

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
UNIVERSITE D'ORAN 2 Mohamed Ben Ahmed  
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS  
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE



**Mémoire de fin d'étude présenté par : Mr. Diabaté Mohamed**

**Thème d'étude :**

Etude de la susceptibilité aux glissements de terrains par l'approche SIG ; du secteur de Kristel (ORAN-EST)

**Les membres du jury :**

Pr. Mansour Hamidi	Université d'Oran 2	(Président)
Dr. Foukrache Mohamed	Université d'Oran 2	(Examineur)
Pr Nadji Abdelmansour	Université d'Oran 2	(Encadreurs)
Mr. Roukh Z. El-Abidine	Université d'Oran 2	(Invité d'honneur)

(2019-2020)

## REMERCIEMENTS

Avant tout, je remercie Dieu tout puissant 'ALLAH' qui m'a donné la santé, le courage et la force pour pouvoir développer ce modeste travail ; qui m'a été confié par mes encadreurs.

De tout profond de mon cœur, je remercie mes très chers professeurs, en matière des risques géologiques et gestion, notamment à Mr. Nadji Abdelmansour, Mr. Mansour Hamidi, Mr. Foukrache Mohamed et le doctorant Mr. Roukh Zine El-Abidine, qui ont fait preuve de leur patience et de leur grande compétence tout au long de ce parcours 'Mémoire de fin étude'. C'est grâce à Dieu tout puissant et le sacrifice de mes encadreur que je pu progresser dans mes enseignement pour aller jusqu'au bout. Je ne saurai achever mes gratitudes sans dire merci à tout le personnel administratif du Département de Géologie pour leur grands efforts ; respectivement à Monsieur le chef du Département des Sciences de la Terre, à Monsieur le responsable de la Formation des Masters et à l'ensemble de mes professeurs ayant de la Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à tous mes proches et amis, qui m'ont toujours encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire et toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail. Merci à tous et à toutes.

Mr. Diabaté Mohamed

## **DEDICACES**

Je dédie ce modeste travail à mes parents, pour leurs énormes sacrifices, restant pour moi un exemple accablant de bonté et de courage. Le plus particulièrement à ma grande sœur qui m'a tant soutenu durant mon cursus de Master et que je serais tout de même très reconnaissant envers elle durant toute ma vie 'In Chaa-Allah'.

<b>SOMMAIRE :</b> .....	<b>02</b>
<b>Résumé :</b> .....	<b>04</b>
<b>abstract</b> .....	<b>05</b>
<b>Chapitre - I : Cartographie des glissements de terrains</b>	
<b>1. Introduction :</b> .....	<b>06</b>
<b>2. Théorie de l'évidence :</b> .....	<b>07</b>
<b>3. Caractéristiques générales de la zone d'étude :</b> .....	<b>12</b>
<b>4. Inventaire des glissements de terrains :</b> .....	<b>14</b>
<b>5. Les facteurs de glissement de terrain :</b> .....	<b>16</b>
5.1 La pente .....	<b>17</b>
5.2 L'orientation des relief (exposition des pentes).....	<b>17</b>
5.3 La distance par rapport aux cours d'eau.....	<b>18</b>
5.5 La carte des cotes altimétrique.....	<b>19</b>
5.5 La tectonique régionale.....	<b>20</b>
<b>6. La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrains :</b> .....	<b>22</b>
6.1 La méthode rapport de fréquence RF .....	<b>23</b>
6.2 Méthode de valeur d'information ou 'informe-value'(IV) .....	<b>24</b>
6.3 Application de la méthodes statistique de fréquence (RF) .....	<b>25</b>
6.4 Validation .....	<b>27</b>
<b>7. Conclusion :</b> .....	<b>28</b>

**Chapitre - II : Etude comparative entre le secteur de Kristel et de Tafraoui**

<b>Tafraoui :</b> .....	<b>32</b>
<b>1. Secteur de Kristel</b> .....	<b>32</b>
a. Formation d'origine continentale	
b. Formation d'origine marine	
<b>2. Secteur de Tafraoui</b> .....	<b>33</b>
a. Substratum	
b. Couverture	
<b>Chapitre- III Synthèse et perspectives</b> .....	<b>35</b>
<b>Référence bibliographique :</b> .....	<b>37</b>
<b>La liste des figures :</b> .....	<b>40</b>
<b>La liste des tableaux :</b> .....	<b>41</b>

## Résumé

Les risques géologiques présentent l'une d'importantes contraintes qui entrave le développement du secteur de Kristel située au nord-ouest du littoral oranais de la métropole occidentale de l'Algérie. Les glissements de terrain sont considérés comme des phénomènes les plus fréquents dans ce secteur d'étude et en particulier en zone accidentée. Pour minimiser et réduire les conséquences de ce problème, il est nécessaire de réaliser des études préliminaires portant sur la cartographie des différentes zones exposées au phénomène d'instabilité des terrains. L'objectif principal de cette étude est d'effectuer la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain par les modèles statistiques et les techniques du 'S I G' pour toute la région oranaise (Canastel-Kristel). Pour atteindre cet objectif, une approche analytique a été réalisée à la faveur de l'outil informatique 'ArcGIS'. En amont de cette approche, une carte d'inventaire des principaux glissements de terrain a été préparée à l'aide des coupures de cartes géologiques et d'inventaires antérieures, d'imagerie satellites, de photos aériennes et des relevés 'in-situ' sur le terrain. En second lieu, sept facteurs de conditionnement ont été introduit vue leur impact thématique tels que : le degré de pente, l'aspect d'orientation des reliefs, la lithologie, l'occupation des terrains, la distance par rapport aux cours d'eau, la distance de proximité à la route et la côte altimétrique ont été exploités pour évaluer l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain (ISGT). En dernier lieu, une classification hiérarchique des valeurs de poids pour chaque classe des facteurs mentionnés a été déterminée à l'aide des modèles de rapport de fréquence (FR) et de valeur informative (IV) basés notamment sur les fonctionnalités du S I G. Par ailleurs, les cartes de susceptibilité aux glissements de terrain (MSL) ont été produites par le processus de classification des indices universels de susceptibilité aux glissements de terrain (ISL) classés en cinq catégories. Enfin, pour la vérification des expériences, les MSL obtenus avec les modèles 'FR' et 'IV' sont certifiés via la comparaison des MSL avec la carte de l'inventaire des glissements de terrain à la faveur des modèles caractéristiques d'exploitation du récepteur dits (ROC) et de l'indice de la zone des cellules de semence (SCAI). Les résultats souscrits 'sous-courbe' de l'AUC démontrent que la méthode 'IV' est plus performante, de taux : 89,03 % ; pour la méthode LSM que le modèle 'FR' ; avec un taux de 85,57 %. En outre, les résultats de validation utilisant SCAI ont également confirmé que le modèle IV était plus précis que le modèle FR. Les modèles utilisés dans cette étude sont capables de résoudre la question de la susceptibilité aux glissements de terrain de la zone d'étude. Les cartes de susceptibilité produites peuvent être utilisées pour l'aménagement futur des terres et peuvent être considérées comme un outil puissant pour résoudre la répartition spatiale des risques associés aux glissements de terrain. Ces phénomènes intéressent une masse de terrain bien délimitée, avec rupture par défaut de résistance au cisaillement sur une surface le long de laquelle les déformations se localisent. Les matériaux déplacés peuvent évaluer de façon très variée suivant leur nature et les volumes en cause. S'il s'agit de roches, celles-ci se fragmentent généralement et le glissement initial se transforme en un éboulement. S'il s'agit de sols saturés, le remaniement et la destruction partielle de la texture peuvent donner un matériau de consistance plastique ou fluide à l'origine de coulées boueuses.

Mots clés : glissement de terrain, SIG et télédétection, indice de susceptibilité ISGT, valeur informative IV, rapport de fréquence FR, région littorale d'Oran (Kristel)

**ABSTRACT :**

The geological hazards present one of the most important constraints for the development of the Kristel sector (Oran-East), sises in the Northwestern of Algeria country. Landslides are considered that are one of the most common phenomena in the studed area and especially in the hilly area. For minimizing and reducing the consequences of this problem, it is necessary to carry out preliminary studies on the cartography of the different zones exposed to the slope instability phenomena. The main objective of this study is to perform the landslide susceptibility mapping by statistical models and GIS techniques for the Arzew area. To achieve this goal, an analytical approach was carried out. Firstly, a landslide inventory map was prepared using previous inventory maps, satellite images, aerial photos and field surveys. Secondly seven conditioning factors such as slope degree, aspect, lithology, land use, distance to the streams, distance to the road and altitude were exploited to assess landslide susceptibility. Thirdly, the weight value for each class of the conditioning factors was determined using Frequency Ratio (FR) and Information Value (IV) models based in GIS functionalities. Consequently, Landslide Susceptibility Maps (LSMs) were produced by the classification process of the global Landslide Susceptibility Indexes (LSIs) into five classes.

Finally, for experiment verification, the LSMs maps obtained with the FR and IV models were confirmed via comparing LSMs with landslide inventory map using both the Receiver Operating Characteristics (ROC) and the Seed Cell Area Index (SCAI) models. The area under curve (AUC) results, demonstrate that the IV method more performance (89.03%) for LSM than FR method (85.57%). Furthermore, the validation results using SCAI also confirmed that the IV model was more accurate than FR model. The models employed in this study are capable to resolve the issue of the landslide susceptibility of the study area. The produced susceptibility maps can be used for future land use planning and can be considered as a powerful tool to resolve the spatial distribution of the risk associated to landslides.

**Keywords :** Landslide Susceptibility mapping, Frequency Ratio, Informative\_Value, Kristel sector Oran-East.

## **Chapitre - I : cartographie algébrique des glissements de terrains**

### **1. Introduction**

Les glissements de terrains sont considérés comme un risque fréquent en zone de reliefs accidentés où le taux de dommage est important et qui désormais ne cesse de menacer les zones rurales et toute population abritée en zones montagnardes. Dans la plupart des zones telliennes ce risque est prononcé voir se multiplié à l'instar d'implantation de grands projets économiques où d'importantes superficies sont concentrées au niveau septentrional de l'Algérie, in Benaïssa et al. (2011) ; Hadji et al. (2017) ; Djerbal et al. (2017). La région d'Oran, métropole du nord-ouest de l'Algérie, devient sujet à ce risque de mouvement de terrain ; dont la géologie complexe et l'activité sismique sont omniprésentes pour amplifier l'aléa d'instabilité des terrains. Ces terrains accidentés sont effectivement exposés aux risques de glissements gravitaires et risqueront d'avoir des conséquences fabuleuses suite aux manifestations de pluies torrentiels et/ou des secousses telluriques notables, cependant, l'introduction de la variante de vulnérabilité ; en terme de risque permet de déterminer la composante de susceptibilité aux glissements de terrains qui est absolument nécessaire pour pouvoir délimiter les zones fragiles et de préconiser les secteurs abrités à cette énigme géologique. En effet, la susceptibilité au glissement de terrain est défini comme étant la probabilité d'occurrence d'un glissement par la mise en valeur de la superposition de plusieurs facteurs de prédisposition du milieu environnemental ; tels que : la pente talus, aspect, terrain) pour une zone donnée, in Thiery (2007), Guzzeti et al. (2005). Cette approche semble importante sur le plan préventif de l'instabilité des sites accidentés dont les techniques appropriées du SIG lui confère une grande résolution pratique via l'outil informatique en domaine d'établissement des cartes thématiques.

