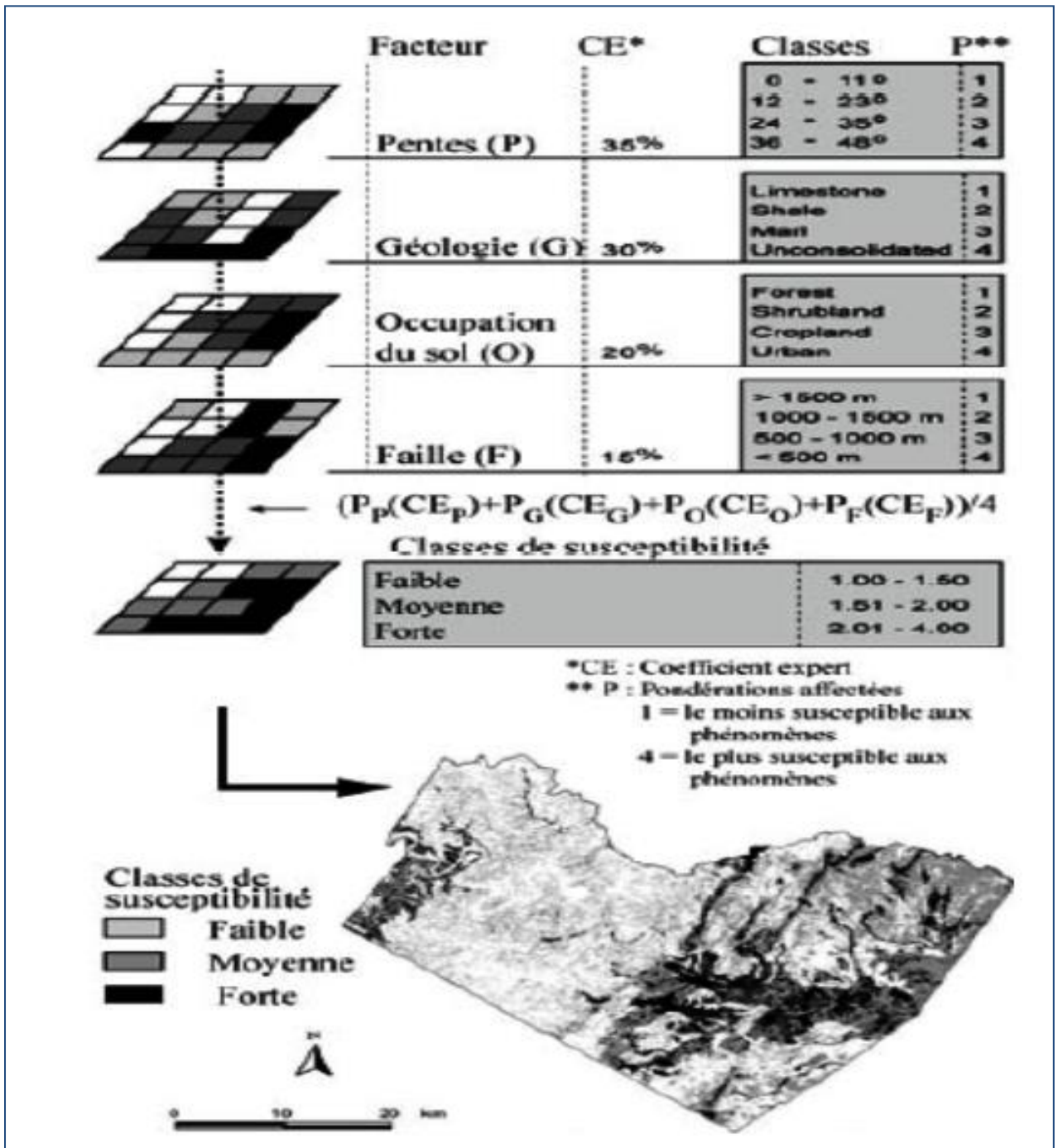


Figure 23 : Exemple de la cartographie par pondération de facteurs in (Thierry 2007)

CHAPITRE IV :

CARTOGRAPHIE DE LA

SUSCEPTIBILITE AU GLISSEMENT

DE TERRAIN DE LA FRANGE

MARITIME D'ORAN.

IV.1. Etude des glissements de terrain cas de la frange maritime d'Oran :

Lors des travaux du projet '*Liaison Autoroutière Reliant Le Port d'Oran à l'Autoroute Est Ouest Sur les 26 Km 1ère Tranche Sur 08 Km*' des glissements de terrain sont observés aux niveaux de quelque site du tracé, il s'agit des glissements de terrain indexés G1, G2, G3, G4 et G5.

Cette partie porte sur des études géologiques, géotechniques et des mesures d'inclinomètre et piézométriques récents de quelque glissement de terrain inventoriés dans la même zone suite à des bases de données disponibles au niveau des services (ANA 2019).

IV.1.1. Glissement de terrain G1_G2 :

Les glissements de terrain G1 et G2 sont situés dans la partie basale de la falaise d'Oran (Figure 24), ils s'étendent sur une superficie de 310154 m². Les investigations sur la zone G1 et G2 comprenant 8 sondages afin de déterminer la nature des formations lithologiques en profondeur, ainsi que 5 inclinomètres pour estimer la vitesse de déplacement, de l'emplacement et la profondeur des sondages et les inclinomètres .

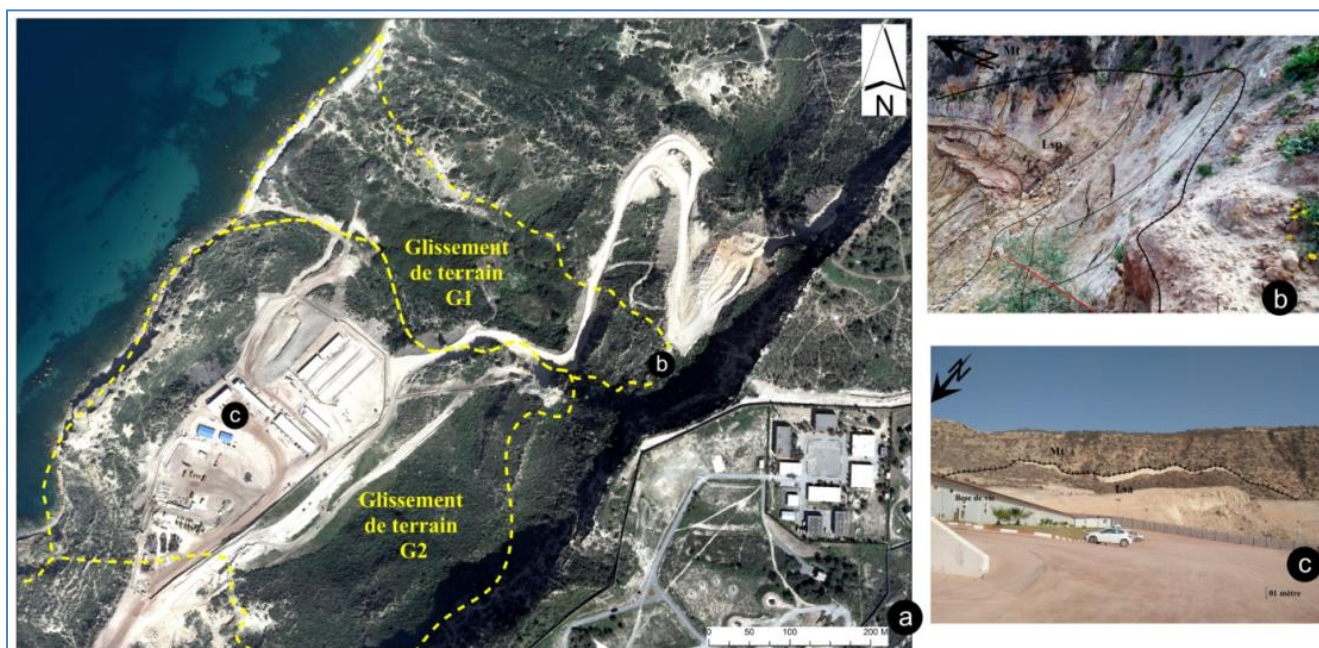


Figure 24 : Glissements de terrain G1 et G2, (a) vue aérienne des glissements de terrain G1 et G2 (Image DMC 0.13*0.13), (b) et (c) illustrations photographiques des conséquences directes des glissements de terrain G1 et G2.in(Roukh 2020).

IV.1.1.1. Géologie et stratification dans la zone des glissements G1 et G2 :

Les différents sondages (Figure 25) montrent que la zone des glissements de terrain G1 et G2 appartient quatre unités géologiques:

– Matériau du glissement (Lsa):

Cette unité est constituée de sable de couleur beige jaunâtre et de ciment calcaireux contenant des passages centimétriques de sable à grains fins à moyens de couleur beige à beige jaunâtre, Il comprend la masse en mouvement du glissement en question.

– Matériau de glissement (Lsp) :

Cette zone est définie comme un matériau potentiel de glissement (Lsp) car cette masse est sujette à des problèmes de stabilité, Ce matériau comprend du sable fin de couleur jaunâtre à beige légèrement graveleuse et du grès moyennement dur de couleur beige à jaunâtre avec du ciment calcaire.

– Grès - Grès calcaire –et Alternances de calcaire sableux (Mt) :

Cette unité est composée de sable (Mt (W5)) de couleur jaunâtre à beige, dense, fin à moyen et de grès fin à moyen, jaunâtre à beige (Mt) avec du ciment calcaire qui se présente sous forme concassée à certains endroits, avec la présence de cavités et intercalation d'un passage de sable fin.

– Marne - Alternance d'argile (Mm) L'unité 'Mm' sous-jacente au 'Lsa' qui consiste en facies de marnes de couleur grise oxydées par endroits.

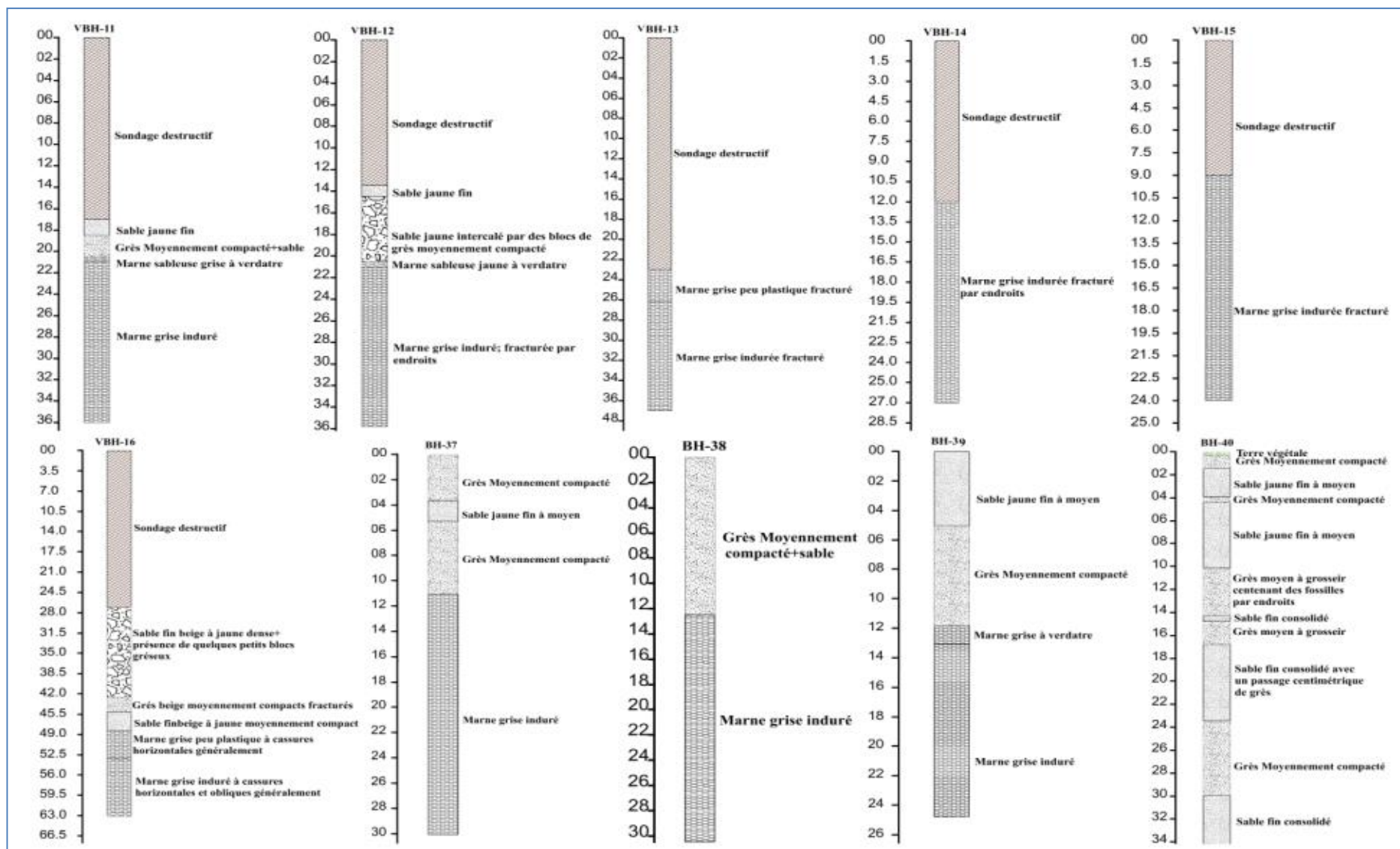


Figure 25 : Logs des sondages réalisés au niveau de la zone des glissements G1 et G2.in(Roukh 2020).

IV.1.1.2. Interprétation des résultats inclinomètres

L'installation des inclinomètres au niveau de la zone de glissement de terrain G1 et G2 a pour objet mesurer la vitesse de déplacement encaissant suite à des instabilités de terrain.

Les résultats des inclinomètres installés au niveau de la zone G1 et G2 sont résumés dans le tableau 2.9. La lecture inclinométrique INC-09, montre que la vitesse de déplacement calculé pour une période de 37 jours est d'ordre de 0.45 mm/jour à une profondeur de 21 m. Au niveau de l'inclinomètre INC-10, la déformation est enregistrée entre [8.5 et 14.5] mètres de profondeur avec une vitesse de déplacement de 0.38mm/jour pour une période de surveillance de 44 jours. Au niveau de l'inclinomètre I5 les données montrent que le niveau de mouvement estimé varie entre 21 et 29 mètre. Pour le l'inclinomètre I4 aucun déplacement est enregistré au cours de la période de surveillance. (La figure 26) représentée les lectures enregistrées au niveau des cinq inclinomètres.

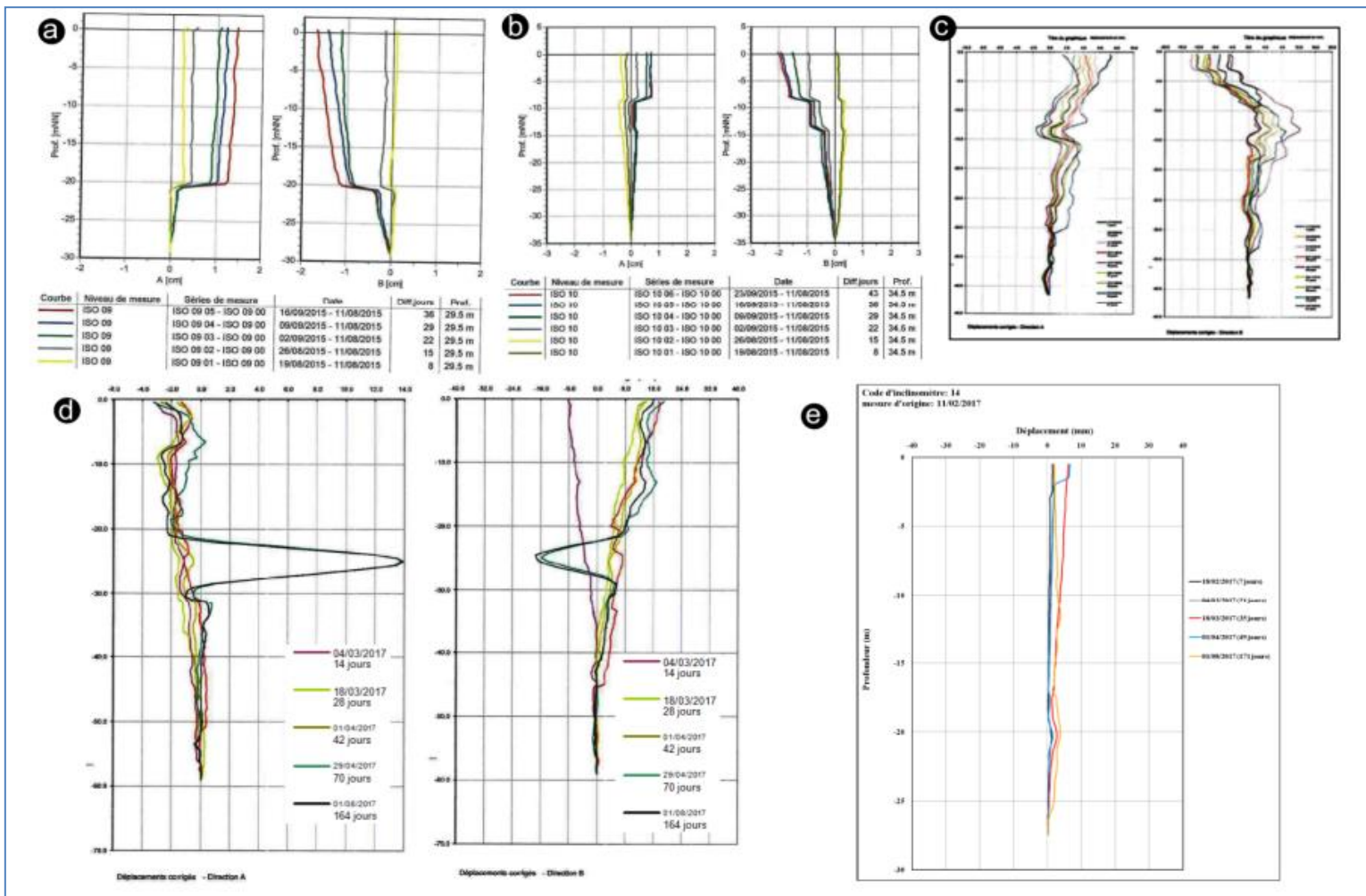


Figure 26 : résultats inclinométriques, (a) inclinomètre INC-9, (b) inclinomètre INC-10, (c), inclinomètre INC-G, (d) inclinomètre I-5, (e) inclinomètre I-4 (ANA 2019).in(Roukh 2020).

IV.1.1.3. Données piézométriques des sondages réalisés dans la zone d'étude :

Au niveau de la zone d'étude quatre sondages sont réalisés afin de suivre le niveau piézométrique des eaux souterraines (Figure 27). pour connaître les profondeurs, le niveau du marne ainsi que les dates et les lectures piézométriques correspondant aux sondages VBH14, VBH16, VBH18 et VPR 15.

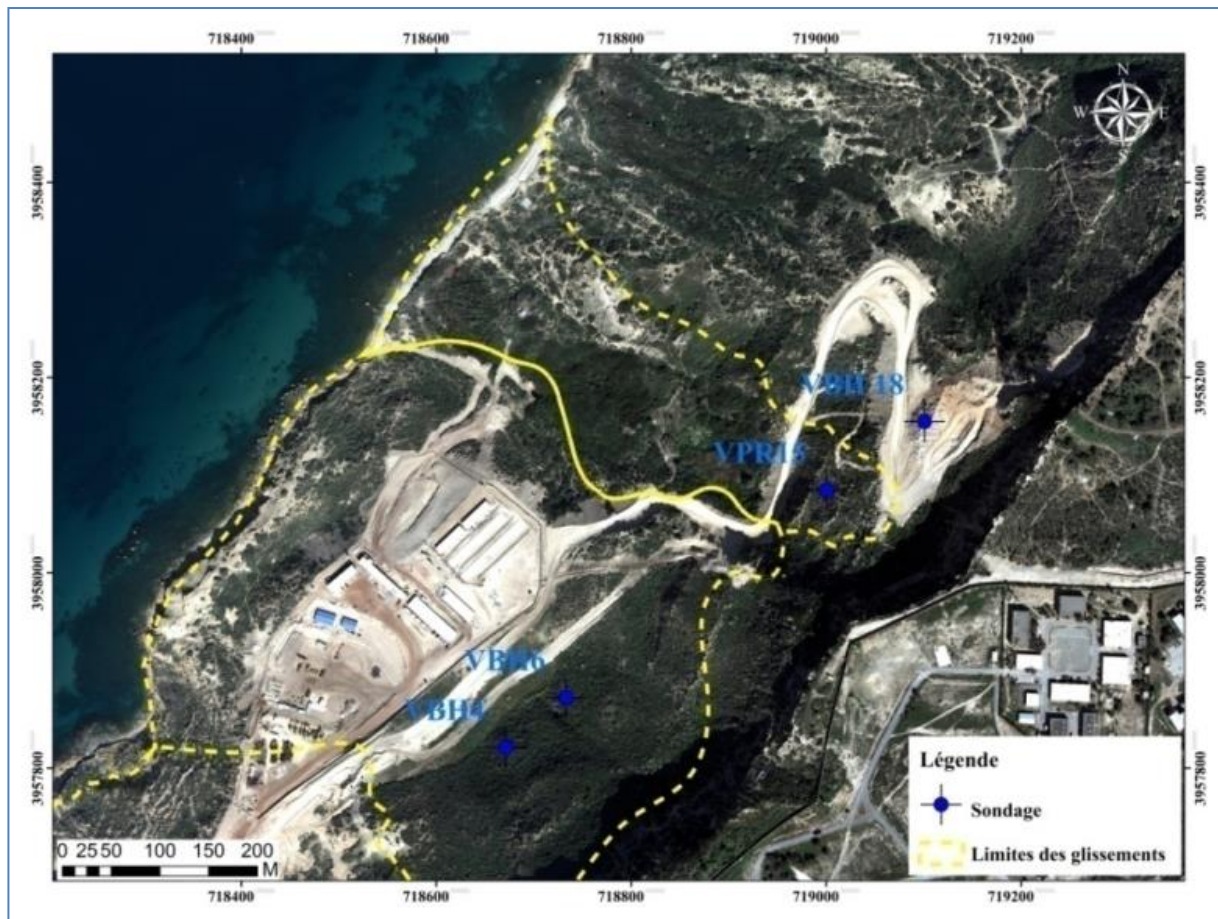


Figure 27 : Position des sondages réalisés pour suivre le niveau piézométrique in(Roukh2020)

Les mesures piézométriques effectuées sont réalisées au cours de périodes assez courtes, mais certaines sont relativement plus étalées. L'analyse des résultats issus des mesures effectuées montre qu'au niveau de la zone d'étude, les sables et les grés situés au dessus des formations marneuses constituant un aquifère dont le niveau piézométrique est atteint parfois 5 mètres de hauteur par rapport au substratum. La présence d'eau dans la zone d'étude confirme que le milieu étudié est susceptible aux mouvements de terrain potentiels.

IV.1.1.4. Type des glissements de terrain

L'analyse des données précédentes montre que les glissements de terrains G1 et G2 interviennent dans les matériaux des glissements Lsa et Lsp déposés sur la partie médiane du versant à une formation marneuse, suite a la classification de Varnes 1978 et les coupes interprétatives établie de la structure interne (Figure 28), les glissements de

terrain G1 et G2 sont de type rotationnel ou la surface de rupture forme généralement une structure circulaire. La profondeur de la surface de rupture varie entre 20 et 25 mètres, indiquant que ces deux glissements sont plus moins profonds. La vitesse de déplacement estimée par les données inclinomètres des zones G1 et G2 varie entre 0.18 et 0.45 mm/ jour traduisant la rapidité des glissements de terrain G1 et G2. Le niveau piézométrique mesuré dans quelques points, nous indique la présence d'eau en ce milieu. Ce facteur joue un rôle très important dans le processus des glissements de terrain. **Les glissements de terrain G1 et G2 sont considérés comme des glissements rotationnels, profonds et actifs.**

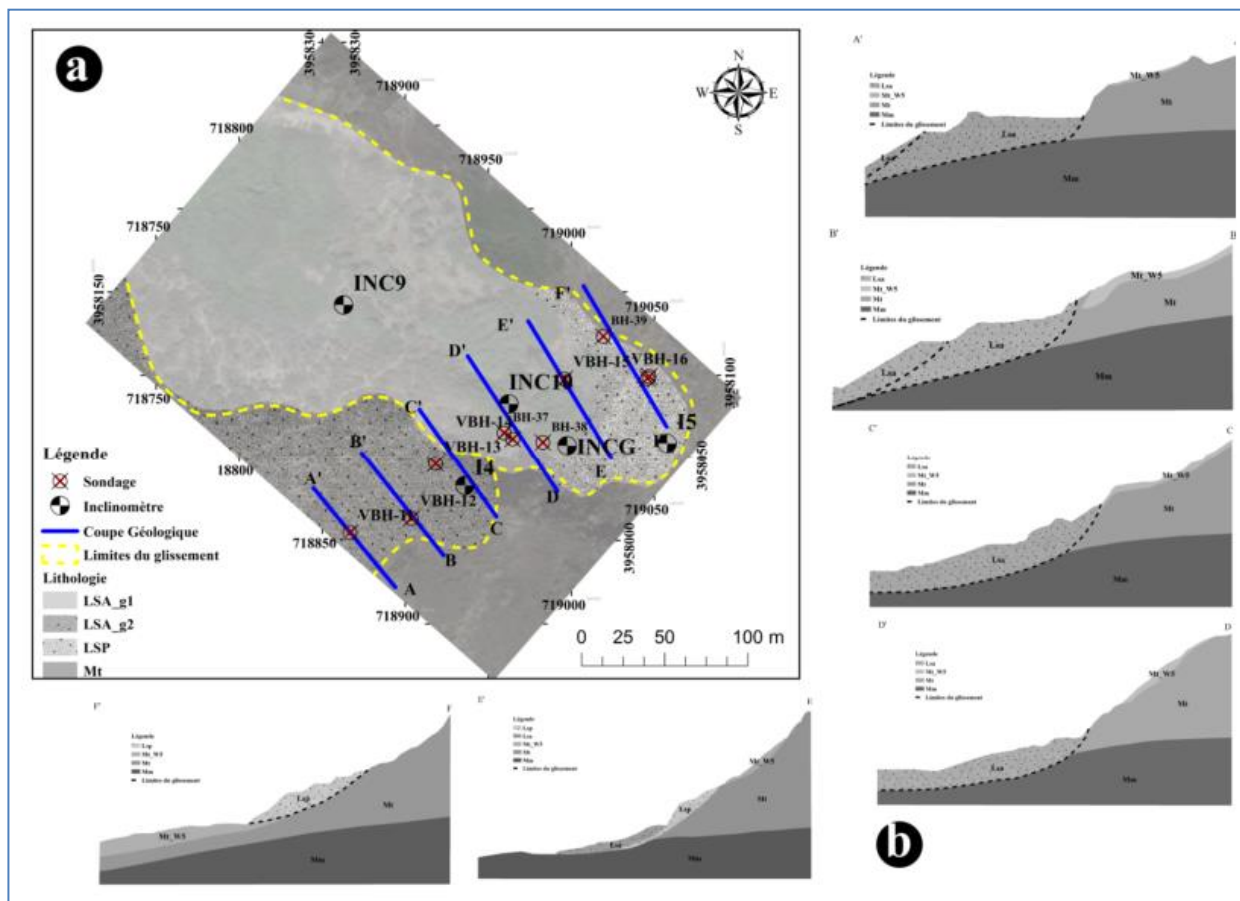


Figure 28 : Interprétation géologique (a) géologie de la zone G1 et G2 et tracé section des coupes géotechniques, (b) coupes interprétatives de la structure interne des glissements de terrain (frange maritime). In (Roukh 2020).

IV.1.2. Glissements de terrain G3, G4 et G5 :

A proximité des glissements de terrain G1 et G2 deux autres glissements de terrain sont récéncés dans cette zone côtière (Figure 29), sur ce site, une auscultation détaillée associe aux études précédentes, les constats in-situ ainsi que d'autres mesures inclinométriques sont réalisés au niveau de cette zone. Les trois glissements de terrain occupés une superficie relativement assez importante.