La cartographie de la susceptibilité au glissement de terrain peut être estimée par l'utilisation de plusieurs méthodes basées sur les techniques du SIG. De nombreuses études sont exploitées telles que le rapport de fréquence pour évaluer la sensibilité au glissement de terrain in Akgun et al. (2008), Yalçin et al. (2011), Youssef et al. (2015). D'autres ont utilisées le modèle de régression logistique pour évaluer la sensibilité aux glissements de terrains in Gorsevski et al. (2006 b) ; Yilmaz, (2010) ; Bai et al. (2011) ; Pourghasemi et al. (2013) ; Raja et al. (2017). L'indice statistique (valeur informative) est également utilisé pour résoudre la thématique de la susceptibilité au glissement de terrain in Bui et al. (2011), Cui et al. (2016), Aghdam et al. (2016). Le poids de preuves est souvent utilisé par de nombreux chercheurs in Regmi et al. (2010) ; Ozdemir et Altural (2013). Le processus de la hiérarchie analytique (AHP) (Gorsevski et al., (2006c), Ercanoglu et coll. (2008), Ittarawichian et Dasananda (2010), Chen et coll. (2016) et par Ghosh et coll. (2017). Quant à l'approche via l'ensemble flou est initié par l'auteur De-Pradhan en (2011) puis par Sezer et coll. (2011).



Par-ailleurs, le développement de méthodes s'est épanoui parallèlement avec la technologie des machines tels que l'approche SVM indexée par 'Support Vector Machine initiée par Ballabio et Sterlacchini (2012), Peng et coll. (2014), Pradhan et coll. (2017) et le réseau neuronal artificiel in Yilmaz (2009), Conforti et al. (2014), Chen et coll. (2017) qui sont appliqués au zonage des risques de glissement de terrain. En Algérie, la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrains présente une nouvelle approche de prévention des risques de glissements. Jusqu'à présent, peu de tentatives exercées en ce domaine. Pour citer certains travaux référés sur la susceptibilité aux glissements de terrains introduits en Algérie par Hadji et al. (2013), Djerbal et Melbouci (2013), Hadji et coll. (2014), Bourenane et coll. (2015), Achour et coll. (2017), Hadji et coll. (2017), Dahoua et coll. (2017), Mahdadi et coll. (2018) et Roukh Z. A & Nadji (2019). La zonation de la susceptibilité aux glissements de terrains devient indispensable pour la gestion en matière d'utilisation des terres et devrait se baptiser en document officiel pour divers projets de planification future ; in Gorsevski et coll. (2006a), Corominas et coll. (2014). La position géographique de la zone d'étude s'offre d'un patrimoine touristique ultime et nécessite plusieurs études préliminaires avant le lancement du plan de prévention sectoriel ou régional des risques géologiques.

Pour définir la zone sujette aux glissements de terrains, on propose d'envisager l'implication d'une cartographie thématique permettant de mieux cerner la vulnérabilité des terrains fragiles du secteur de Kristel sise en zone accidentée du Nord-ouest de l'Algérie. Dans cette étude, on a opté d'utiliser une cartographie algébrique déterminante pour classer les terrains selon le l'indice de leur susceptibilité aux glissements en suivant trois étapes essentielles :

- La première consiste à la production des données pour les introduire au programme cartographique.
- La deuxième étape intéresse le calcul d'indice de susceptibilité aux glissements via deux modèles.
- La troisième étape, est consacrée à l'établissement et à la validation des données.

## 2. La théorie de l'évidence

La théorie de l'évidence est une version en log-linéaire du théorème de Bayes qui utilise les principes de calcul de probabilité fondés sur les notions de probabilité a priori et a posteriori. Notons que la probabilité a priori, qui est la probabilité qui présume qu'une unité-terrain relative au à un pixel contient une variable dépendante 'Vd' du degré d'instabilités du terrain, est calculée suivant la densité par rapport à la zone d'étude. Quant à la probabilité a posteriori, elle est estimée d'après le calcul de la première 'probabilité a priori' selon la densité d'instabilités de terrain pour chaque variable (ou classe de variable) ; considérée comme prédictive à 'Vp'. La méthode consiste donc à calculer le poids donné par l'équation-1 et (2) pour chacun des facteurs de prédiction de glissement de terrains.

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

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

Où ;  $W^+$  : représente le poids positif et  $W^-$  : est le poids négatif. 'B', représente la classe de variable prédictive et le symbole «  $\bar{\quad}$  » représente l'absence de 'Vp' et/ou de 'Vd'. Le ratio nommé cote représente la probabilité de présence sur la probabilité d'absence du phénomène étudié. Les pondérations sont additionnées en utilisant le logarithme naturel des ratios appelé 'logit'. Les calculs des valeurs de  $W^+$  et de  $W^-$  pour toutes les 'Vp' permettent de calculer le poids de la probabilité a posteriori, qui actualise la probabilité a priori. Lorsque plusieurs 'Vp' sont combinées, les zones qui ont un poids respectivement élevé ou faible correspondent respectivement à une plus grande ou une plus petite probabilité de présence de 'Vd'. La différence entre les deux poids  $W^+$  et  $W^-$  est connu comme le contraste des poids qui reflète l'association spatiale entre la variable globale prévisible et les instabilités de terrains. La valeur de contraste donne un premier aperçu pour accepter ou rejeter une variable prédictive. Ce calcul permet d'identifier les variables ou les classes de variables qui sont positivement corrélées ( $W^+ > 0$  et  $W^- < 0$ ) ou négativement corrélées ( $W^+ < 0$  et  $W^- > 0$ ) et les variables non corrélées ( $W^+ = W^- = 0$ ). Ce modèle statistique est introduit dans le SIG du programme ArcGis V10 ; par une extension appelée Arc SDM. Le modèle de calcul des probabilités a priori  $W^-$ , les probabilités a posteriori  $W^+$  et le test d'hypothèse mathématique ; de type 'X<sup>2</sup>'. Cette procédure est nécessaire pour déterminer la meilleure combinaison possible à réaliser en additionnant un à un chaque variable prédictive.

## 2.1 Bases mathématiques

Un cadre de discernement est l'ensemble de toutes les hypothèses possibles du problème étudié. Notons  $\Omega$  cet ensemble et supposons qu'il est composé de N hypothèses différentes.

$$\Omega = \{ H_1, H_2, \dots, H_n \} \quad (1)$$

Une seule hypothèse de cet ensemble est considérée vraie. L'ensemble des parties (ou power set en anglais) de l'ensemble de discernement est l'ensemble qui contient toutes les combinaisons possibles des hypothèses. L'ensemble des parties se définit comme suit :

$$2^\Omega = \{ A | A \subseteq \Omega \} = \{ \emptyset, \{H_1\}, \{H_2\}, \dots, \{H_1, H_2\}, \{H_1, H_3\}, \dots, \{H_1, \dots, H_n\} \} \quad (2)$$

A peut-être une hypothèse simple ou une classe des hypothèses ou même un ensemble vide.

## 2.2 Fonction de masses :

La théorie de l'évidence est formulée par 'Shafer' comme une généralisation de la théorie Bayésienne. Pour le traitement de 'l'incertain' elle s'appuie sur les travaux de l'auteur 'Dempster' qui définit pour chaque cas incertain deux épontes de probabilités, l'une dite supérieure et l'autre inférieure. Ces deux probabilités constituent alors l'intervalle de confiance statistique. Pour la définition de cet intervalle on a besoin des fonctions de masses. Par définition, une fonction de masse, est connue sous le nom de « masse de croyance » ou bpa (Basic Probability Assignment), est notée tout simplement par la lettre 'm'.

Cette masse est calculée pour tout élément de l'ensemble ( $2^\Omega$ ) qui se définit comme suit :

$$\forall A \in 2^\Omega, m(A) \in [0,1] \quad (3)$$

$$\sum_{A \in 2^\Omega} m(A) = 1$$

La masse 'm' d'un élément A est associé uniquement à cet élément et pas à ses sous-ensembles. Un élément qui possède une masse non nulle est dit élément focal.

La modélisation des masses c'est le fait de répartir la connaissance sur tous les ensembles du cadre de discernement. L'attribution d'une masse non nulle à un ensemble contenant plusieurs hypothèses signifie qu'il existe une ignorance sur les éléments qui forment cet ensemble.

On définit les deux notions : du monde ouvert et du monde fermé comme suit :

- Un monde fermé est un monde où il est impossible d'attribuer une croyance à l'ensemble vide ( $m(\emptyset)=0$ ).

- Un monde ouvert est un monde où on peut attribuer une croyance à l'ensemble vide ( $m(\emptyset) \neq 0$ ).

### 2.3 Transformations cognitives des masses d'informations

A partir de la fonction de masse  $m$  on peut déduire d'autres fonctions comme la crédibilité et la plausibilité pour mieux représenter la connaissance.

#### La crédibilité :

La crédibilité désignée par  $bel$  mesure la croyance totale qui peut être attribuée à un élément donné. Elle s'applique dans le cadre d'un monde fermé. Elle se définit par :

$$\forall A \in 2\Omega, Bel(A) = \sum_{B \subseteq A, B \neq \emptyset} m(B)$$

#### La plausibilité

La plausibilité (plausibility) désignée par  $pl$  mesure la croyance maximale qui peut être potentiellement attribuée à un élément donné. Elle se définit par :

$$\forall A \in 2\Omega, Pl(A) = \sum_{A \in B \neq \emptyset} m(B)$$

A partir de ces deux fonctions on obtient les propriétés suivantes :

$$\begin{aligned} \forall A \in 2\Omega, \quad pl(\Omega) &= 1 \\ \text{Bel}(\Omega) &= 1 \\ \text{Pel}(A) &\geq \text{bel}(B) \\ \text{Pel}(A) &= 1 - \text{bel}(\bar{A}) \\ \text{Bel}(A) &= 1 - \text{pel}(\bar{A}) \end{aligned}$$

## 2.4 Combinaison :

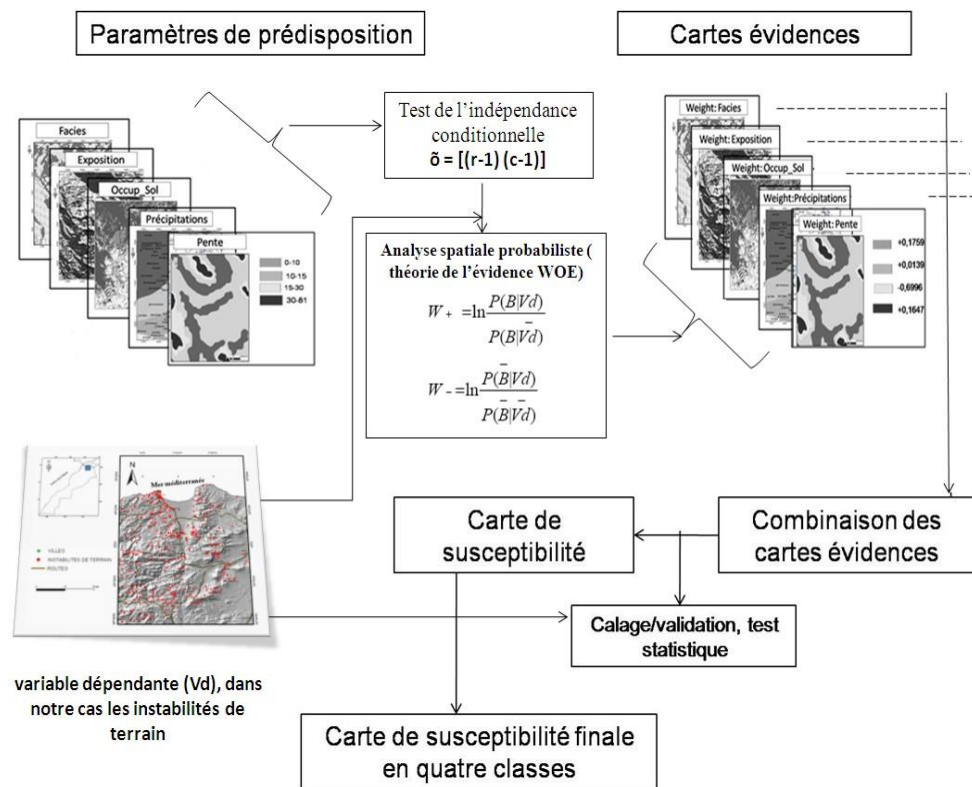
Plusieurs sources d'informations peuvent apporter des connaissances sur un même ensemble de discernement. Ces sources peuvent être distinctes ou identiques mais elles fournissent des observations différentes. Dans tous les cas, un jeu de masse peut être construit pour chaque observation de l'information donnée. La combinaison de toutes les connaissances pour cet ensemble donne une connaissance globale du système. Il existe plusieurs lois de combinaisons des sources possibles que nous allons aborder dans cette section. Nous supposons avoir N sources différentes notées :  $S_1, S_2, \dots, S_N$ . Les masses qui proviennent de chaque source attribuées à un élément A de l'ensemble du discernement sont notées respectivement :  $m_1(A), m_2, \dots, m_N(A)$ .

## 2.5 Prise de décision :

La dernière étape concerne la fusion d'information est la prise de décision. C'est l'étape où l'on peut choisir une seule hypothèse parmi les hypothèses de l'ensemble de discernement  $\Omega$ . Ce choix n'est pas simple de l'ensemble des parties, ce qui signifie que même après la fusion, l'ambiguïté ne peut pas être absolument levée. Nous ne considérons dans cette section que le cas d'hypothèses simples. En d'autres termes nous considérons le cas où nous voulons choisir l'hypothèse simple la plus adaptée après la fusion des connaissances apportées par les différentes sources étudiées. Dans le cas bayésien (probabiliste), le maximum a posteriori est la règle de décision ; alors que la théorie de l'évidence offre un ensemble de règles de prise de décision différentes qui ne donnent pas forcément le même résultat.

## 2.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons tenté de donner une vue synthétique de divers aspects sur l'aspect de fusion d'informations ainsi que sur la théorie de l'évidence. Cependant, nous avons montré que cette théorie présente plusieurs avantages notamment au niveau de la modélisation de l'incertitude et de l'embarras du choix. La théorie de l'évidence permet aussi de modéliser les connaissances non seulement sur le plan d'hypothèses simples mais aussi sur l'application d'hypothèses multiples. Cette théorie est largement étudiée dans plusieurs travaux. Plusieurs méthodes sont proposées pour la modélisation (automatique ou semi-automatique), la combinaison entre les paramètres ainsi que pour la prise de décision. Ainsi qu'elle est largement employée en fusion d'informations et dans d'autres domaines d'application tel celui du traitement des images (télédétection).



**Figure- 1 :** Approche méthodologique préconisée (Théorie de l'évidence)

### 3. Les caractéristiques générales du secteur d'étude :

Kristel est un ancien village côtier enclavé dans l'autochtone Secondaire de l'Oranie. Il est situé sur la bordure des massifs d'Arzew, à 26 km de l'Est de la ville d'Oran. Le secteur de Kristel relève administrativement de la commune de Gdyl ; Wilaya d'Oran dont la côte est surtout rocheuse dans un relief fortement accidenté. Le massif rocheux de Kristel atteint les 490 mètres d'altitude, ainsi que Djebel 'Bou-Aïchem', culminant à 630 m près du massif voisin 'Djebel-Orous' à 630 m d'altitude. Notre secteur d'étude fait partie de cette zone côtière d'Oran, sise Nord-Est du littoral oranais, métropole occidentale de l'Algérie. Les coordonnées géographiques en projection UTM-WGS84 ; de la zone-30 sont respectivement : 3976894,08 m, 3954859,17 m en 'latitude' et 715833,47 m, 747107,72 m en 'longitude' avec une superficie de : 308,06 km<sup>2</sup>.

Les unités géomorphologiques du secteur d'étude se caractérisent par la présence de quelques plaines, de montagnes et un plateau de crête sommitale, la portée d'altitude varie de (0 à 625) mètres sur plusieurs reliefs. Le climat de Kristel fait partie d'une zone bioclimatique méditerranéenne 'semi-aride', dont un réseau hydrographique très développé à un flux dense, conforme à la topographie de la région.

Vers le nord, l'hydrographie a un flux drainant vers la mer, tandis qu'au sud, le flux superficiel se prête d'alimenter plusieurs structures endoréiques (lacs, salines et sebkhas). La zone d'étude fait partie des telliens 'Maghrebides', renfermant en partie restreinte d'unité Paléozoïque et d'une unité Mésozoïque, très tectonisée et métamorphosées in Ciszak (1993). Selon les cartes géologiques de Gourinard (1952) quatre unités du secteur d'étude sont composées de trois grandes entités géologiques apparentes et distinctes. Elles sont respectivement réparties d'est en ouest ; les monts Kristel, les monts Borosse et Orousse, la quatrième entité présentée par Djebel 'Montagne des Lions', Djebel Borosse et plus complexe que Djebel Orousse (Monts d'Arzew), tous les deux sont constitués par des formations relativement épaisses de carbonate et de calcaire-schiste broyés, des calcaires tronqués au niveau de surface d'érosion dominante. Leurs impressionnantes falaises abruptes sont formées notamment par le schiste caractérisé à structure chevauchante le Néogène attribué à l'âge Plio-quadernaire selon plusieurs auteurs : Perrodon en (1957); Fenet (1975) et Thomas (1985). Le Miocène est subdivisé en deux cycles sédimentaires. Le premier cycle dit 'post-nappe' est représenté par des marnes vertes situées entre le flanc sud de 'Djebel-Khaar' et le plateau de 'Boufatis'. Quant au deuxième cycle, est précédé d'une phase d'érosion active accompagnée d'une accumulation de plusieurs séries continentales à l'est d'Oran. Les formations marneuses et cinérétiques comptent sur les dépôts du premier cycle post-nappe de Canastel (falaises d'Oran - Canastel).



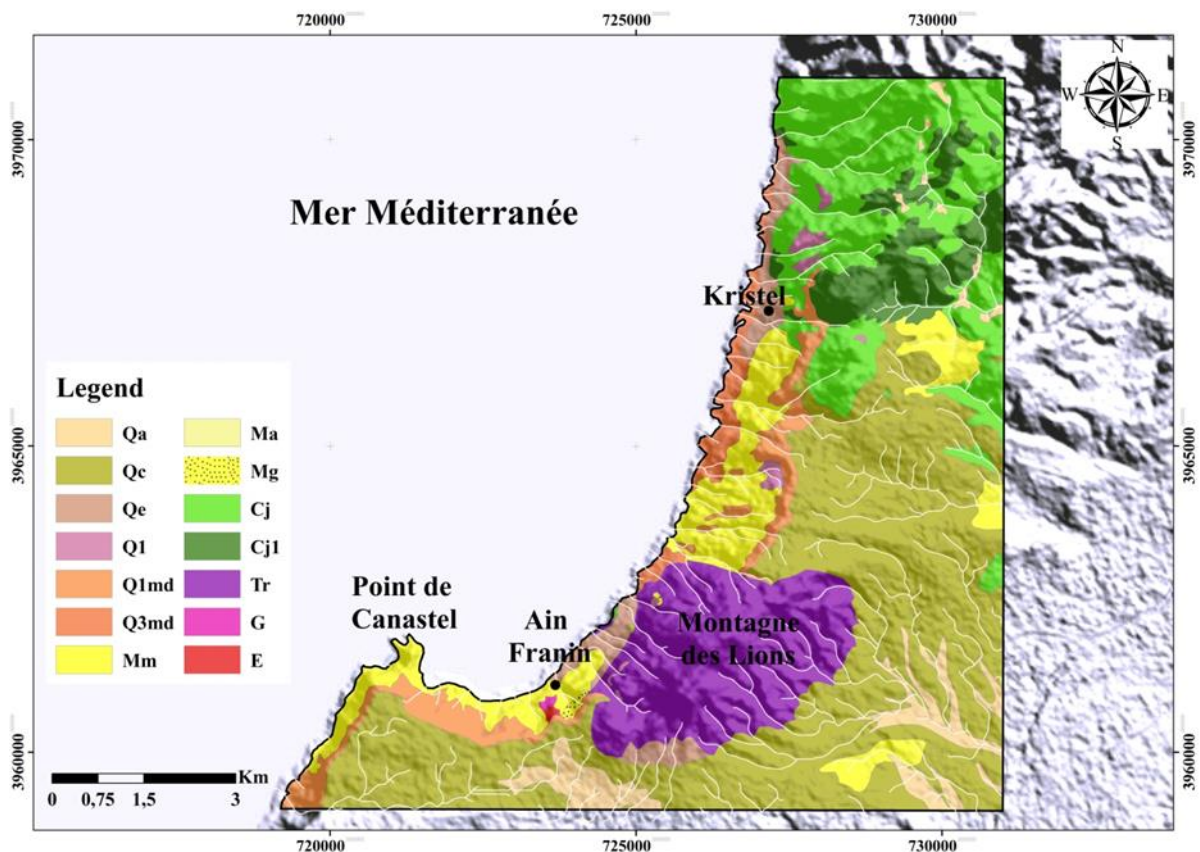


Figure-2 : Carte des principales formations lithologiques.

#### 4. Inventaire des glissements de terrain

La cartographie de l'inventaire des glissements de terrain est le paramètre clé de la modélisation de la susceptibilité des glissements de terrains ; in Fell (2008) et Corominas et al. (2014). Les images satellites, photo aériennes, GPS, les revues, les articles, les rapports internes et les enquêtes sur le terrain fournissent des outils importants pour établir la carte d'inventaire des glissements de terrain. Cette carte contient la position de glissement de terrain qui survient dans le passé. Dans cette étude, les positions des glissements de terrain ont été identifiées grâce aux bases de données existantes, les images satellites, les photos aériennes, Google Earth, et les enquêtes de terrain. Enfin, la base de données contient de plusieurs polygones. La figure4 illustre la répartition de la localisation des glissements de terrain dans le secteur de Kristel, Algérie. Dans cette étude, nous avons utilisé la classification des glissements de terrain développé selon Cruden et Varnes (1996). Les glissements de terrain sont regroupés en trois types : rotation, translation et glissement complexe. La **figure 3** illustre quelque exemple de glissements de terrains affectant le secteur d'étude.