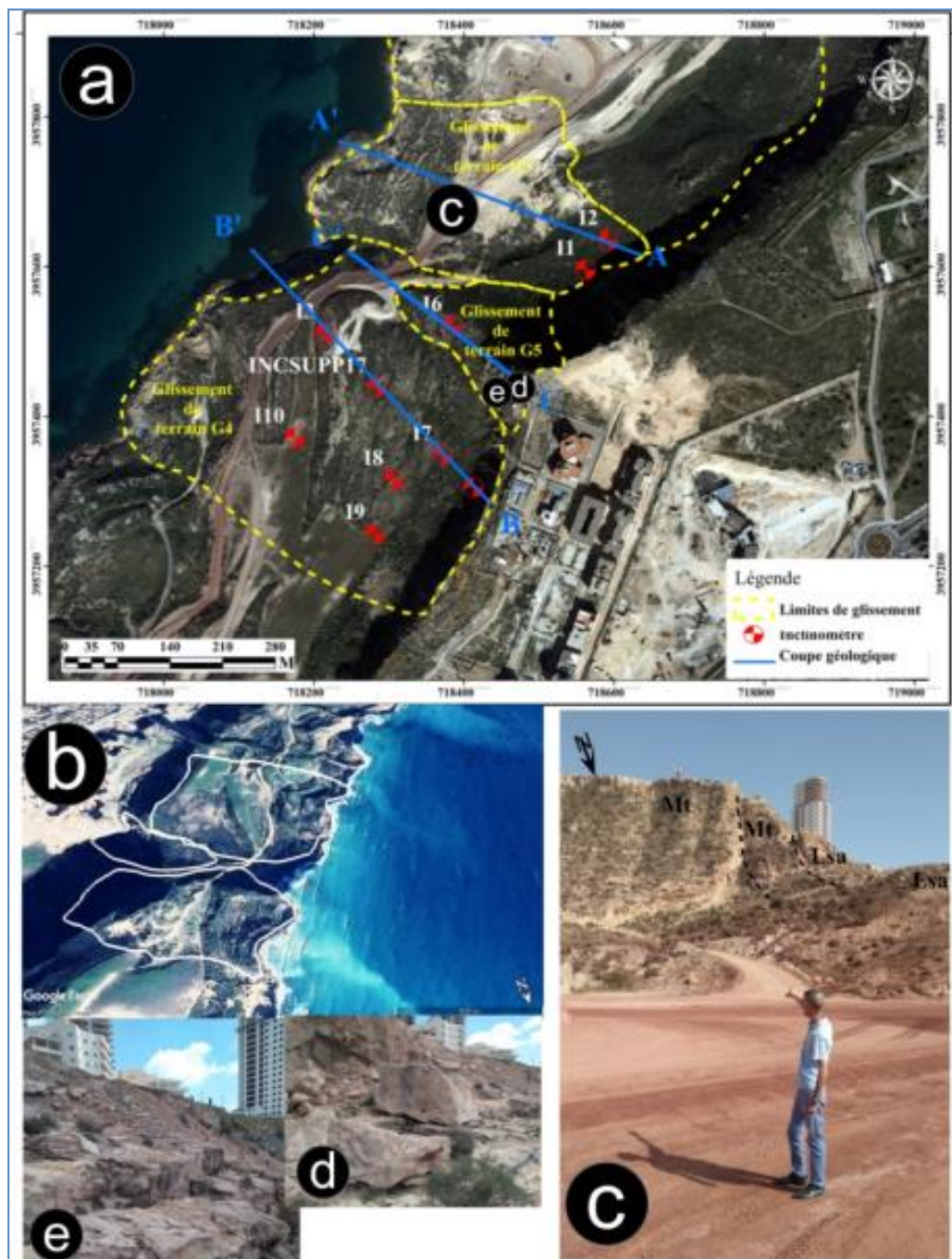


Figure 29 : Glissement de terrain G3, G4 et G5 ;(a)limites des glissement de terrain et position des inclinomètres réalisés, (b) image 3D Google Earth des glissements de terrain, (c) vu du glissement de terrain de terrain G5, (d) Eboulement au sommet du G5, (e) Basculement de terrain G5. In(Roukh 2020).

IV.1.2.1. Mesures inclinométriques :

Dans cette section de la zone d'étude plusieurs inclinomètres sont installés, ou les données de dix inclinomètres disponibles sont utilisées. Il s'agit de (I1, I2, I3, I6, I7, I8, I9, I10, INCSUPP17 et INCSUPP12), la figure 2.28 montre la distribution spatiale des inclinomètres installés.

Les lectures des valeurs enregistrées par l'inclinomètre I2 (Figure 30 et 31) montrent qu'au niveau de la zone de glissement G3 les déformations sont enregistrées a une profondeur de 13.5 et 31.5 mètre ; avec une vitesse de 0.36 mm/jour. Au niveau de la zone G5, les données de l'inclinomètre I6 montrent que la déformation est enregistrée à une profondeur de 25.5 avec une vitesse de 0.52 mm/jour pour une période de surveillance de 49 jours. L'interprétation des résultats enregistrés par les inclinomètres (I3, I9, I10, INCSUPP17 et INCSUPP12) installés au niveau de la zone G4, montre que la vitesse de mouvement de terrain varie entre 0.08 et 0.63 mm/jour avec une profondeur de 16.5 à 61 m .

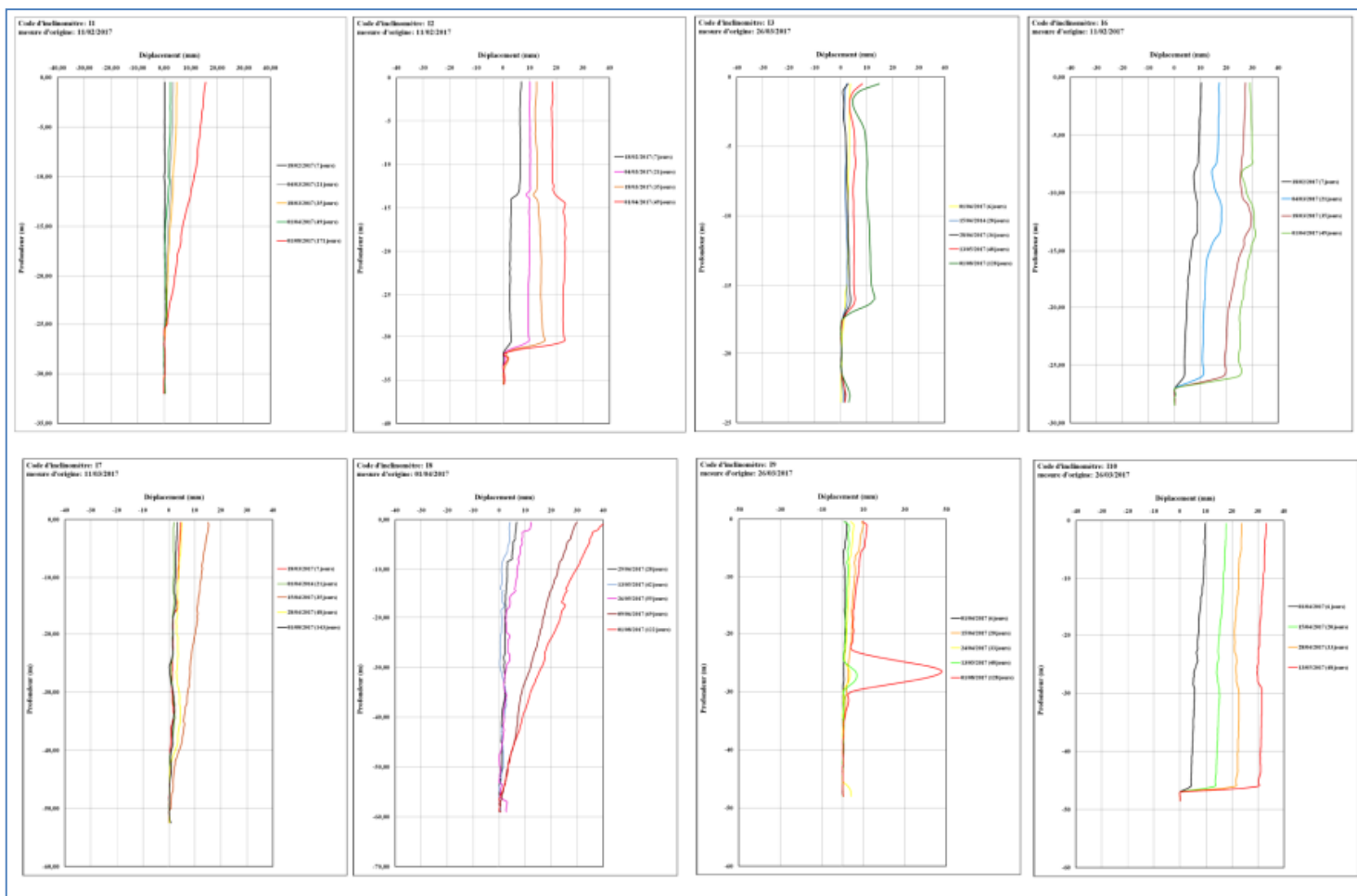


Figure 30: les données inclinométriques, I, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, INCSUPP12 et INCSUPP17. In (Roukh 2020).

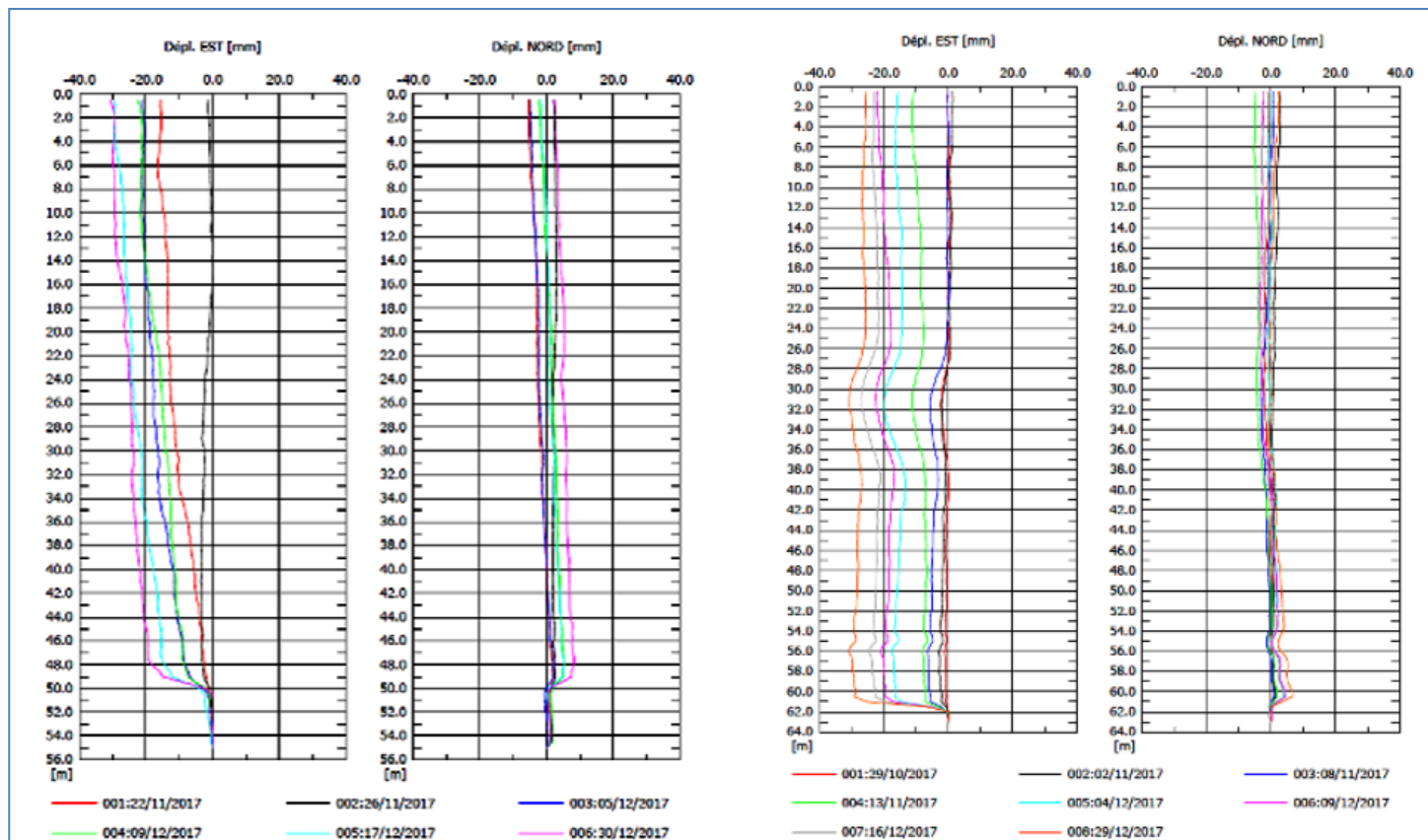


Figure 31 : données inclinométriques, I, I2, I3, I4, I5, I6, I7, I8, I9, I10, INCSUPP12 et INCSUPP17 (continue) in(Roukh 2020).

IV.1.2.2. Type des mouvements de terrain :

L'intégration des données multi sources ainsi que l'expertise insitu permettant de mieux comprendre le mécanisme des trois mouvements de terrain recensés dans cette zone. Les coupes interprétatives (Figure 32) et les lectures inclinométriques montrent que les mouvements de terrain *G3 et G4 considérés comme des glissements de terrain rotationnelles, profondes et actifs. Le glissement de terrain G5 présente un cas particulier*, dont l'application des autres méthodes supplémentaires est nécessaire pour mieux comprendre le mécanisme et la typologie de ce phénomène.