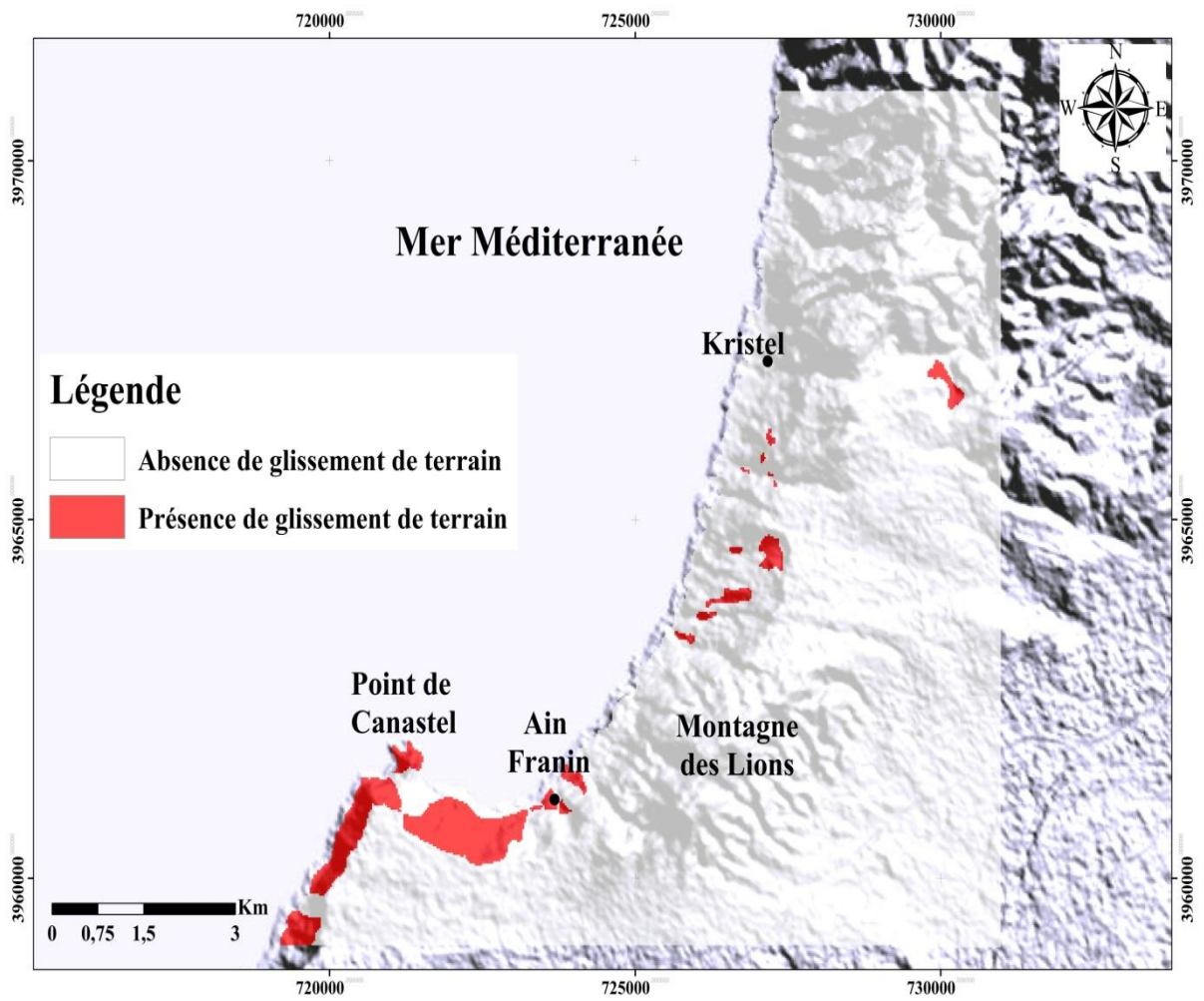


Figure-3 : Carte d'inventaire des glissements de terrains auscultés.



**Figure-4** : prise de vue panoramique illustrant les glissements de terrains le secteur de Kristel.

## 5. Les facteurs de glissement de terrain

D'une façon générale, les mouvements de terrains se développent en masse sous l'effet gravitaire et tectonique en zones accidentées. Ils résultent d'une combinaison des facteurs déclencheurs et de facteurs qui aggravent la situation, en particulier l'aspect lithologique, structural et rhéologique 'géotechnique'. Les paramètres intrinsèques tels que, l'angle de pente, la saturation en eaux souterraines, la présence d'Oueds et l'activité sismiques de la région. Leur distribution spatio-temporelle et l'irrégularité et leur fréquence est souvent conditionnée par l'effet géodynamique des facteurs structurales d'une extension extrême. Les facteurs de conditionnement utilisés dans notre approche sont l'angle de pente, l'orientation de l'exposition des reliefs, la lithologie des faciès, l'occupation des terrains, la cote altimétrique, la distance des cours d'eaux et de la distance de proximité à la route. Ces mouvements de terrains sont donc générés par différentes sources ; regroupées dans le Tableau -1. Toutefois, les attributs topographiques tels que l'angle de pente (talus), l'exposition des pentes et la cote altimétrique sont dérivés des données du modèle numérique de terrain (MNT) pris à une échelle sectorielle. En effet, ce modèle 'MNT' a été établi par le biais d'une numérisation fine et via l'interpolation de courbes de niveaux de l'assemblage de deux cartes topographiques ; à l'échelle de 1:25000. Les cartes topographiques (fig.1), la lithologie ont été extraites à partir de trois (3) cartes géologiques à dont l'échelle est de 1/50.000. En outre, la carte d'occupation du sol et la carte thématique de distances par rapport à la route sont extraites à partir d'une carte de l'utilisation des terrains de la Wilaya d'Oran à grande échelle  $e=1/25.000$  ; élaborée par le Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural ; de la référence Bener (2011), ainsi que l'interprétation des images satellites.

**Tableau1 : source d'informations des différents facteurs utilisés**

Paramètre	Carte	Source d'information
Inventaire de glissements des terrains	Carte d'inventaire de glissement des terrains	Image satellite (spots 6), interprétation des photos aériennes, travail sur terrain, donnée bibliographiques.
Morphologie du terrain	Carte de pentes	Création du MNT par digitalisation et interpolation des courbes de niveau de 2 cartes topographique d'échelle 1/25000.
	Carte d'exposition des pentes	
	Carte d'altimétrie	
Géologique	Carte de la lithologie	Digitalisation des 3 cartes géologiques. Gourinard Y (1952), Boulaine j et al. (1957).
Hydrologique	Carte de distance par rapport au cours d'eau	Digitalisation le réseau hydrographique à partir de la carte topographique.



**5.1 La pente :** Les valeurs sont en degrés représentant les gradients de pentes qui nous ont permis d'augmenter l'acculturation du mouvement de pente, c'est pourquoi ce paramètre a présenté l'un des facteurs déterminant à l'aggravation du risque de glissement de terrains. en utilisant les fonctionnalités du MNT et du SIG, le degré de pente a permis de cerner cinq (5) classes : 0-10 °, 10-20 °, 20-30 °, 30-50° et >50 °) ; (fig.6).

**5.2 l'orientation des reliefs (exposition de pentes) :** dit l'aspect est considéré comme un paramètre important pour estimer le taux d'exposition des pentes. Ce paramètre est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre de : 00° à 360°, les valeurs qui sont moins de 01° représentent la surface plate. l'aspect présente également un facteur de conditionnement essentiel dans les processus de susceptibilité aux glissements de terrains. Le SIG du logiciel ArcGIS offre un module spécial pour la construction des cartes d'orientations (exposition des pentes) à partir du MNT.

La figure- 6, illustre un extrait de la carte dite 'd'aspect' du secteur de Kristel avec 10 classes.

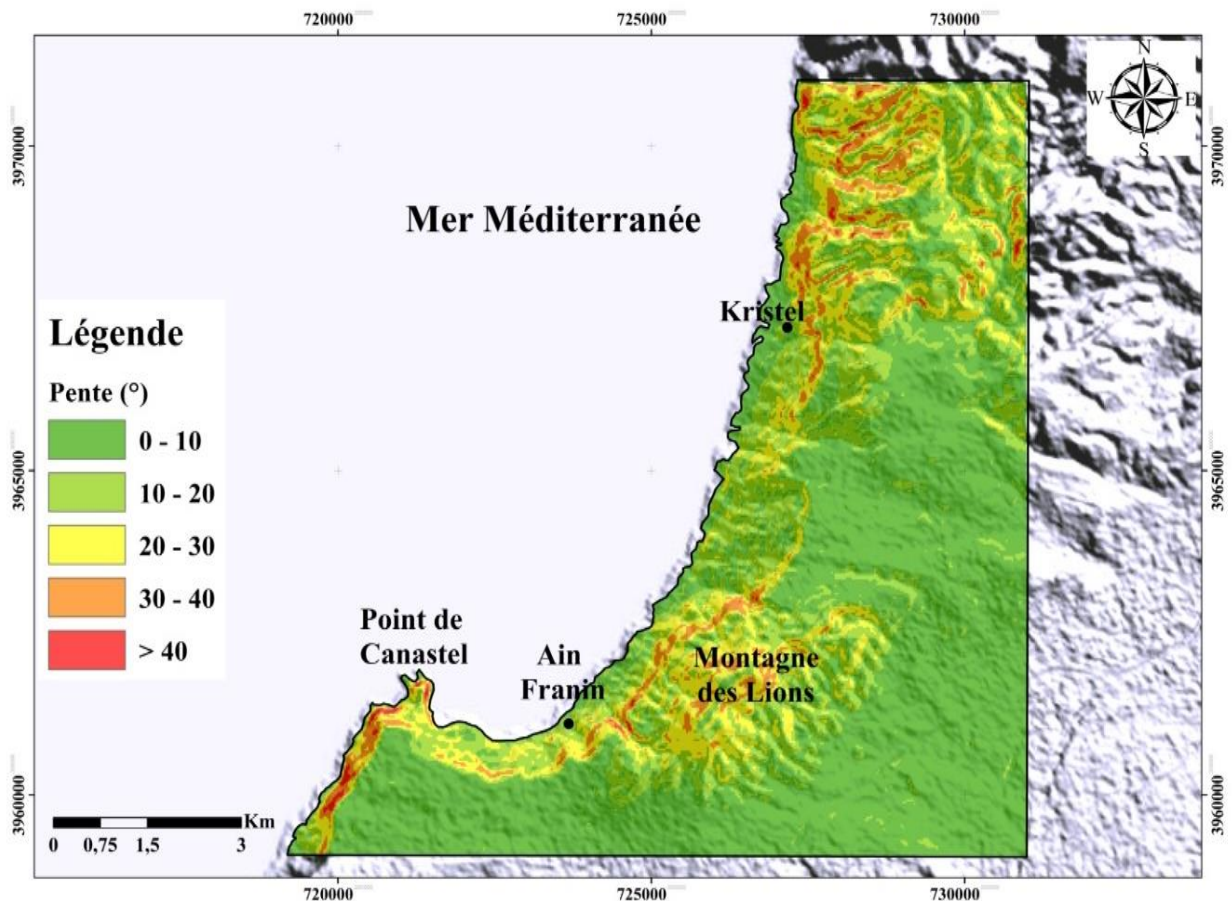


Figure-5 : carte de pentes topographiques

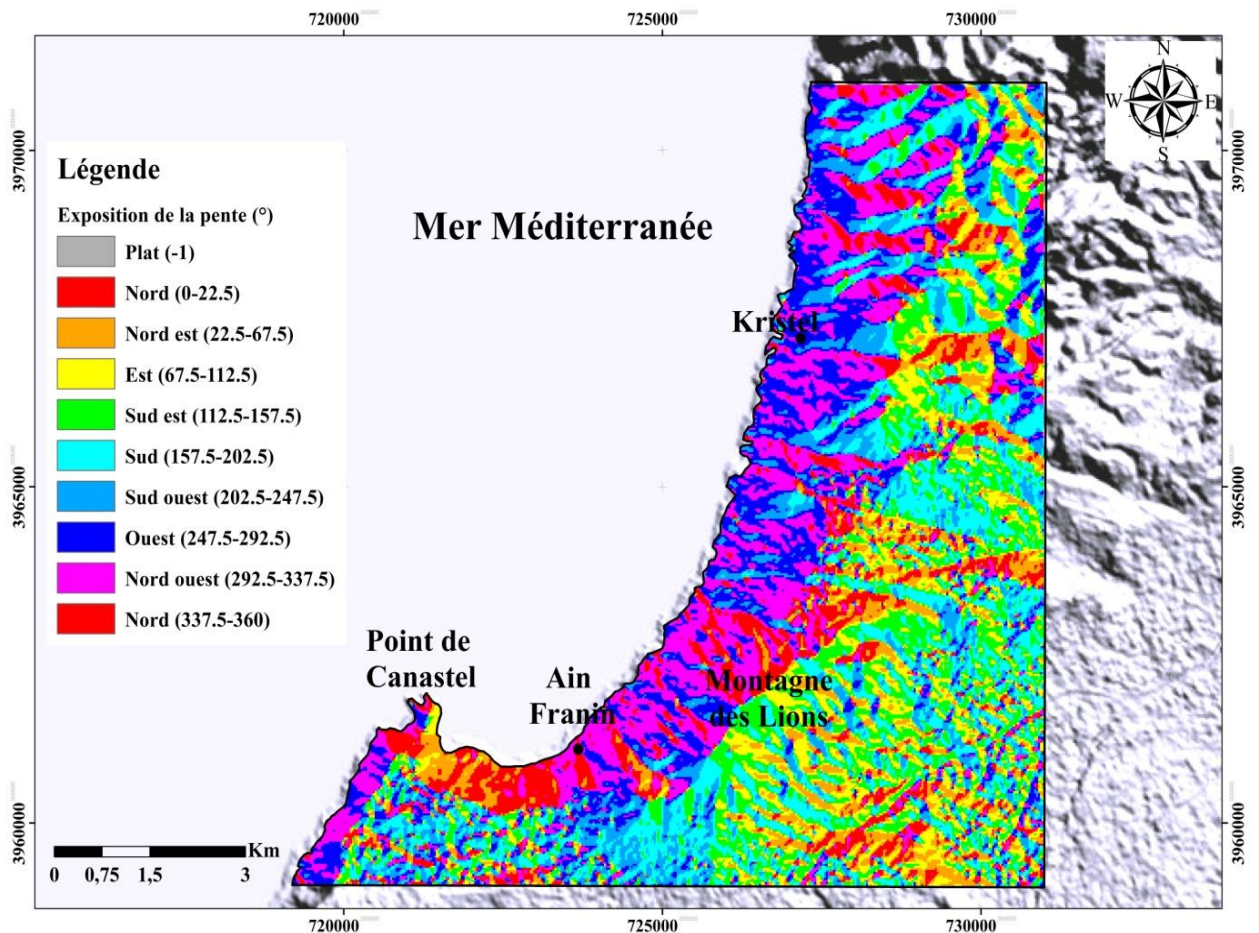


Figure- 6 : carte d'orientation des reliefs (exposition de pentes)

### 5.3 - La distance par rapport au cours d'eau :

En général, les glissements de terrain se sont développés près des cours d'eau où la vitesse d'écoulement est suffisante pour éroder la partie inférieure du talus. Pour cet raison la distance aux cours d'eau ont été intégrés dans l'estimation de susceptibilité aux glissements de terrain, en utilisant la fonction de distance euclidienne dans Arc-GIS, les zones tampon des flux ont été établie en six classes (0-50, 50-100, 100-200, 200-300, 300-400, > 400).

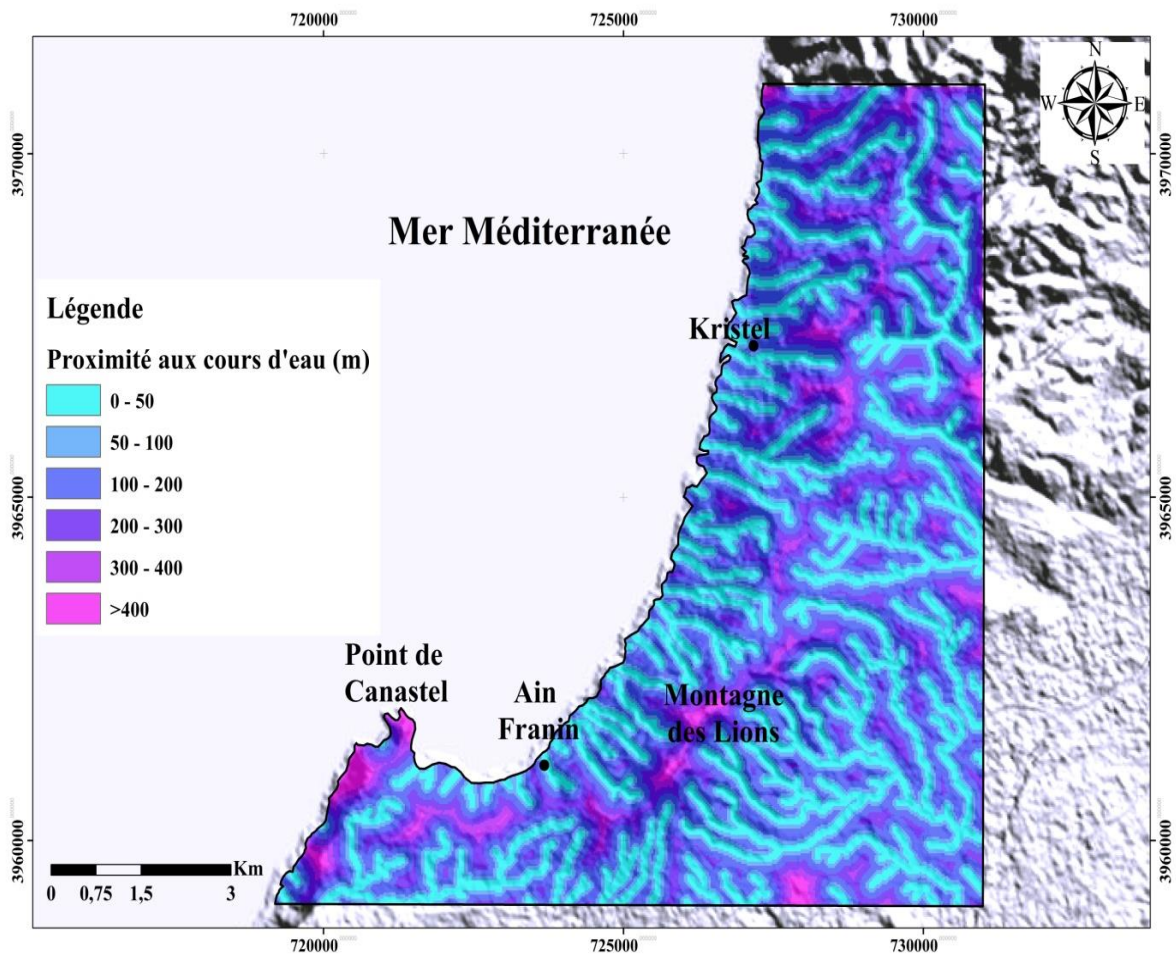


Figure- 7 : Carte des distances par rapport aux cours d'eau (Oueds)

#### 5.4 Carte des côtes altimétriques

L'ampleur du mouvement de la pente du talus augmente avec l'amplification de l'altitude, hypsométrique d'une région donnée. Dans ce travail, le MNT est bien exploité pour établir plusieurs cartes thématiques y compris celle des altitudes en se basant sur la fonction de classification approprié du logiciel ArcGIS (V. 10.1).





Figure- 8 : la carte des côtes altimétriques (restituée/MNT)

### 5. 5 - La tectonique régionale

La relation entre l'instabilité des terrains et la tectonique régionale est formelle dans ce secteur sis sur une marge littorale instable dont la géologie des terrains comprend plusieurs discontinuités. L'effet tectonique est omniprésent depuis les dernières phases du Plio-quaternaire où d'importantes discontinuités affleurent à la surface des terrains accidentés (Aine-Franine et Kristel). D'importantes masses de terrains se prêtent au mouvement dès qu'une excitation tellurique ou hydrique se manifestait. L'auscultation des terrains 'in-situ' confirme une occurrence notable est essentiellement due aux mouvements gravitaires ; en masses qui s'orientent selon l'épandage des talus de versants dépassant les 30°. Par-ailleurs, l'émergence des sources d'eaux en plusieurs sites confirment l'existence de failles actives traversant l'ensemble des structures antérieures. En effet, l'eau s'infiltré à travers les diverses failles entraînant l'accroissement de pression interstitielles pour atteindre le degré de saturation qui facilite le déclenché des glissements de terrains.

En général, les versants septentrionaux de Kristel montrent l'existence de couches stratifiées et d'autres à schistosité prononcée en position subparallèle à la pente topo d'où le risque d'emballement des terrains devient important et peut entraîner une instabilité croissante sur les versants donnant sur le littoral. Pour l'établissement de la carte d'indice de fracturation, nous avons fait recours aux résultats de l'analyse des données satellitaires complétées par l'étude du réseau hydrographique permettant ainsi de calquer le tracé d'une fracturation à densité modérée déterminée par la présentation de l'orientation des reliefs (azimutal-aspect) déterminant ainsi plusieurs familles de fractures. Cette approche tiendra compte aussi bien de la longueur de la faille que de la présence de nœuds tectoniques. Cette représentation souligne l'importance du réseau de fracture pour déterminer la fragilisation du terrain et de donner la nature du régime tectonique se manifestant sur le site en reproduisant les mouvements de terrains développés sur le long des accidents dont les orientations : Nw-Se et Est-West sont majoritaires (Figure-9).

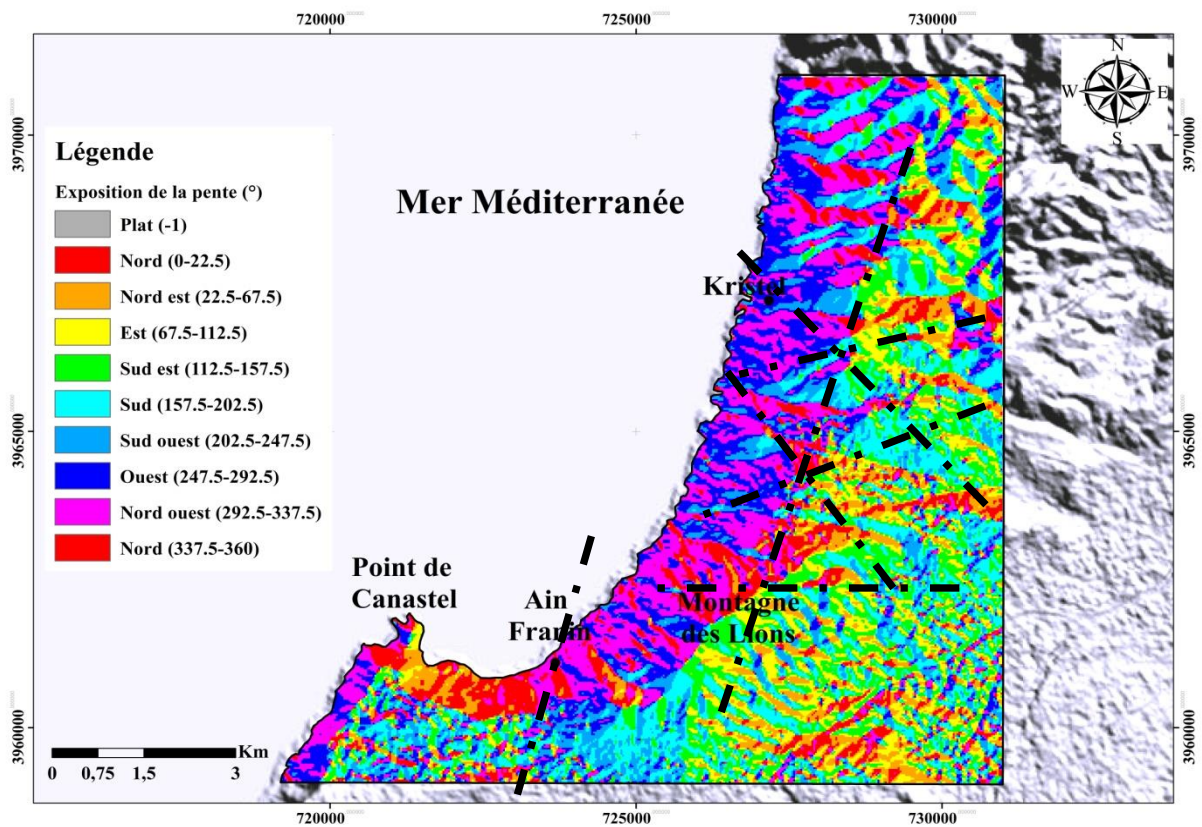


Figure- 9 : Carte thématique interprétative de la fracturation potentielle



## 6. la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrains :

Dans ce travail, la méthode de résolution de l'indice statistique et le rapport de fréquence ont été appliqués à la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrains. La pondération de chaque classe de facteurs 'causals' est définie par la combinaison de chaque paramètre impliqué parallèlement à la carte d'inventaire des glissements de terrains. Par la simple combinaison selon les règles arithmétiques dites de décision (addition, division, multiplication... etc), a permis d'obtenir le poids de chaque classe de facteurs de conditionnement défini. Enfin, la classification de l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrains ; utilisant la rupture naturelle de 'Jenks' avec la validation des cartes de susceptibilité en comparant ces résultats avec ceux de la carte d'inventaire (initiale).