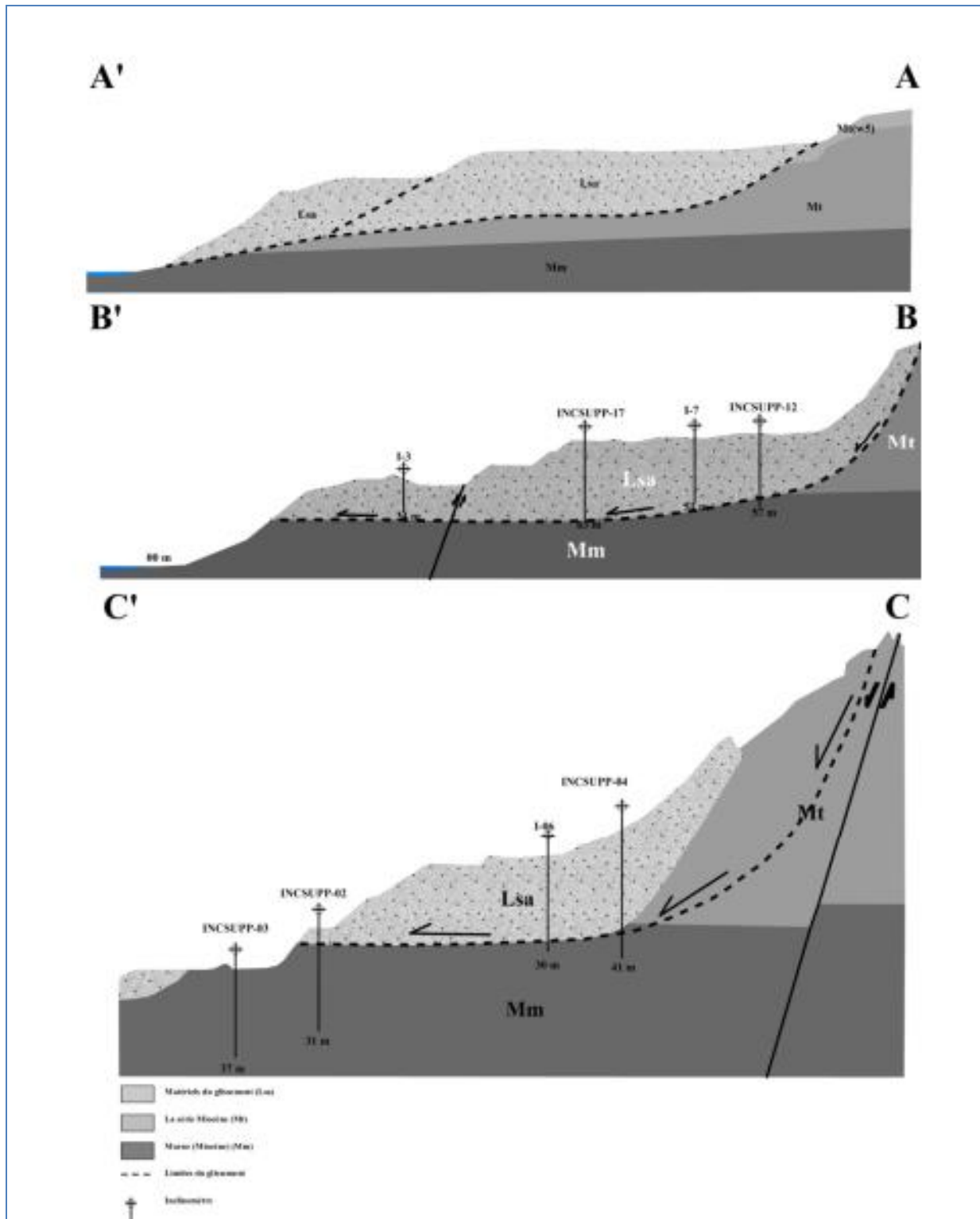


Figure 32 : Coupes géotechniques interprétatives de la structure interne des glissements de terrain G3, G4, G5 (in Roukh 2020).

IV.2. Evaluation de la susceptibilité au glissement de terrain :

IV.2.1. Inventaire des glissements de terrain :

Les inventaires de glissements de terrain constituent la base de l'évaluation de la susceptibilité, des dangers et des risques aux glissements de terrain (Soeters et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdury, 1999 ; Dai et Lee, 2008 ; Van Westen et al., 2008). Ils sont essentiels pour les modèles de susceptibilité qui prédisent les glissements de terrain sur la base des conditions passées.

Les glissements de terrain dans la zone d'étude ont été identifiés, premièrement, à l'aide d'une image satellitaire à haute résolution par logiciel Google earth. Ce travail a été fait pour connaitre approximativement l'emplacement des glissements.

Deuxièmement, des visites sur terrain ont été faite afin de confirmer et de localiser les formes de glissement de terrain déjà identifier par l'image satellitaire à l'aide de GPS (**Google Maps**).

Ensuite. Elles sont transférées dans un environnement SIG (Arc GIS) sous la forme de polygones, représentant la variable dépendante, pour servir comme couche principale dans l'évaluation de la susceptibilité (Figure 33).

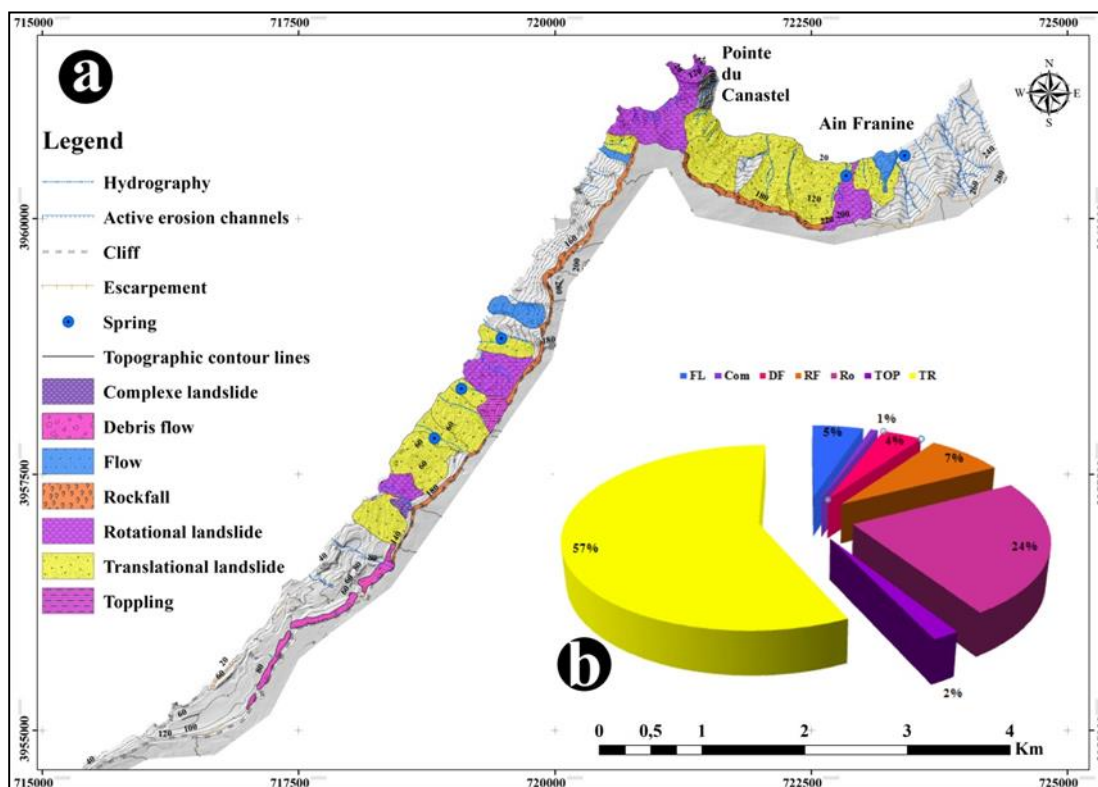


Figure 33 : carte d'inventaire des mouvement de terrain .

IV.2.2. Facteurs de prédisposition du glissement de terrain :

Selon les études antérieures, un large éventail de facteurs de contrôle influence le déclenchement et le développement du glissement de terrain un ensemble de Sept principaux facteurs de prédisposition dans l'occurrence spatiale des glissements de terrain ont été pris en compte dans cette étude : la pente, l'exposition des versants, l'élévation, la proximité aux routes, la proximité aux réseaux hydrographiques, la courbure de plan. La courbure de profil. Une description de chaque facteur déterminant présumé est donnée ci-dessous.

À savoir que les paramètres topographiques telles que la pente, l'aspect, et l'altitude sont générés à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT LiDAR), alors l'occupation du sol est obtenue à partir du carte d'occupation du sol d'Oran ; d'échelle 1/25000 (BNEDER : Bureau National des études pour le Développement Rural), les images satellite et les levés de terrain, la lithologie est établie par la digitalisation des formations lithologiques des trois carte géologique d'Oran à l'échelle 1/50000. La distance par rapport au cours d'eau est généré par le réseaux hydrographique (produit du carte topographique), la distance par rapport à la faille a été établir par la compilation de plusieurs sources. Il est à noter que quatorze paramètres sont exploités sous l'environnement SIG pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain de la zone d'étude.

IV.2.2.1. La pente :

Elle présente l'un des paramètres topographiques les plus importants dans l'estimation de l'instabilité des versants. Ce facteur permet d'accélérer les mouvements gravitaires, cependant les valeurs des gradients de pente sont notées en Degré est générés à partir du modèle numérique de terrain MNT spécifique à la zone d'étude qui est assignée en cinq classes:(0 –10, 10 – 20, 20–30, 30– 40 et >40°)(Figure 34).

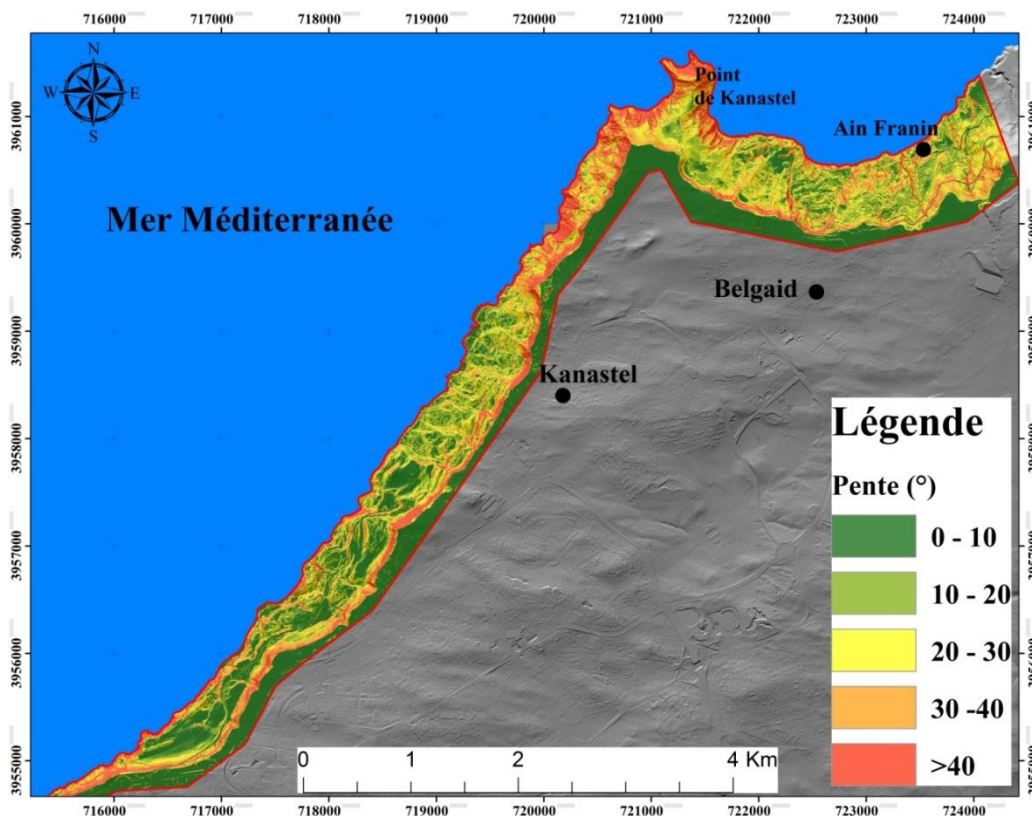


Figure 34 : carte des pentes de la zone d'étude .

L'intensité de l'exposition à la lumière, le type et l'étendue du couvert végétal et l'apport des eaux de surface varient considérablement selon l'aspect de la pente, la différence de température entre jour et nuit sur une pente ensoleillée est également plus importante que sur une pente ombragée et le cycle sec-humide est également plus rapide, ce qui réduit la résistance et la stabilité de la masse rocheuse et du sol sur la pente ensoleillée, à son tour augmenter la probabilité de glissement de terrain.

IV.2.2.2. L'aspect (la direction des versants)

La carte des aspects des pentes a également été préparée à partir d'un MNT sous neuf classes directionnelles (Rahmati et al.,2016): Plat ($- 1^\circ$), Nord ($337,5^\circ - 360^\circ$, $0^\circ - 22,5^\circ$), Nord-Est ($22,5^\circ - 67,5^\circ$), Est ($67,5^\circ - 112,5^\circ$), Sud-Est ($112,5^\circ - 157,5^\circ$), Sud ($157,5^\circ - 202,5^\circ$), Sud- Ouest ($202,5^\circ - 247,5^\circ$), Ouest ($247,5^\circ - 292,5^\circ$) et Nord-Ouest ($292,5^\circ - 337,5^\circ$)(Figure 35).

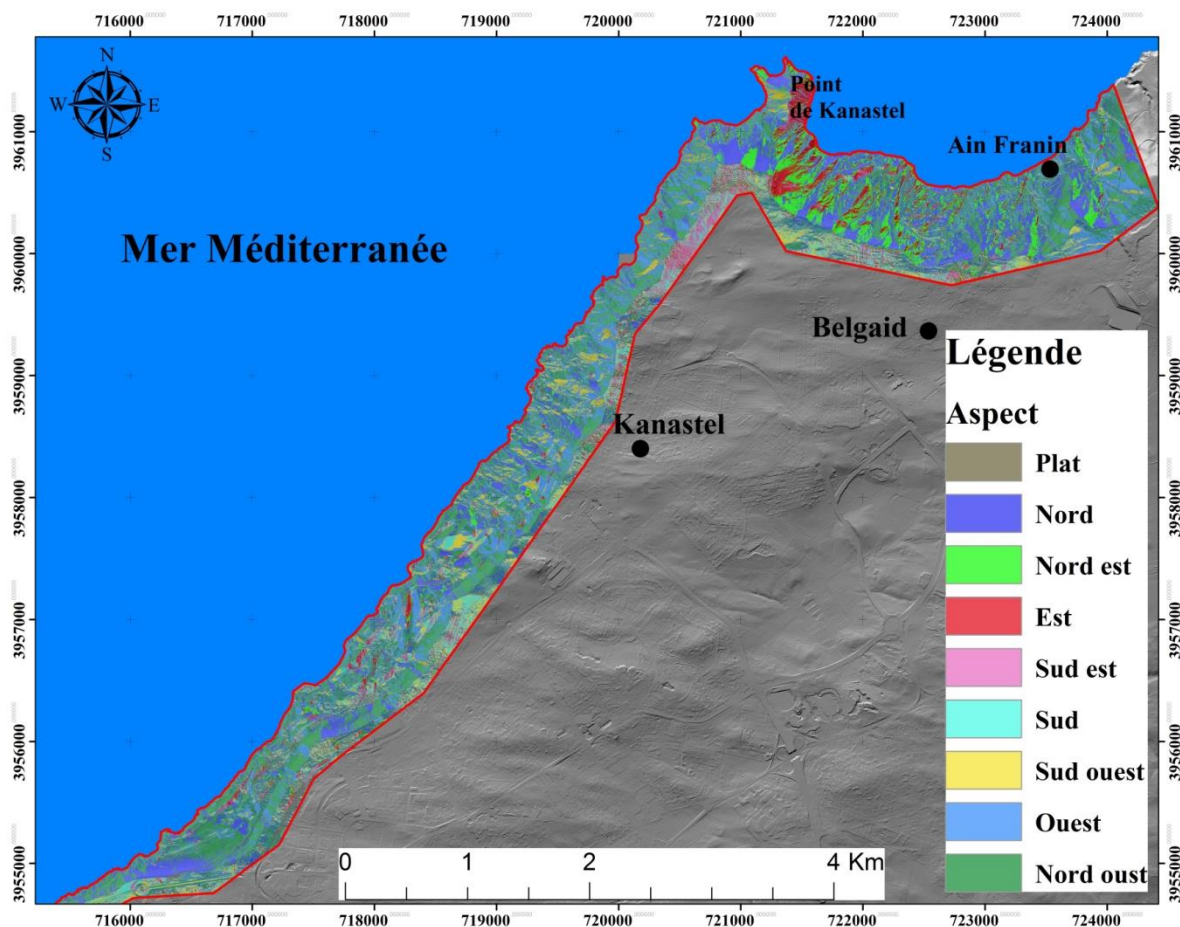


Figure 35 : carte d'aspect de la zone d'étude .

IV.2.2.3. La lithologie :

La lithologie présente un facteur intrinsèque essentiel dans la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain, à partir le tableau1, notant l'existence de 33 formations géologiques regroupées en trois niveaux de susceptibilité selon les variantes géomorphologiques et géologiques (Figure 36).

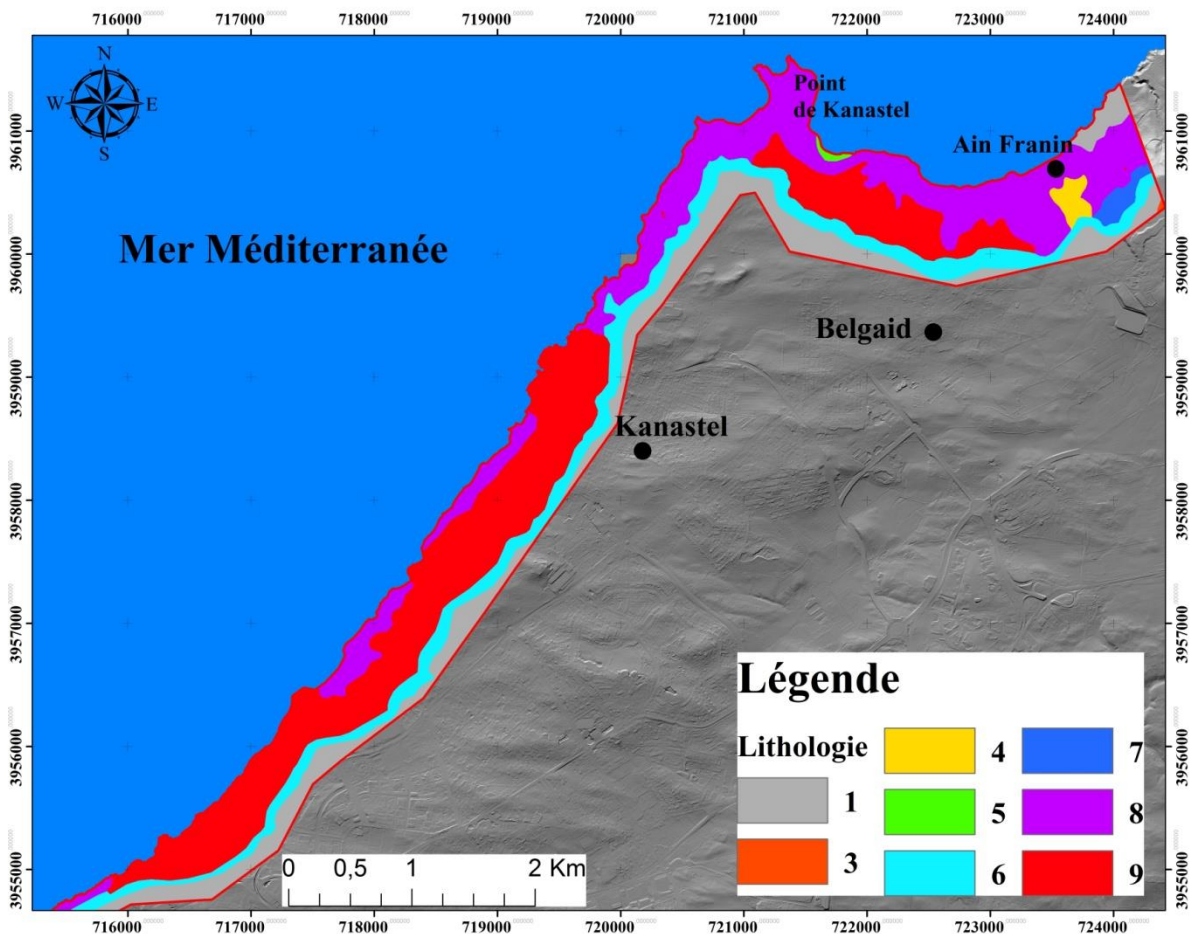


Figure 36 : carte lithologique de la zone d'étude

IV.2.2.4. la distance par rapport aux linéaments :

Les zones de proximité du tracé de faille présentent les endroits de faiblesse, où la fracturation est très dense permettant ainsi d'augmenter la probabilité d'occurrence aux glissements de terrain (Bourenane et al. 2016; Pradhan and Lee 2010), Dans notre cas la distance de proximité à la faille est classifiée en cinq classes d'intervalle de 100 m (0-100, 100- 200, 200-300, 300-400 et >400) (Figure 37).

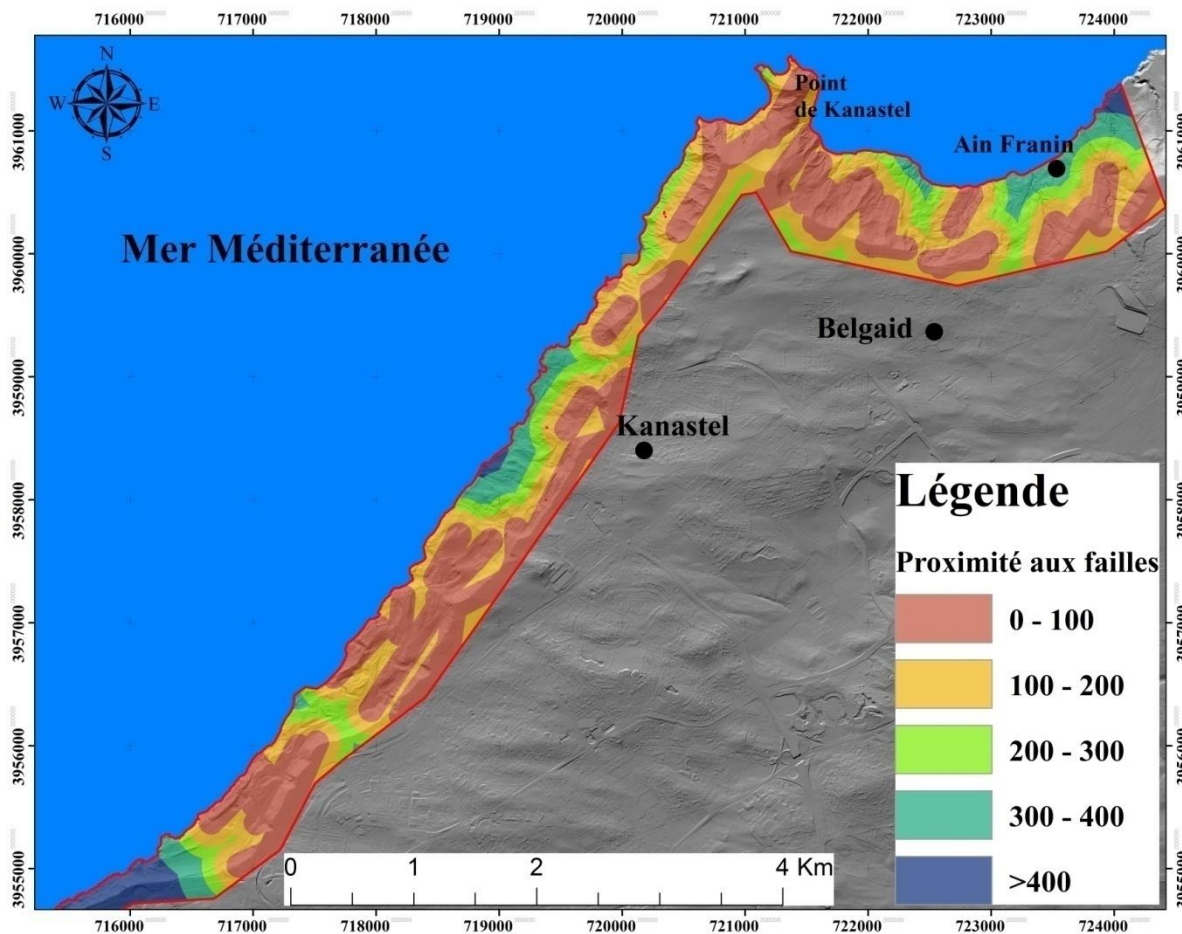


Figure 37 : carte de linéament de la zone d'étude.

IV.2.2.5. Proximités aux réseaux hydrographiques :

Comme l'eau peut augmenter le poids du sol et des matériaux rocheux, on la connaît comme un facteur qui déclenche un glissement de terrain. L'espace inters yeux du sol et des roches exposés sur la pente est d'environ 10 % à 35 % de leur taille. Lorsqu'il est sec, l'espace intérieur est occupé par l'air. Cependant, après des précipitations à long terme, l'espace extérieur est entièrement occupé par l'eau et augmente donc le poids des sédiments. En d'autres termes, la puissance qui pousse les sédiments à se déplacer vers le bas est donc augmentée.

Pour mesurer le paramètre de distance au cours d'eau, le réseau de cours d'eau a été extrait à partir d'une carte topographique à l'échelle 1/25000. Après l'extraction des flux, l'outil Distance euclidienne d'ArcGis, Cinq zones tampons différents sont créées dans la zone d'étude pour déterminer l'effet des cours d'eau sur ravines comprenant: 0-50 m, 50-100 m, 100-150 m, 150-200 et > 200m. (Figure 38).

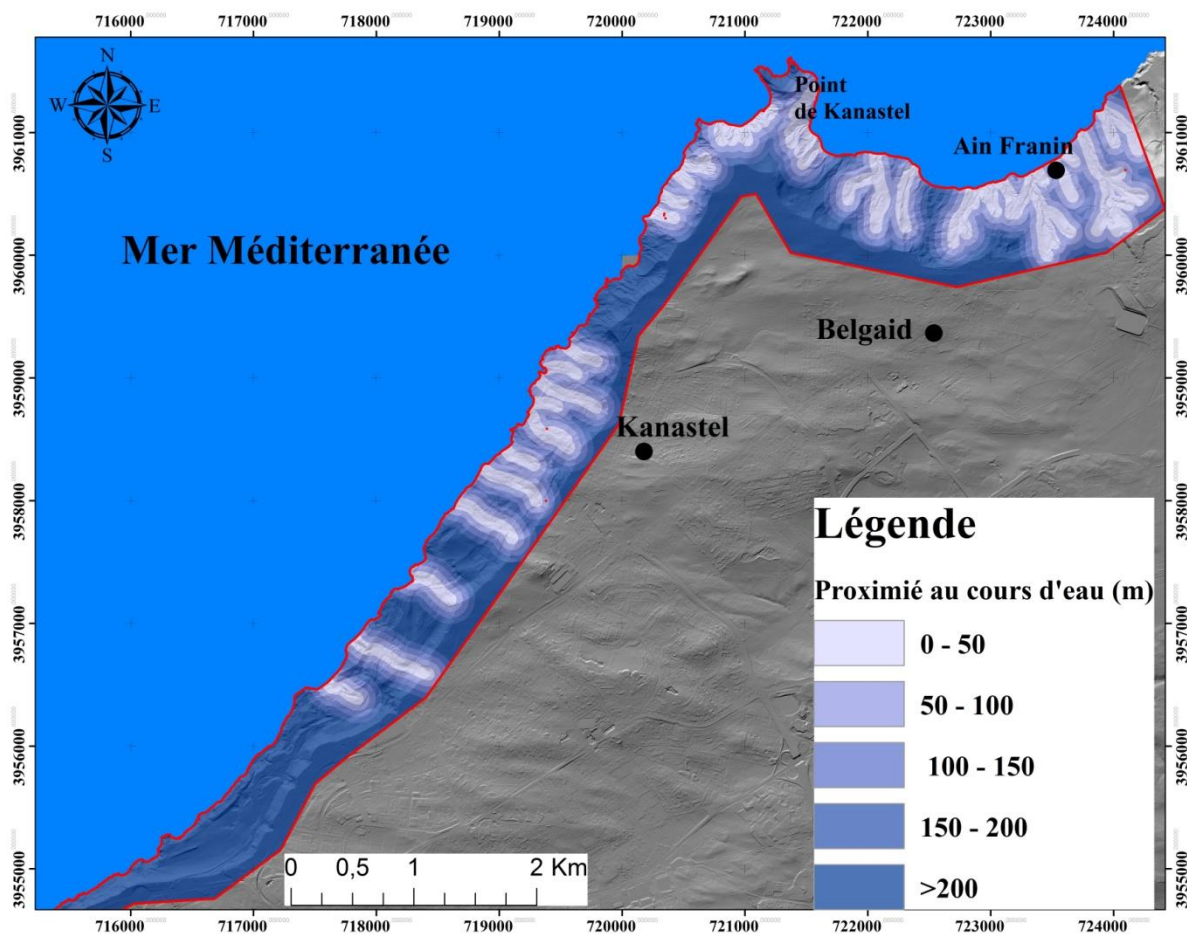


Figure 38 : carte de proximités aux réseaux hydrographiques de la zone d'étude.

IV.2.2.6. L'occupation du sol :

L'occupation du sol joue un rôle très important dans la stabilité des versants, à savoir que les zones forestières sont plus stables que les zones à sol nu ou les zones cultivées. Dans notre étude la carte d'occupation est classifiée en neuf zones distinctes (culture, culture arboricole, forêt, Maquis, oléiculture, polyculture, plan d'eau, sol nu et urbain; (Figure 29).