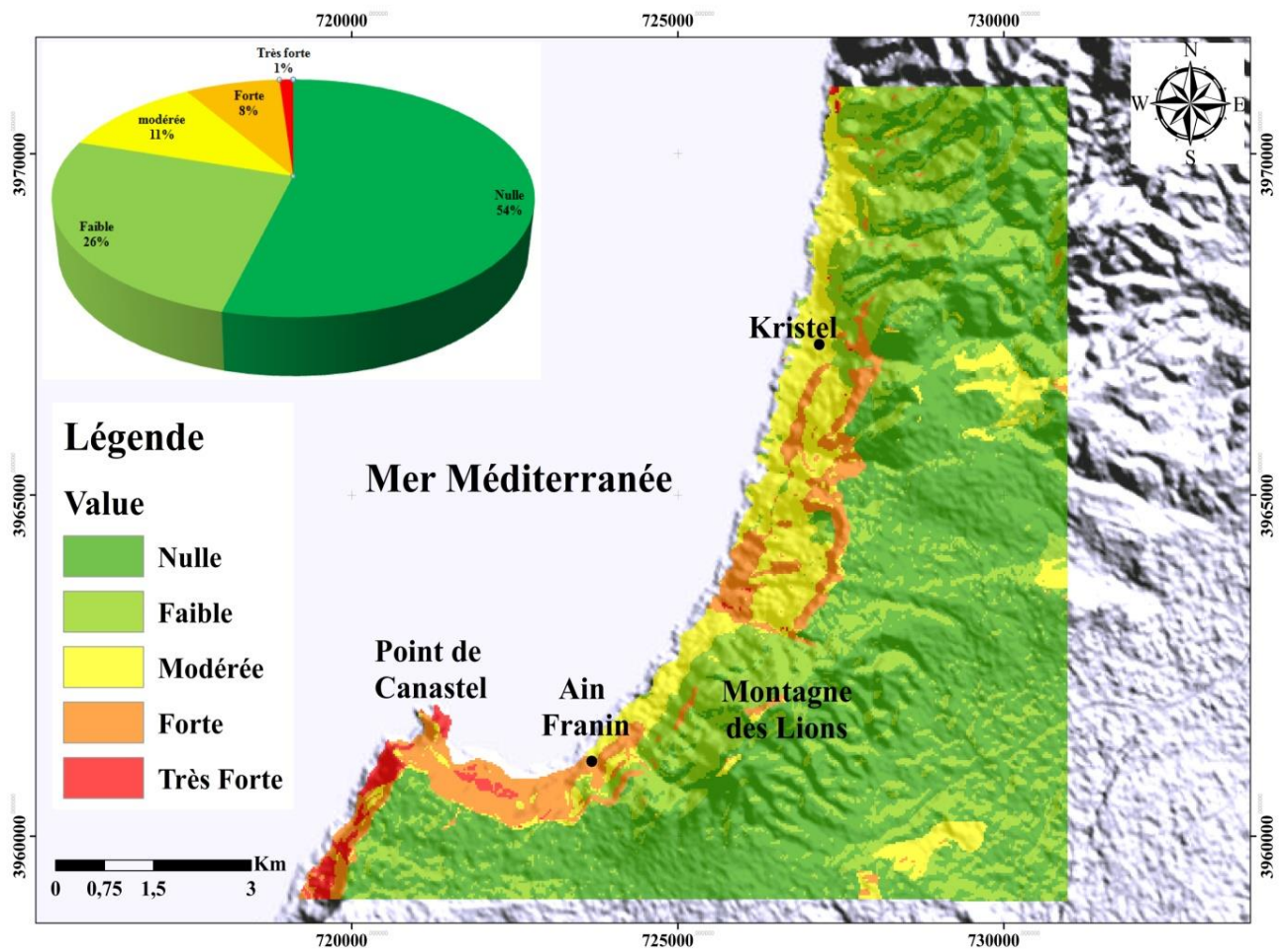


Figure-10 : Carte de la susceptibilité aux glissements de terrains

## 6.1 La méthode de ‘Rapport de Fréquence’ ; (RF)

Le concept fondamental de cette méthode est de calculer le rapport entre la densité des phénomènes dans une classe donnée et la densité de cette même classe in Lee et Talib, (2005). LSI exprimé à l’aide de l’équation suivante : (Equation. 1)

$$Ls1= Fr1+ Fr2+ Fr3+...+ Frn \dots\dots\dots (1)$$

Dans cette analyse statistique traitant le rapport d’occurrence des glissements de terrain et le rapport de chaque classe dans le facteur de conditionnement, la valeur moyenne de Fr est égale à 1. Si la valeur est >1, indiquez une corrélation maximale et une valeur inférieure à 1 dit ‘corrélation minimale’. Le tableau- 3 affiche les résultats de cette application.

En conséquence, pour le degré de pente, FR a augmenté avec l’augmentation du degré de pente, la classe (>50) à une valeur maximale (3.995), tandis que la classe (0 – 10) a la valeur minimale (0,338). Les analyses d’aspect montrent que la valeur maximale du Fr (3.454) est pour le Nord-Ouest, suivie par l’Ouest (2.573), du Nord (2.025) et flat (1.915), indiquant la probabilité maximale d’occurrence de glissement de terrain. Les résultats de fréquence du paramètre lithologie indiquent que la mare grise, marne - calcaire blanche, gypse et d’une marine avec une valeur maximale de FR (10.397) sont les plus sujette au glissement de terrain. Les valeurs FR supérieures à 1 sont distribuées à la distance plus proche des flux (0-100) et (100-200) indiquant une forte probabilité d’occurrence de glissement de terrain. Pour la proximité de la route donner respectivement la valeur : 1.125, 1.507 et 1.710 pour la distance (300 - 450), (450-600) et > 600. Corrélation entre l’utilisation des terres et glissement de terrain indique que le glissement de terrain s’est généralement produit dans la zone aride (4.086) et la zone de maquis (1.759). La combinaison entre l’inventaire de l’altitude et des glissements de terrain, a montré que les glissements de terrain sont apparus la plupart du temps de 0 à 100m. À l’aide de l’équation 1, les valeurs LSI varient de 1,15 à 27,13. À l’aide de la fonction reclassifiée, la carte indexée ‘LSI’ a été reclassifiée en cinq classes respectives: très faible (39,07 %), faible (31,46 %), modérée (19,80 %), élevée (4,72 %) et très élevé (4.93%) ; (**fig. 9**)

## 6.2 Méthode de valeur d'information ou 'informative-value' (IV) :

La méthode statistique utilisée dans cette étude est proposée par Yin et Yan 1988 et modifiée par l'auteur Van Westen (1993), est basé sur la comparaison entre la répartition spatiale des phénomènes et leurs différents facteurs. Tout d'abord, la méthode est basée sur une analyse statistique à l'aide de l'équation (2)  $W(i)$  est le poids de chaque classe (par exemple le poids de la classe  $10^\circ$  de la pente),  $N_{pix}(S_i)$  est le nombre de pixels de glissement dans les classes  $i$ ,  $N_{pix}(N_i)$  est le nombre de pixels dans la classe  $i$ . le dominateur est le rapport entre le nombre de pixels de tous les glissements de terrain et pixels total de la zone d'étude. Dans un deuxième temps, la probabilité de l'occurrence de glissements de terrain dans chaque classe est déterminée par équation (3):

$$w(i) = \frac{\frac{N_{pix}(s_i)}{N_{px}(N_i)}}{\frac{\sum N_{pix}(s_i)}{\sum N_{pix}(N_i)}} \quad (1)$$

Enfin, l'indice de susceptibilité aux glissements de terrain (LSI) du terrain est déterminé par la somme de tous les facteurs (équation 4) après l'intégration de la probabilité d'occurrence de glissements dans chaque classe.

$$pr(i) = \ln \frac{N_{pix}(s_i)/N_{px}(N_i)}{\sum N_{pix}(s_i)/\sum N_{pix}(N_i)} \quad (2)$$

Les combinaisons des cartes thématiques avec la carte d'inventaire des glissements de terrain dans ArcGIS permettent de calculer le nombre de pixels du glissement de terrain dans chaque classe. La méthode de la valeur de l'information nous a permis de calculer le poids de chaque classe (tableau-3). Les résultats positifs et négatifs de l'ISL signifient que les valeurs les plus élevées indiquent une Coulissante. Les valeurs finales calculées de l'ISL de la zone d'étude varient de -11,98 à 7,53. La carte LSI a été classée en cinq classes utilisant la méthode des pauses naturelles 'Jenks' (très faible : 19,12 %, faible : 33,3 %, modérée de : 24,46 %, 18,34 % et très élevé : 4,75 %) ; (Fig. 12)

$$LSI = \sum_{i=1}^n \ln \frac{N_{pix}(s_i)/N_{px}(N_i)}{\sum N_{pix}(s_i)/\sum N_{pix}(N_i)} \quad (3)$$

### 6.3 Application de la méthode statistique rapport de fréquence (RF)

Dans ce travail, le calcul de la susceptibilité est basé sur l'application d'une méthode statistique bivariée dite rapport de fréquence. L'analyse statistique est fondue essentiellement sur l'exploitation des images raster qui fournit le nombre des pixels. Cette technique est basée sur le calcul de la densité des glissements de terrain dans une classe donnée par rapport à la densité des glissements dans toute la zone d'étude (équation1).

$$FR(i) = \frac{A}{B} = \frac{Dn(i)}{Dn(I)} = \frac{\frac{\text{Nombre des pixels des parcelles glissée dans la classe } i}{\text{Nombre total de pixels de la classe } i}}{\frac{\text{Nombre total des pixels des glissement de terrain}}{\text{Nombre total des pixels}}}$$

L'application de cette technique permettant de calculer le rapport de fréquence pour chaque classe des paramètres intégrés dans cette étude (Tableau).

Paramètre	Classe	n° pixel des parcelles glissées dans la classe i	nombre des pixels de la classe i	A	nombre total des pixels des parcelles glissées	nombre total des pixels	B	RF (A/B)
Altitude	0-100	1552	7160	0,21675978	3192	78617	0,04060191	5,338660198
	100-200	1107	17043	0,06495335	3192	78617	0,04060191	1,599761208
	200-300	422	28016	0,01506282	3192	78617	0,04060191	0,370988038
	300-400	111	17363	0,0063929	3192	78617	0,04060191	0,157453311
	400-500	0	7543	0	3192	78617	0,04060191	0
	>500	0	1492	0	3192	78617	0,04060191	0
Pente (°)	0-10	672	44488	0,0151052	3192	78617	0,04060191	0,372031725
	10-20	1262	19008	0,0663931	3192	78617	0,04060191	1,635221227
	20-30	727	11142	0,06524861	3192	78617	0,04060191	1,607033171
	30-40	410	3684	0,11129207	3192	78617	0,04060191	2,741055441