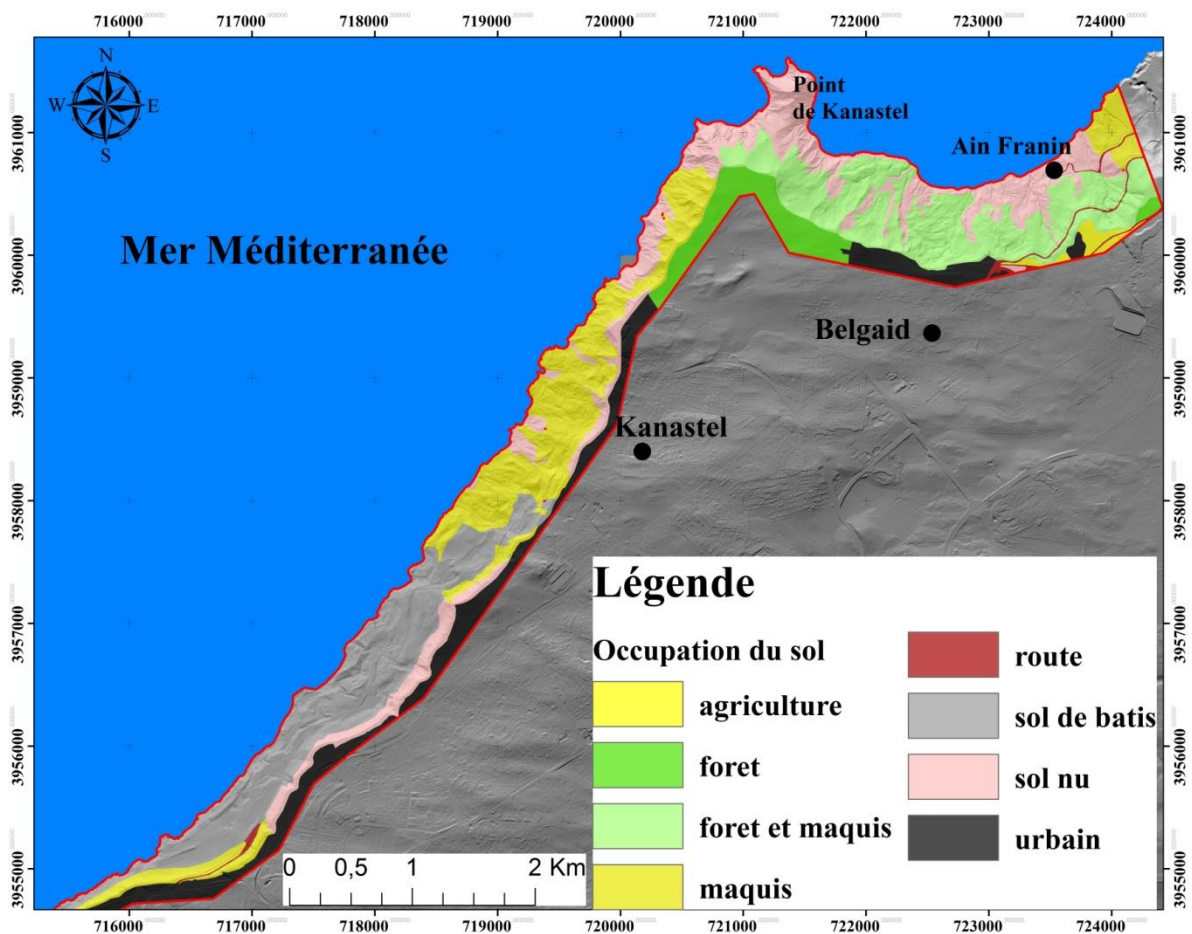


Figure 39 : carte d'occupation du sol de la zone d'étude.

IV.2.2.7. Altitude du relief :

Plusieurs recherches ont utilisées l'altitude comme paramètre de détermination les zones exposées aux phénomènes de glissements de terrain (Devkota et al. 2013;Ozdemir and Altural 2013) , pour exprimer le gradient altimétrique depuis la carte des altitudes ; un traitement hypsométrique a été initié pour générer une classification en tranches d'altitudes réparties en 5 classes : (0–50, 50–100, 100–150, 150–200 et >200) ;(Figure 40).

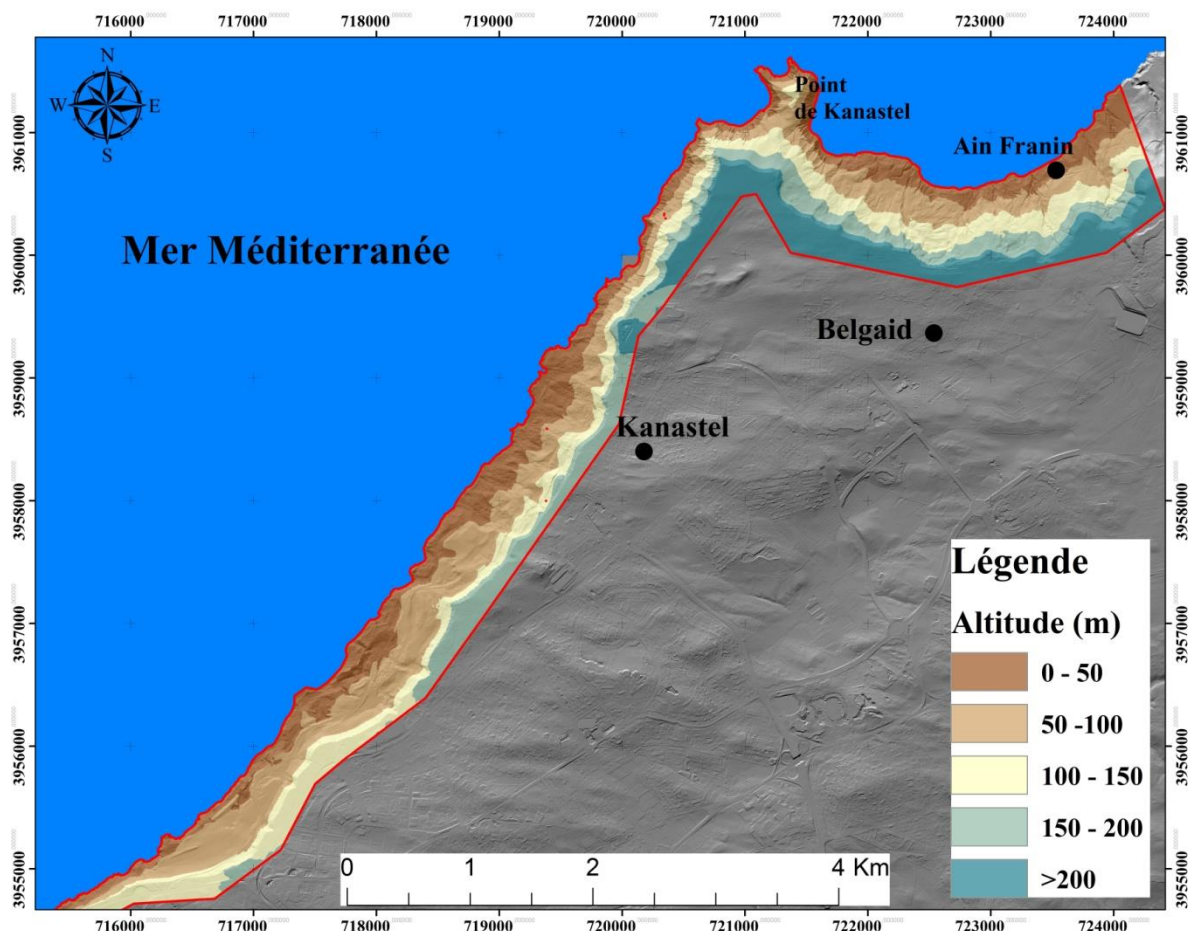


Figure 40 : carte d'altitude de la zone d'étude.

IV.2.3. calcule statistique :

Dans la présente étude deux approches méthodiques sont utilisées pour l'estimation du potentiel d'instabilité de pentes du secteur d'étude, où une méthodes statistiques bivariées et exercées, le ratio de fréquence (RF)), ainsi qu'une deuxième méthode statistique basée sur l'intelligence artificielle dite régression logistique (RL). Ces deux méthodes utilisées sont basées sur la combinaison des variables indépendantes (facteurs de prédisposition) et sur la variable dépendante (la localisation du glissement de terrain) à l'aide d'un système d'information géographique comme support géo spatial de base.

IV.2.3.1. La méthode statistique de ratio de fréquence :

Selon le tableau suivant , le calcul du RF de chaque classe montre que les faibles valeurs signifient que ces classes ayant une faible corrélation. Alors que, les valeurs maximales du FR présentent une forte corrélation.

Tableau 11 : les calculs statistiques.

Paramètres	Classes	% de la classe	% du glissement de terrain	Fr	LR	Pondération
Pente (°)	0-10	0,35753769	0,150830248	0,42185832	1,125	0,47459061
	10 - 20	0,18262429	0,247665795	1,35614927	1,125	1,525667929
	20-30	0,18433438	0,245953822	1,33428076	1,125	1,501065855
	30-40	0,15571609	0,19474743	1,2506571	1,125	1,406989238
	>40	0,11978755	0,160802706	1,34239911	1,125	1,510198999
Direction du versant	Plat	0,00013458	5,21E-05	0,38688558	-0,08	-0,030950846
	N	0,20808477	0,264802257	1,27256912	-0,08	-0,10180553
	NE	0,09991896	0,153761428	1,53886139	-0,08	-0,123108911
	E	0,0538872	0,066543176	1,23486056	-0,08	-0,098788845
	SE	0,04920398	0,021826412	0,44359039	-0,08	-0,035487231
	S	0,05841196	0,022466077	0,38461437	-0,08	-0,03076915
	SW	0,08017583	0,057026294	0,71126541	-0,08	-0,056901233
	W	0,17364163	0,155451087	0,89524088	-0,08	-0,07161927
	NW	0,2765411	0,258071204	0,93321103	-0,08	-0,074656882
Lithologie	Q3M	0,01491964	0,005752126	0,38554052	0,03	0,011566216
	G	0,00385846	0	0	0,03	0
	T	0,00046068	0	0	0,03	0
	MG	0,01024452	0	0	0,03	0
	E	0,00618205	0	0	0,03	0
	LSA	0,3751732	0,518480658	1,38197679	0,03	0,041459304
	QC	0,16702311	0,000200357	0,00119957	0,03	3,59871E-05
	MM	0,26303849	0,354627295	1,34819545	0,03	0,040445864
	MT	0,00520532	0	0	0,03	0
	QMD1	0,15389452	0,120939564	0,78586011	0,03	0,023575803
Distance par rapport aux lineaments (m)	0 -100	0,46701194	0,522794035	1,11944468	-0,35	-0,391805638
	100 - 200	0,27748798	0,26080957	0,93989503	-0,35	-0,328963261
	200 - 300	0,12708757	0,118831409	0,93503563	-0,35	-0,327262471
	300 - 400	0,08209667	0,08953333	1,09058415	-0,35	-0,381704453
	>400	0,04631583	0,008031656	0,17341059	-0,35	-0,060693707
Distance to stream	0 - 50	0,1934045	0,250285434	1,29410348	-0,16	-0,207056557

(m)	50 - 100	0,16709689	0,216953061	1,29836688	-0,16	-0,207738701
	100 - 150	0,12527655	0,174352405	1,39174011	-0,16	-0,222678418
	150 - 200	0,09862676	0,137724263	1,39641884	-0,16	-0,223427014
	>200	0,4155953	0,220684837	0,53100898	-0,16	-0,084961437
Occupation du sol	urbain	0,12349298	0,000915738	0,0074153	0,1	0,00074153
	Sol	0,20383836	0,303344596	1,48816249	0,1	0,148816249
	route	0,00938819	0,001063767	0,11330909	0,1	0,011330909
	agriculture	0,01008278	0	0	0,1	0
	Foret est maquis	0,18527214	0,292236512	1,57733655	0,1	0,157733655
	Sol de bâti	0,20381129	0,16626418	0,81577514	0,1	0,081577514
	foret maquis	0,05709423	0,00116906	0,02047597	0,1	0,002047597
	maquis	0,20702005	0,235006147	1,13518546	0,1	0,113518546
Altitude (m)	0 - 50	0,22159885	0,259280506	1,17004446	-0,53	-0,620123564
	50 - 100	0,2824764	0,354247555	1,2540784	-0,53	-0,664661552
	100 - 150	0,20493848	0,211174045	1,03042652	-0,53	-0,546126056
	150 - 200	0,14916143	0,139589408	0,93582778	-0,53	-0,495988723
	>200	0,14182484	0,035708486	0,25177878	-0,53	-0,133442753

Après l'intégration du RF de chaque classe au sein du logiciel ArcGIS et l'application de l'équation 7 donnera l'ISG qui fait apparaitre des valeurs qui varient entre 2.51 et 9.91. La classification de l'ISG a permis d'établir la carte de la susceptibilité aux glissements de terrain répartie en cinq degrés ; nul (10%), faible (10%), modérée (15%), forte (30%) et très forte (35%) (Figure 41).

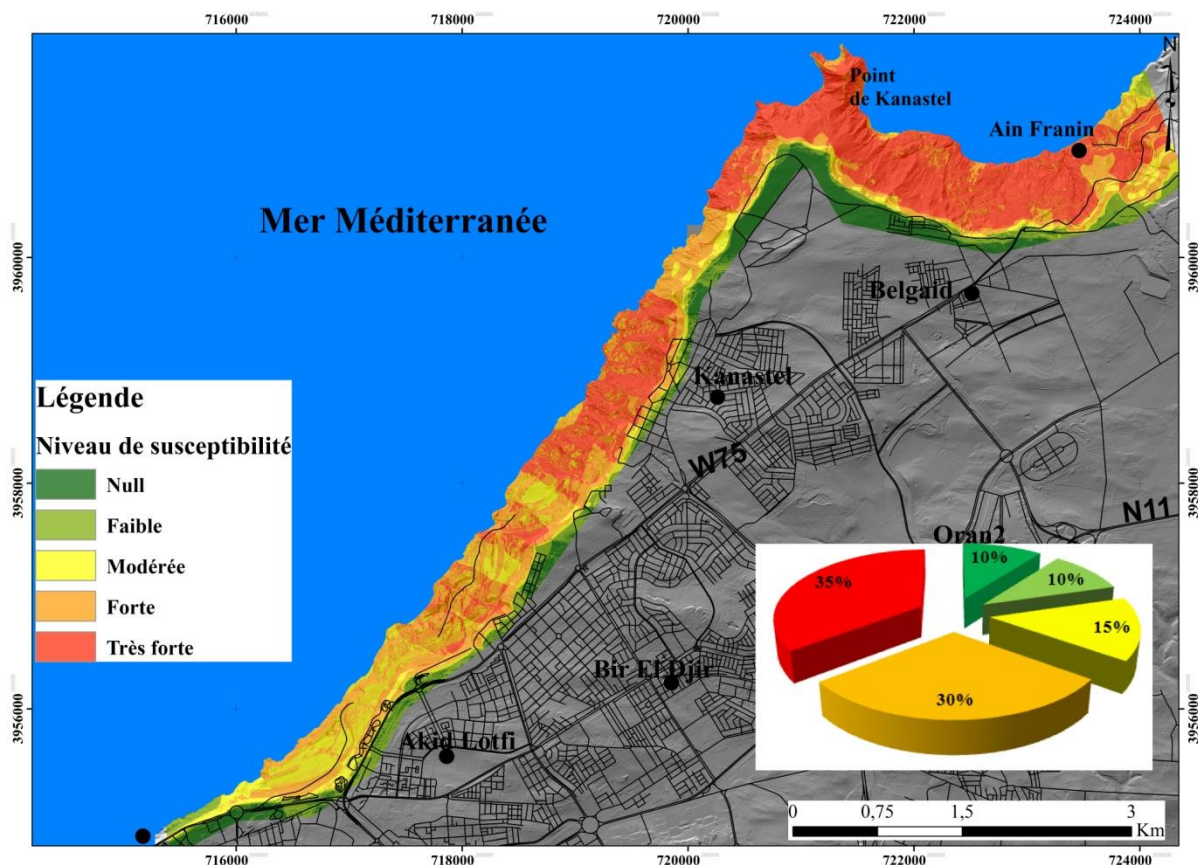


Figure 41 : carte de la susceptibilité aux glissements de terrain(méthode RF)

IV.2.3.2. La méthode statistique régression logistique :

La régression logistique présente l'une des méthodes statistiques la plus utilisée dans les domaines de géoscience (Yilmaz 2010). Le calcul de la probabilité d'occurrence du glissement de terrain est réalisé par l'application de l'équation suivante:

$$P(y) = \frac{1}{1+e^{-y}}$$

Où

P(y) est varie entre de 0 a 1, Y est exprimée par l'équation linéaire suivante :

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n$$

Où Y est la variable dépendante présentée par l'absence (0) ou la présence (1) d'un phénomène, b0 est l'interception, b1, b2, ..., bn sont les coefficients de régression partielle, x1, x2, ..., xn sont les variables indépendantes (facteurs de prédisposition).

Dans la pratique, un fichier raster est obtenu à partir de la combinaison des variables indépendantes continues (pente, lithologie, NDVI,...etc.) et la variable dépendante (absence ou présence d'un glissement de terrain). L'analyse statistique du fichier résultant après la conversion et le traitement sur le programme Xlstat nous a permis d'aboutir à la solution de l'équation polynomiales suivante:

$$P = 1 / (1 + \exp(-(0,11754-0,08102*Aspect+0,10486*occupation\ du\ sol-0,53144*altitude +0,35125*lineament+0,02916*lithologie-0,16766*distance\ hydrographie+1,12453*pente)))$$

Les coefficients de régression positive des variables indépendantes, signifient que ces facteurs sont positivement liés à l'occurrence des glissements de terrain. Par contre les valeurs négatives indiquent une relation négative des facteurs causatifs avec l'occurrence d'instabilité de terrain

L'utilisation de l'équation sous l'environnement de ArcGIS nous a permis d'établir la carte de susceptibilité aux glissements de terrain, l'application de l'algorithme de classement (Jenks) permettre de regrouper la carte obtenue en cinq classes: nul (22%), faible (14%), modérée (25%), forte (31%)et très forte (8%) (Figure 42).

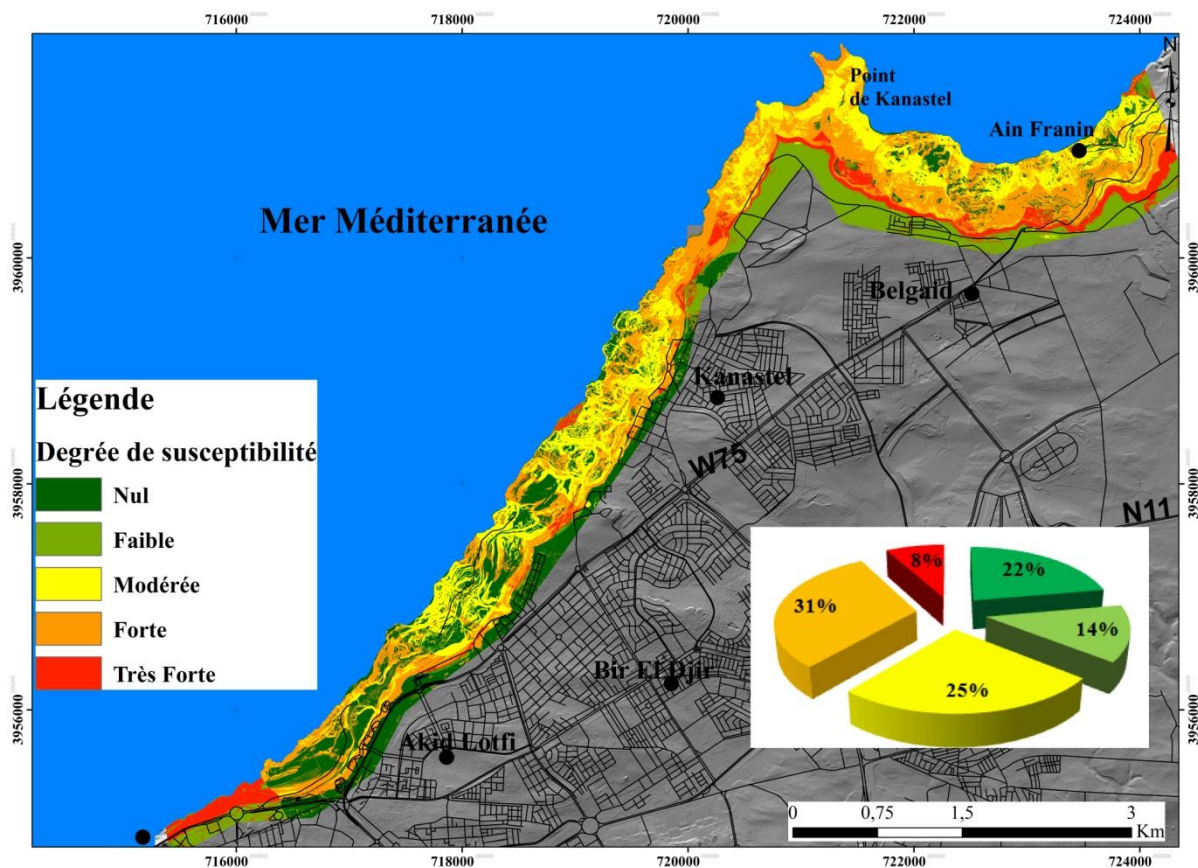


Figure 42 : carte de la susceptibilité aux glissements de terrain(méthode LR)

IV.3. validation et comparaison des résultats :

Au terme de cette étude, la courbe de ROC (dite la courbe de réussite) est utilisée comme un moyen de validation des résultats des trois méthodes. Cette méthode statistique est basée sur la comparaison entre la carte d'inventaire des glissements de terrain et les cartes de susceptibilité obtenues. La réalisation de la courbe de ROC consiste d'abord à classer l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain en 100 classes avec un intervalle de 1%, ensuite, on combine ces cartes avec celle d'inventaire qui contient 30% d'information des glissements de terrain (data test); En fin, la réalisation des trois courbes de ROC à la faveur d'analyse statistique sur le support d'Excel (Xlstat) du fichier convertie en format compatible

Pour calculer la performance des trois modèles, on se base généralement sur l'observation de l'aire située sous la courbe des trois diagrammes obtenus. La figure 43 montre clairement la précision de la méthode RF présumant un taux de 92 % pour la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par rapport à la méthode RL dont le taux représentatif est d'ordre de 94%.

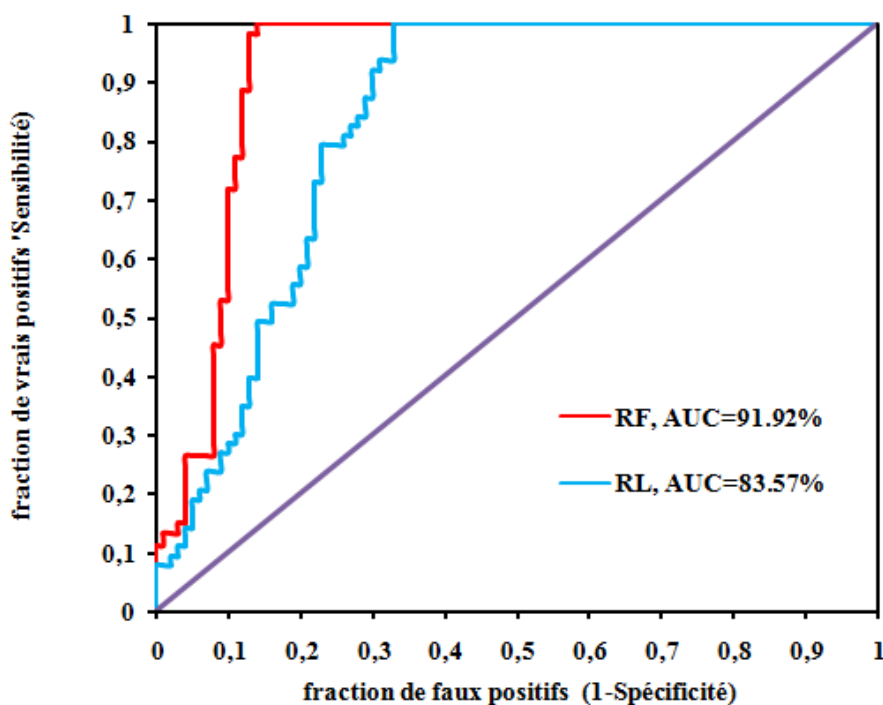


Figure 43 : Courbe de ROC

CONCLUSIN GENERALE :

En conclusion de ce mémoire consacré à la cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires, avec un focus sur la frange maritime d'Oran-Est dans le Nord-Ouest de l'Algérie, plusieurs points essentiels méritent d'être mis en lumière.

Tout d'abord, il est indéniable que les mouvements gravitaires représentent une menace sérieuse pour les régions montagneuses et les zones à relief accidenté, en particulier dans des environnements sensibles comme celui d'Oran-Est. La gestion de cette susceptibilité revêt une importance cruciale pour la sécurité des populations locales et la promotion du développement durable.

Au cours de cette étude, nous avons observé une nette évolution des méthodes de cartographie de la susceptibilité aux mouvements gravitaires. Les anciennes méthodes, basées principalement sur des observations géomorphologiques et des données historiques, présentaient des limitations en termes de précision et de capacité de prévision. Cependant, l'avènement des nouvelles approches, exploitant les avancées technologiques telles que la géomatique, la télédétection et la modélisation numérique, a apporté des améliorations significatives.

La comparaison critique entre les anciennes méthodes et les nouvelles approches a révélé les nombreux avantages de ces dernières. Elles offrent une résolution spatiale plus fine, une capacité de prédiction accrue et une meilleure intégration des facteurs de risque. Cependant, il est crucial de noter que la mise en œuvre de ces nouvelles méthodes peut nécessiter des ressources technologiques et humaines spécifiques, ce qui peut représenter un défi pour certaines régions en développement.

L'analyse approfondie des facteurs de susceptibilité propres à la région d'Oran-Est a illustré la manière dont ces nouvelles approches peuvent être adaptées et mises en œuvre de manière pratique. Cela a conduit à des recommandations visant à renforcer la gestion des risques, notamment la création de systèmes de surveillance et d'alerte précoce, ainsi que la sensibilisation des populations locales aux dangers potentiels.

En fin de compte, cette étude de cas sur Oran-Est en Algérie peut servir de modèle pour d'autres régions confrontées aux mouvements gravitaires. Les enseignements tirés de cette recherche contribuent à une gestion plus efficace des risques, à une planification territoriale améliorée et à une prise de décision éclairée. L'objectif ultime est de préserver des vies humaines et de favoriser un développement durable dans des régions exposées à ces phénomènes géologiques redoutables. La transition des anciennes méthodes aux nouvelles approches représente un pas significatif vers cet objectif, et cette évolution devrait continuer à guider les efforts de prévention et de gestion des risques à l'avenir.

Référence bibliographiques

Abija FA, Nwosu JI, Ifedotun AI, Osadebe CC (2020) Landslide susceptibility assessment of Calabar, Nigeria using geotechnical, remote sensing and multi-criteria decision analysis: implications for urban planning and development. *SDRP J Earth Sci Environ Stud* 4(6):774–88

Ahmed MF, Rogers JD, Ismail EH (2014) A regional level preliminary landslide susceptibility study of the upper Indus river basin. *Eur J Remote Sensing* 47(1):343–73

Akgun A, Sezer EA, Nefeslioglu HA, Gokceoglu C, Pradhan B (2012) An easy-to-use MATLAB program (MamLand) for the assessment of landslide susceptibility using a Mamdani fuzzy algorithm. *Comput Geosci* 38(1):23–34

Aleotti P, Chowdhury R (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bull Eng Geol Environ* 58(1):21–44

Aleotti P, Chowdhury R (1999) Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58:21-44

ANA (2019) Liaison autoroutiere reliant le port d'oran a l'autoroute est-ouest sur 26 km 1ère tranche sur 8 km. Ministère des Travaux Publics et des Transports, Agence Nationale des Autoroutes, Rapport énidite, 190p

Anbalagan R (1992) Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain. *Eng Geol* 32(4):269–77

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

Ayele S, Raghuvanshi TK, Kala PM (2014) Application of remote sensing and GIS for landslide disaster management—a case from Abay gorge, Gohatsion–Dejen section, Ethiopia. In: Singh M, Singh RB, Hassan MI (eds) *Landscape ecology and water management, proceedings of international geographical union (IGU) Rohtak conference*. *Advances in Geographical and Environmental Science* Springer, Japan, pp 15–32 Chapter

Bachri S, Shresta RP (2010) Landslide hazard assessment using analytic hierarchy processing (AHP) and geographic information system in Kaligesing mountain area of Central Java Province Indonesia. In: *Proceeding 5th Annual International Workshop & Expo on Sumatra Tsunami Disaster & Recovery*, pp 107–12

Baum RL, Savage WZ, Godt JW (2002) TRIGRS; a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. Open-file report 02-424

Bell FG (2003) *Geological hazards: their assessment, avoidance and mitigation*. CRC Press,

Benabdellah, M. 2010. Mis en évidence des phénomènes contrôlant le littoral oranais (de la Calère a la pointe de Canastel) : étape fondamentale pour une cartographie des risques géologiques. Mémoire de magister, Université d'Oran, 258p