	>40	121	295	0,41016949	3192	78617	0,04060191	10,10222272
Formation lithologique	cj	3	13747	0,00021823	3192	78617	0,04060191	0,005374857
	cj1	2	4742	0,00042176	3192	78617	0,04060191	0,010387763
	E	0	42	0	3192	78617	0,04060191	0
	G	0	43	0	3192	78617	0,04060191	0
	mg	0	106	0	3192	78617	0,04060191	0
	Mm	1568	7895	0,19860671	3192	78617	0,04060191	4,891561392
	q1	0	617	0	3192	78617	0,04060191	0
	q1md	1360	3798	0,3580832	3192	78617	0,04060191	8,819369382
	q3md	5	1633	0,00306185	3192	78617	0,04060191	0,07541147
	qa	0	3555	0	3192	78617	0,04060191	0
	qc	0	30183	0	3192	78617	0,04060191	0
	qe	47	2137	0,02199345	3192	78617	0,04060191	0,541685138
tr	0	10573	0	3192	78617	0,04060191	0	
distance par rapport aux réseaux hydrographiques	0-50	617	19601	0,03147799	3192	78617	0,04060191	0,775283462
	50-100	546	17630	0,03096994	3192	78617	0,04060191	0,762770547
	100-200	775	24753	0,03130934	3192	78617	0,04060191	0,771129727
	200-300	591	12562	0,04704665	3192	78617	0,04060191	1,158730067
	300-400	0	3168	0	3192	78617	0,04060191	0
	>400	327	864	0,37847222	3192	78617	0,04060191	9,321538438
Direction de la pente	Plat	3	4	0,75	3192	78617	0,04060191	18,47203947
	Nord	1025	8268	0,12397194	3192	78617	0,04060191	3,053352759
	Nord est	487	7043	0,06914667	3192	78617	0,04060191	1,703040035
	Est	89	7746	0,0114898	3192	78617	0,04060191	0,282986748
	Sud est	11	10697	0,00102833	3192	78617	0,04060191	0,025327031
	Sud	13	12339	0,00105357	3192	78617	0,04060191	0,025948782
	Sud ouest	163	9431	0,01728343	3192	78617	0,04060191	0,425680194
	Ouest	513	10690	0,04798877	3192	78617	0,04060191	1,181934051
	Nord ouest	888	12399	0,07161868	3192	78617	0,04060191	1,763924086



La combinaison des cartes thématiques avec la carte d'inventaire des glissements de terrain dans ArcGIS permet de calculer le nombre de pixel du glissement de terrain dans chaque classe. La méthode de valeur de l'information nous a permis de calculer le poids de chaque classe (tableau 2). Les résultats positifs et négatifs de l'ISG signifient que les valeurs les plus élevées indiquent une grande possibilité de glisser. L'INS final calculé, les valeurs de la zone d'étude vont de -11,98 à 7,53. La carte LSI a été classée en cinq classes en utilisant la méthode des ruptures 'Jenks' ; (très faible : 19,12%, faible : 33,3%, modérée : 24,46%, élevée : 18,34% et très élevée : 4,75%)

### Résultat de combinaison entre cartes

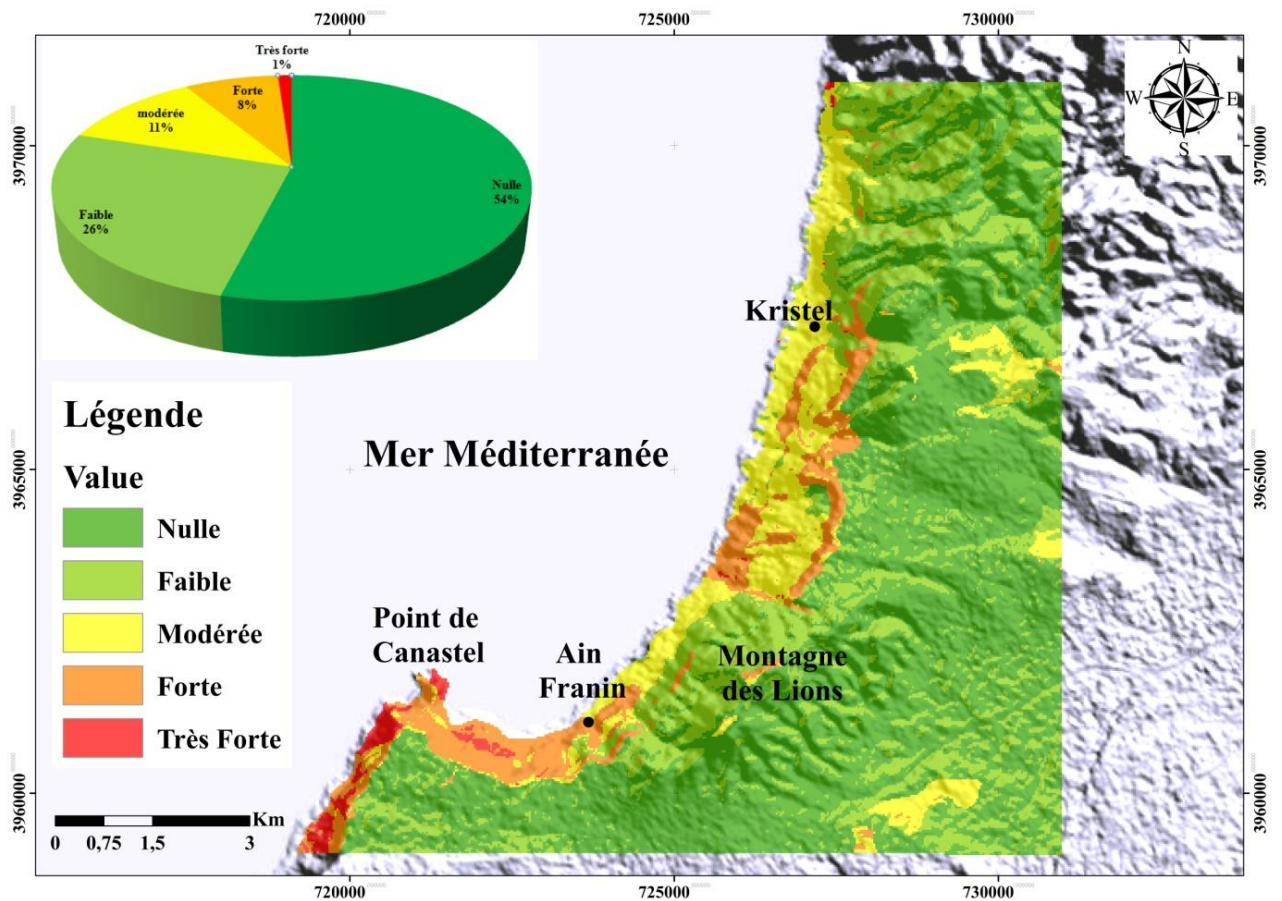


Figure- 11 : Carte de la susceptibilité aux glissements de terrain

#### 6.4 Validation de l'Analyse :

Le processus de validation des résultats comprend deux méthodes statistiques qui sont utilisés pour évaluer les performances du processus 'LSM'. Ces méthodes concerneront la courbe 'ROC' et celle des 'SCAI' qui sont basées notamment sur la combinaison de la carte de susceptibilité obtenue avec la carte d'inventaire des glissements de terrain. On doit rappeler que la comparaison se réalise via 30% des glissements de terrain avec les processus des 'LSM(s)'. La valeur de l'ASC était de : 85,57%, pour le modèle FR, et de : 89,03% pour le modèle IV. En comparant les résultats obtenus de l'aire située sous-courbe pour les deux modèles indiquent que l'utilisation de la valeur informative 'VI' du zonage de la susceptibilité aux glissements de terrains permet d'obtenir des informations plus précises que celle données par le modèle de rapport des fréquences (RF).

Une deuxième solution, menée à la base de la méthode dite SCAI a été proposée pour comparer les résultats des deux méthodes des LSM(s). A savoir que la méthode 'SCAI' a été initiée par les auteurs Suzen et Doyuran (2004) qui la considèrent comme étant un outil de validation des cartes de susceptibilité aux glissements de terrains. Notons que l'évaluation du 'SCAI', s'effectue à la faveur du 'ratio' donné par l'équation (4) :

$$SCAI = \frac{SAP}{LP} \dots\dots\dots (4)$$

Où, SAP sont les pourcentages de susceptibilité et LP est le pourcentage de glissement de terrain. Selon le tableau-3, les classes de catégorie 'très élevée' et 'élevée' sont contenus la norme du SCAI minimal, quant aux 'faibles' catégories et les classes 'très basse' comporteront la valeur maximale des 'SACI'. Les résultats obtenus de cette méthode (SCAI) confirme que la méthode 'IV' est toujours plus performante que celle de 'RF'.

**Tableau- 3** : la densité des glissements de terrain versus les classes de la susceptibilité

Model	FR			IV		
	Zone%	Seed (%)	SCAI	Area(%)	Seed (%)	SCAI
Très faible	39,07	2,01	19,44	19.12	0.27	70.81
Faible	31,46	2,5	12,58	33.31	2.08	16.01
Modérée	19,8	3,33	5,95	24.46	4.80	5.09
Forte	4,72	5,7	0,83	18.34	1068	1.71
Très forte	4,93	86,44	0,06	4.75	82.15	0.05

## 7. Conclusion sur l'approche envisagé

Le risque géologique, lié aux glissements de terrain, présente un fort danger pour le secteur socio-économique des régions dans la partie Nord de l'Algérie ; Cependant, les enquêtes sur le problème des glissements de terrain en Algérie qui ont déjà publié des rares et des dispersions. Dans la littérature récente, quelques tentatives de glissement de terrain ont été appliquées dans le Nord-Est d'Algérie. La présente étude a confirmé que le nord-ouest de l'Algérie soufflé également de problème de mouvement de terrain. La région sélective n'a pas d'études préalables, de cartes et de documents pour la définition des zones sujette aux glissements de terrain et atténuer les conséquences des glissements de terrain. Article de Cet, une carte de susceptibilité aux glissements de terrain du secteur de Canastel (Kristel), au nord-ouest de l'Algérie, dit établi. Les méthodes FR et VI ont été utilisées pour la relation entre les glissements de terrain dans l'espace la distribution et les facteurs de prédisposition. Les résultats de l'ASC utilisant la courbe ROC : l'utilisation du modèle de valeur de l'information (89,03 %) pour les établies 85,57 % des prévisions plus précises en comparaison avec le rapport de fréquence. En revanche, les résultats du modèle de l'indice de la zone des cellules de semence (SCAI), a également confirmé que la carte susceptibilité aux glissements de terrain élu par la valeur d'information est plus prévisible que l'autre modèle utilisé dans ce travail. La cartographie sensible aux glissements de terrain pour le secteur de Kristel peut être évaluée par l'utilisation d'autres modèles et il peut être développé par la combinaison de nombres autres donnés. Les modèles proposés à titre d'expériences peut être considérés comme un outil vigoureux pour les décideurs afin de réviser le PDAU (Plan Directeur de Planification et de Développement). En outre, ce document peut servir aux communautés locaux à les considérer comme des plans de choix des emplacements appropriés pour les projets futurs ainsi de prendre des mesures préventives des zones sujettes aux glissements de terrains (classes susceptibles aux mouvements forts à très forts).



## Chapitre - II : Etude comparative entre les secteurs : Canastel-Kristel et de Taфраoui

### 1. Secteurs de 'Canastel-Kristel' :

La position littorale, située au fond d'une baie réduite (golfe), à 18 km environ au nord-est de la ville d'Oran, abritée à l'est par le Djebel Bou-Aïchem (450 m). Avant d'atteindre le village de Kristel le regard découvre, en venant d'Oran, un paysage de falaises marines, bordant un lieu-dit « Crique des Pêcheurs » toujours fréquenté et une zone intérieure, délimités du sud au nord par l'aval et le débouché des oueds de Djebel 'El-Khaar' où deux formations anciennes sont incluses. Du haut en bas on distingue deux formations :

- a) - Une formation d'origine continentale. Elle est située à 2 ou 3 mètres sous le sommet de la ligne des falaises, qui est indurée, rubéfiée, à faciès argilo-sableux qui contient des coquilles d'Helix ; identifiée lors de la cartographie du niveau 'q3d' sur la feuille géologique d'Arzew, dressée par Y. Gourinard (1952). Son intérêt stratigraphique est pour dater l'horizon Paléolithique attribué à l'Atériens. Ce faciès a été reconnu par F.-E. Roubet (1955). Son identification repose sur la présence de pierres taillées lithiques et de débris de fruits de mer, à Patelles ferrugineuses des coquilles. Rappelons que ces témoins 'Atériens' sont rares, non encore bien datés, et qu'ils remontaient à une période du 'paléo lithique' d'âge Pléistocène ; comprise entre t: 40.000 et t:30.000 (BP).
  