- Bourenane H, Guettouche MS, Bouhadad Y, 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 *Arabian Journal of Geosciences* 9:154
- Casagli N, Catani F, Puglisi C, Delmonaco G, Ermini L, Margottini C (2004) An inventory-based approach to landslide susceptibility assessment and its application to the Virginio River Basin, Italy. *Environ Eng Geosci* 3:203–16
- Chacón J, Irigaray C, Fernandez T, El Hamdouni R (2006) Engineering geology maps: landslides and geographical information systems. *Bull Eng Geol Environ* 65(4):341–411
- Chau K, Sze Y, Fung M, Wong W, Fong E, Chan L (2004) Landslide hazard analysis for Hon Kong using landslide inventory and GIS *Computers & Geosciences* 30:429–443
- Chimidi G, Raghuvanshi TK, Suryabhagavan KV (2017) Landslide hazard evaluation and zonation in and around Gimbi town, western Ethiopia – a GIS-based statistical approach. *Appl Geomat (Springer)* 9(4):219–236
- Chung CF, Fabbri AG (1995) Multivariate regression analysis for landslide hazard zonation. In: Carrara A, Guzzetti FŽ (eds) *Geographical Information Systems in assessing Natural Hazards*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, pp 107–142 Chapter
- Corominas J, van Westen CJ, Frattini P, Cascini L, Malet JP, Fotopoulou S, Catani F, van den Eeckhaut M, Mavrouli OC, Agliardi F, Pitilakis K, Winter MG, Pastor M, Ferlisi S, Tofani V, Hervás J, Smith JT (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk: *bull Eng. Geol Environ* 73(2):209–63
- Cruden DM, Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AT, Schuster RL (eds) *Landslides—investigation and mitigation*. Transportation Research Board special report no, vol 247. National Academy Press, Washington, DC, pp 36–75
- Dai FC, Lee CF, Li J, Xu ZW (2001) Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environ Geol* 40:381–91
- Devkota KC et al. (2013) Landslide susceptibility mapping using certainty factor, index of entropy and logistic regression models in GIS and their comparison at Mugling–Narayanghat road section in Nepal Himalaya *Natural Hazards* 65:135–165
- Dietrich EW, Reiss R, Hsu M-L, Montgomery DR (1995) A process-based model for aluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. *HydrologicalProcess* 9:383–400
- Erener A, Duzgun H (2012) Landslide susceptibility assessment: what are the effects of mapping unit and mapping method? *Environ Earth Sci* 66(3):859–77
- Erener A, Mutlu A, Sebnem Düzgün H (2016) A comparative study for landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis (MCDA), logistic regression (LR) and association rule mining (ARM). *Eng Geol* 203:45–55

- Feizizadeh B, Blaschke T (2012). Comparing GIS-Multicriteria Decision Analysis for landslide susceptibility mapping for the lake basin, Iran. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. <https://doi.org/10.1109/igarss.2012.6352388>
- Feizizadeh B, Jankowski P, Blaschke T (2014) A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Comput Geosci* 64:81–95
- Fell R, Corominas J, Bonnard C, Cascini L, Leroi E, Savage WZ (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning, on behalf of the JTC-1 joint technical committee on Landslides and engineered slopes. *Eng Geol* 102:85–98
- GEO-SLOPE (2011) SLOPE/W. GEO-SLOPE International, Calgary
<http://www.geoslope.com>
- Girma F, Raghuvanshi TK, Ayenew T, Hailemariam T (2015) Landslide hazard zonation in Ada Berga district, Central Ethiopia – a GIS based statistical approach. *J Geom* 9(i):25–38
- Gitirana G Jr, Santos MA, Fredlund MD (2008) Three-dimensional slope stability model using finite element stress analysis. *GeoCongress 2008*. Available at [https://doi.org/10.1061/40971\(310\)24](https://doi.org/10.1061/40971(310)24)
- Goodman RE (1989) *Introduction to rock mechanics*, University of California at Berkeley, pp. 562
- Gorsevski PV, Gessler PE, Jankowski P (2003) Integrating a fuzzy k-means classification and a Bayesian approach for spatial prediction of landslide hazard. *J Geographical Syst* 5:223–51
- Gorsevski PV, Jankowski P (2010) An optimized solution of multi-criteria evaluation analysis of landslide susceptibility using fuzzy sets and Kalman filter. *Comput Geosci* 36(8):1005–20
- Gourinard Y (1952) *Carte géologique détaillée de l'Algérie. Feuille Oran (159) 2ème édition*, Serv. Carte Géol, Alger, Algérie.
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31:181–216
- Guzzetti F, Carrara A, Cardinali M, Reichenbach P (1999) Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy *Geomorphology* 31:181-216
- Guzzetti F, Mondini AC, Cardinali M, Fiorucci F, Santangelo M, Chang K-T (2012) Landslide inventory maps: New tools for an old problem *Earth-Science Reviews* 112:42-66

- Guzzetti F, Stark CP, Salvati P (2005a) Evaluation of flood and landslide risk to the population of Italy. *Environ Manag* 36(1):15–36
- Hamza T, Raghuvanshi TK (2017) GIS based Landslide Hazard Evaluation and Zonation - A case from Jeldu District, Central Ethiopia. *J King Saud Univ Sci* 29(2):151–65
- Hoek E, Bray JW (1981) *Rock slope engineering (Revised Third Edition)*. Institute of Mining and Metallurgy, London, p 358
- Humbert M (1977) La Cartographie ZERMOS. Modalités d'établissement des Cartes des zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol, *Bulletin du BRGM, Section III, n°1/2* : p 5-8.
- Hungr O, Rawlings G (1995) Assessment of terrain hazards for planning purposes: Cheekye Fan, British Columbia. *Proceedings of 48. Canadian Geotechnical Conference, Vancouver*, pp 25–27 September 1995, 1: 509–17
- Intarawichian N, Dasananda S (2010) Analytical hierarchy process for landslide susceptibility mapping in lower Mae Chem watershed, northern Thailand. *Suranaree J Sci Technol* 17(3):277–92
- Kanungo DP, Arora MK, Sarkar S, Gupta RP (2006) A comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Eng Geol* 85:347–66
- Kanungo DP, Arora MK, Sarkar S, Gupta RP (2009) Landslide susceptibility zonation (LSZ) mapping: a review. *J South Asia Disaster Stud* 2:81–105
- Karaman K, Ercikdi B, Kesimal A (2013) The assessment of slope stability and rock excavatability in a limestone quarry. *Earth Sci Res SJ* 17(2):169–81
- Kavzoglu T, Colkesen I, Sahin EK (2018) Machine learning techniques in landslide susceptibility mapping: a survey and a case study. *Adv Nat Technol Hazards Res* 283–301. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77377-3_13
- Kavzoglu T, Sahin EK, Colkesen I (2013) Landslide susceptibility mapping using GIS-based multi-criteria decision analysis, support vector machines, and logistic regression. *Landslides* 11(3):425–39
- Kulatilake PHSW, Wang L, Tang H, Liang Y (2011) Evaluation of rock slope stability for Yujian River dam site by kinematic and block theory analyses. *Comput Geotech* 38:846–60
- Lahmidi M (2021) Utilisation des SIG pour la modélisation de la susceptibilité des terrains aux glissements de terrain dans la région de Bouira, Mémoire de Master, Université Mohamed Elbachir El Ibrahimi, Algérie, 114p
- Lari S, Frattini P, Crosta GB (2014) A probabilistic approach for landslide hazard analysis. *Eng Geology* 182:3–14

- Lee CT (2015) Review and perspectives on methodology for landslide hazard
- Lee S (2005) Application of logistic regression model and its validation for landslide susceptibility mapping using GIS and remote sensing data. *Int J Remote Sens* 26(7):1477–91
- Lee S (2007) Application and verification of fuzzy algebraic operators to landslide susceptibility mapping. *Environ Geol* 50:847–55
- Lee S, Min K (2001) Statistical analysis of landslide susceptibility at Yongin. *Korean Environ Geol* 40:1095–113. <https://doi.org/10.1007/s002540100310>
- Lee S, Ryu JH, Won JS, Park HJ (2004) Determination and application of the weights for landslide susceptibility mapping using an artificial neural network. *Eng Geol* 71(3–4):289–302
- Lee S, Talib JA (2005) Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis *Environmental geology* 47:982-990
- Leroi E (1996) Landslide hazard-risk maps at different scales: objectives, tools and developments *Landslides* 1:35-51
- Liu Y-C, Chen C-S (2007) A new approach for application of rock mass classification on rock slope stability assessment. *Eng Geol* 89(1–2):129–43
- Meten M, Bhandary NP, Yatabe R (2015) Application of GIS-based fuzzy logic and rock engineering system (RES) approaches for landslide susceptibility mapping in Selelkula area of the lower Jema River gorge, Central Ethiopia. *Environ Earth Sci* 74(4):3395–3416
- Moung-Jin L, Won-Kyong S, Joong-Sun W, Inhye P, Saro L (2014) Spatial and temporal change in landslide hazard by future climate change scenarios using probabilisticbased frequency ratio model. *Geocarto Int* 29(6):639–62
- Nandi A, Shakoor A (2009) A GIS based landslide susceptibility evaluation using bivariate and multivariate statistical analyses. *Eng Geol* 110:11–20
- Ozdemir A, Altural T (2013) A comparative study of frequency ratio, weights of evidence and logistic regression methods for landslide susceptibility mapping: Sultan Mountains, SW Turkey *Journal of Asian Earth Sciences* 64:180-197
- Pack RT, Tarboton DG, Goodwin CN (1998) The Sinmap approach to terrain stability mapping. In: *Proceedings 8th Congress of the International Association of Engineering Geology, Vancouver, A A Balkema*. *Eng Geol Nat Hazards* 2:1157–66
- Pardeshi SD, Autade SE, Pardeshi SS (2013) Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *Springer Plus* 2:1–11
- Pradhan B, Lee S (2009) Landslide risk analysis using artificial neural network model focussing on different training sites. *Int J PhysSci* 4:001–015

- Pradhan B, Lee S (2010) Delineation of landslide hazard areas on Penang Island, Malaysia, by using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network models *Environmental Earth Sciences* 60:1037-1054
- Raghuvanshi TK (2019) Governing factors influence on rock slope stability – Statistical analysis for plane mode of failure. *J King Saud Univ - Sci* 31(4):1254–63. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.01.002>
- Raghuvanshi TK, Ibrahim J, Ayalew D (2014a) Slope stability susceptibility evaluation parameter (SSEP) rating scheme—an approach for landslide hazard zonation. *J Afr Earth Sci* 99:595–612
- Regmi NR, Giardino JR, Vitek JD (2010) Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA *Geomorphology* 115:172-187
- Reichenbach P, Rossi M, Malamud BD, Mihir M, Guzzetti F (2018) A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Ear Sci Revs* 180:60–91
- Romana M (1985) New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slope, *International Symposium on Role Rock Mechanics Zacatecas*, pp 49–53
- Ross TJ (2010) *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. Available at: <https://doi.org/10.1002/9781119994374> Book
- Roukh ZEA (2020) *Cartographie algébrique d'aléa multirisque du Littoral Oranais, NO de l'Algérie* Risques: (Sismique, glissement de terrain, inondation). Thèse de Doctorat, Université Oran 2 Mohamed Ben Ahmed Oran 2, 289p
- Saaty TL, Vargas LG (2006) *Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, Opportunities, Costs and Risks*. Springer, New York
- Saha AK, Gupta RP, Sarkar I, Arora MK, Csaplovics E (2005) An approach for GIS-based statistical landslide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas *Landslides* 2:61-69
- Schlögel R (2015) *Quantitative landslide hazard assessment with remote sensing observations and statistical modelling*. Strasbourg
- Selby MJ (1980) A rock mass strength classification for geomorphic purposes: with tests from Antarctica and New Zealand. *Z Geomorphol* 24:31–51
- Sharma S, Raghuvanshi T, Anbalagan R (1995) Plane failure analysis of rock slopes. *Geot Geol Eng* 13:105–11
- Simoni S, Zanotti F, Bertoldi G, Rigon R (2008) Modelling the probability of occurrence of shallow landslides and channelized debris flows using GEOtop-FS. *Hydrol Process* 22(4):532–45

Soeters et Van Westen, 1996 ; Aleotti et Chowdury, 1999 ; Ardizzone et al., 2002 ; Dai et Lee, 2008 ; Van Westen et al., 2008

Soeters R, van Westen CJ (1996) Landslides: Investigation and mitigation. Chapter 8-Slope instability recognition, analysis, and zonation Transportation research board special report

Stead D, Eberhardt E, Coggan JS (2006) Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques. Eng Geol 83(1–3):217–35

Stevenson P (1977) An empirical method for the evaluation of relative landslip risk Bulletin of Engineering Geology and the Environment 16:69-72

Straub D, Schubert M (2008) Modeling and managing uncertainties in rock-fall hazards. Georisk 2(1):1–15

Süzen ML, Doyuran V (2004) Data driven bivariate landslide susceptibility assessment using geographical information systems: method and application to Asarsuyu catchment, Turkey. Eng Geol 71:303–21

Tang H, Yong R, Ez Eldin MAM (2016) Stability analysis of stratified rock slopes with spatially variable strength parameters: the case of Qianjiangping landslide. Bull Eng Geol Environ. <https://doi.org/10.1007/s10064-016-0876-4>

Thiery Y (2007) Susceptibilité aux mouvements de versant dans le bassin de Barcelonnette: cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de Doctorat, Université de Caen, 445p

Van Westen CJ (1993) Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. ITC Publication, vol. 15. International Institute for Aerospace and Earth Resources Survey, Enschede, p 245

Van Westen CJ (1994) In: Price MF, Heywood DIŽ (eds) GIS in landslide hazard zonation: a review with examples from the Colombian Andes. Taylor and Francis, London, pp 135–65

Van Westen CJ, Rengers N, Soeters R (2003) Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. Nat Hazards 30:399–419

Varnes DJ (1978) Slope movement types and processes Special report 176:11-33

Varnes DJ (1996) Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: investigation and mitigation, Transportation Research Board special report 247. National Academy Press, National Research Council, Washington, D.C

Wieczorek GF (1984) Preparing a detailed landslide-inventory map for hazard evaluation and reduction Bulletin of the Association of Engineering Geologists 21:337-342

Yacine A, (2017) Cartographie des zones à risque de glissement de terrain au voisinage de l'autoroute Est/Ouest (Algérie) dans sa partie Est entre Canstantine et Azzaba et estimation des risques associés, Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar, Algérie, 209p.

Yilmaz I (2010) Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine *Environmental Earth Sciences* 61:821-836

Yin KL, Yan TZ (1988) Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks. 5th international symposium on Landslides. Lausanne 2:1269–72

Zaagane M (2015) Importance de la morphotectogenèse du parautochtone de l'Ouarsenis dans la mise en place d'un matériel épiglyptique (Tell Oranais-Algérie occidentale): cartographie structurale, analyse qualitative et quantitative des risques, Thèse de Doctorat, Université de Mustapha Stambouli, Mascara, 221p

Zain Alabideen K, Helal M (2016) Determination of the safe orientation and dip of a rock slope in an open pit mine in Syria using kinematic analysis. *Al-Nahrain Univ Alege Eng J* 91(1):33–45