- b) - Une formation d'origine marine. Située à des niveaux inférieurs, au ras de l'eau, très indurée, et se compose de diverses formes de coquilles, typiques d'un niveau du Tyrrhénien à conglomérat. Son identification est effectuée par le principe de continuité latérale. En effet, c'est grâce à la présence du genre Strombus bubonius et d'autres coquilles du cortège de malacophage ; contenu dans la plage indurée du gisement du Camp 'Franchet - Esperey' sise au voisinage d'Arzew, Camps (1954) in cartographie de Y. Gourinard (1952) : noté 'q3m' où cette formation marine de Kristel a été attribuée à ce niveau indexé Quaternaire-marin ; in F.-E. Roubet (1955). On se focalisant sur le site de Kristel et précisément sur les affleurements épi-paléolithiques de 'Bou-Aïchem' et oued-Chichoun ; proche du village. La stratigraphie de ce territoire a attiré l'attention des géologues du Quaternaire.

Dans une brève description, on distingue d'Est en Ouest et du haut des falaises jusqu'au niveau de la mer plusieurs niveaux :

- un niveau rocheux de piémont, entaillé par l'oued 'El-Mâa', masqué par un placage de garrigue (maquis).

- un niveau dunaire, aux dépôts métriques (1-3 m) plaqués sur ce piémont, stabilisés par une végétation actuelle basse à plusieurs genres : 'Juniperus Phoenicea', 'J. oxycedrus L.', 'Pistacia lentiscus', 'Chamaerops humilis' et 'Frankenia corymbosa'.

Ces dépôts renferment plusieurs foyers épipaléolithiques dispersés, reconnus par F. Doumergue dès 1910 (1919, 1936), étudiés ensuite par Ch. Goetz et J. Tailliet (1940, 1943), Ch. Goetz (1967) et par F.-E. Roubet (1946-1968) ; les auteurs ont retenu pour ce site préhistorique la dénomination de foyers épipaléolithiques de Bou-Aïchem ;

- un niveau d'encroûtement calcaire (0,10-0,20 m) servant par endroit d'assise à ces foyers ;

- un secteur de falaises vives et d'éboulis (de 20 m de puissance), formant le rivage actuel.

## **2. Secteur de Tafraoui**

Le secteur de Tafraoui, sise en zone sub tellienne, jalonne la partie septentrionale des monts de Tessala ; orienté NNE-SSE qui est formé de deux unités structurales : un substratum secondaire et d'une couverture tertiaire.

### **a) - *Le substratum***

Le substratum de la zone de Tafraoui est d'âge secondaire. Il est principalement schisteux et plissé. Il affleure surtout le long de l'oued-Tafraoui en forme des blocs plus ou moins durs dans lesquels la schistosité semble verticale. Dans l'oued-Tafraoui, on peut distinguer trois niveaux de schistes à lithologie et aspect variés in Mekahli (1978) en bas et en haut, où on peut observer :

- Des schistes à quelques niveaux calcaireux ;
- Des schistes sans niveau de calcaires ;
- Des schistes à des niveaux de calcaires plus abondants.

## **b) - La couverture tertiaire**

La couverture du massif de Tafraoui est constituée de diverses formations d'âge tertiaire à quaternaire. Elle comprend :

### ➤ **Une formation conglomératique rouge**

Cette formation est d'âge Miocène qui repose en discordance sur un socle schisteux et fortement plissé. Le matériel de cette couverture est surtout détritique qui affleure sur les pentes du talus représenté essentiellement par deux niveaux conglomératiques à grano classement +, séparées le plus souvent par un niveau cinéritique de couleur gris-bleuâtre. Cette formation conglomératique est formée d'éléments anguleux hétérométriques et de nature poly géniques

### ➤ **Une couche de marnes bleues**

Elle repose en discordance angulaire sur les formations sous-jacentes. Elles sont de couleur bleu grisâtre riche en microfaunes. Elles débutent, en quelque endroit, par des conglomérats à base ravinant.

### ➤ **Une couche de marnes jaunes**

Elle est de nature plastique et gréseuses correspondant à une formation à faciès marno-gréseux de couleur jaune ; au sein de laquelle on peut distinguer de passage latéral du faciès à deux sous-faciès :

- un sous-faciès gréseux formé de banc de grès à ciment calcaire, d'épaisseur variable, montrant une alternance de quelque banc sombre plus ou moins sableux. Les coquilles d'échinodermes et de lamellibranches sont très mal conservées dans ces grès ;
- un sous-faciès marno-calcaire correspondant à une formation de calcaires à algues, de couleur jaune blanchâtre, associés à des marnes jaunes. Les niveaux de calcaires sont indurés et compacts, des niveaux marneux sont plus importants dans cette formation. Dans les marnes, on peut reconnaître quelques fossiles de gastéropode ou d'échinodermes.

### **Chapitre- III. Synthèse et perspectives**

Les mouvements de terrain dans les zones montagneuses causent d'énormes pertes matérielles et de vie humaines chaque année. Vu la position géographique du secteur de Kristel qui réjouit d'un stratège touristique plus qu'autres, il est cerné malheureusement par plusieurs aléas dont le risque d'éboulement et de glissement gravitaire sont spectaculaires (zone-falaises) ne font que aggraver la situation en cette zone fréquentée par le trafic des passagers qui embarrassante l'agglomération du village de Kristel. Sachant que les aléas sont redoutables et omniprésents 'in-situ', le seul issu pour y remédier ce risque potentiel sera focalisé sur la seconde variante de vulnérabilité des terrains en discernant les approches d'établissement de cartes préventives relatives à la cartographie de susceptibilité aux glissements de terrains. En effet, pour cette étude, de nombreux facteurs de prédisposition aux glissements gravitaires ont été développés à la base de données thématiques tabulées et cartographiées sous l'environnement 'SIG'. La préparation et l'échantillonnage des facteurs intrinsèques au glissement de terrain a nécessité d'utiliser plusieurs sources d'information numériques et cadastrales (raster) permettant de cerner un modèle de résolution algébrique propre à l'état d'instabilité du secteur de Kristel. L'introduction de cinq facteurs prédictifs à l'instabilité des versant été nécessaire pouvoir appliquer l'algorithme d'une équation polynomiale qui favorise la solution des coefficients de l'indice de fragilisation de terrain (susceptibilité). Cet indice 'ISGT' porte une signification préventive qui regroupe la combinaison des 05 facteurs prédictifs : qui sont respectivement : (la pente-talus, l'orientation des reliefs 'aspect-pentes', la nature du faciès géologique, la densité de fracturation et la distance par rapport aux cours d'eaux. En effet, les différentes unités géo morphologiques existantes se caractérisent par la présence des falaises abruptes sur des versants raides des monts de Kristel-Arzew. Le climat du secteur comprend deux variétés ; humide (méditerranéen) à semi-aride au niveau culminants. Le réseau hydrographique étant peu développé mais d'un épandage excessif favorise un ruissèlement bref et torrentiel ; conformément à la topographie du secteur selon un écoulement directionnel vers la mer. Il est à noter que cette étude utilise le système d'information géographique sous l'égide des programmes d'ArcGIS pour englober une somme d'opérations géo spatiales gouvernées par le processeur d'image qui facilite le traitement des données pour obtenir des résultats rapides et précises. Cet outil informatique a été investi suivant plusieurs étapes de réalisation de cartes thématiques et pour l'établissement de la carte de synthèse dite 'susceptibilité' aux glissements de terrains. La base de données utilisée est assez riche en information, qui a permis de

confectionner plusieurs cartes thématiques dites (variables explicatives) pour résoudre la susceptibilité aux glissements ; dite (variable expliquée) via l'algorithme de calcul algébrique emboîté dans les programmes du logiciel cartographique.

Cette approche simple et pratique a servi pour d'épargner beaucoup de temps pour sélectionner les zones instables du secteur connu par sa diversité de ces terrains entre formations Secondaires tectonisées et métamorphosées et des couches détritiques et plastiques d'âge tertiaire. Selon les cartes géologiques, plusieurs unités structurales sont encadrées par d'importants accidents cartographiables et masquées (apparentes). Elles jouent le rôle de segmentation des reliefs oranais où d'est en ouest on distingue les anciens reliefs de Kristel (Borosse & Orousse), l'entité carbonatée Djebel El- Khaar et l'unité para-autochtone calcaro-schisteuse tronquée par l'effet d'érosion intense. Ce paysage de falaises abruptes (impressionnantes) sont essentiellement formées par les schistes qui caractérisent une structure de socle ; émergeant sous l'effet d'une surrection épirogénique profonde ; dernièrement déduite par les travaux géodésiques (CTS) sur la région intéressant les segments de reliefs 'Murdjadjo' et de 'Kristel'. Quant à la composante de couverture elle est de nature plastique 'marneuses' formant ainsi une semelle de gisements qui affleure à plusieurs endroits sur le long de la côte oranaise : à 'Canastel', 'Ain-Franine' et à 'Kristel'. L'utilisation de plusieurs documents sont jugés utiles pour pouvoir estimer l'état d'instabilité des terrains. Ces documents se distinguent en leur aptitude de résolution spatiales et spectrales tels que le modèle numérique de terrain, l'imagerie satellitaire, les coupures de cartes géo morphologiques, photos aériennes et les enquêtes sur site réalisés lors de plusieurs sorties sur terrain.

- Comme perspectives on songe que cette approche vient d'approuver, une fois que l'hypothèse de départ étant vérifiée, que la cartographie de vulnérabilité est réalisée d'abord par la machine (informatique) puis vérifiée par les données multi-sources en connaissance de causes telles que la pétrographie, la structurale et l'hydrogéologie. Revenant sur l'outil de planification des projets à perspective lointaine et à des échelles bien variées le travail conséquent sur la vulnérabilité des terrains est souvent bénéfique pour l'état (économie) et pour la population (sécurité). Cependant, il convient de rappeler que les résultats obtenus dans cette étude, sont intéressants et devront être exploités par les services d'aménagement du territoire et par les collectivités locales afin d'envisager de nouvelles lois réglementaires pour la sauvegarde de l'environnement et surtout pour la sécurité de la population. En fin la méthode présentée peut être validée par le biais d'une même combinaison entre les variables prédictives sur des sites et les caractéristiques environnementales prises à différentes échelles.

### **Références et bibliographie :**

- Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., Bendaoud, EA. (2017). - Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 10:194.
- Aghdam, IN., Varzandeh, MHM., Pradhan B. (2016).- Landslide susceptibility mapping using an ensemble statistical index (Wi) and adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model at Alborz Mountains (Iran). *Environmental Earth Sciences* 75:553.
- Akgun, A., Dag, S., Bulut, F. (2008).- Landslide susceptibility mapping for a landslide-prone area (Findikli, NE of Turkey) by likelihood-frequency ratio and weighted linear combination models. *Environmental geology* 54:1127-1143.
- Beneder. (2011). Carte d'occupation du sol wilaya d'Oran notice explicative. Bureau national d'études pour le développement rural, Rapport inédite, 13p.
- 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.
- Ciszak, R. (1993). Evolution géodynamique de la chaîne tellienne en Oranie (Algérie occidentale) pendant le Paléozoïque et le Mésozoïque vol 20. Laboratoire de géologie sédimentaire et paléontologie, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 513p.
- Corominas, J., Van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulou, S., Catani, F., Van DenEckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Herva's, J., Smith, J.T., (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 73, 209–263.
- Gorsevski, PV., Jankowski, P., Gessler, PE. (2006 c). An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. *Control and Cybernetics* 35:121-146.
- Gourinard, Y. (1952 a). Carte géologique détaillée de l'Algérie. Feuille Arzew (127) 2ème édition, Serv. Carte Géol. Alger, Algérie.

Gourinard, Y. (1952 b). Carte géologique détaillée de l'Algérie. Feuille Oran (159) 2ème édition, Serv. Carte Géol, Alger, Algérie.

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. *Engineering Geology* 102:85-98.

Gourinard, Y. (1952 a).- Carte géologique détaillée de l'Algérie. Feuille Arzew n°127/ 2ème édition, Serv. Carte Géol. Alger, Algérie.

Hadji, R., Boumazbeur, A., Limani, Y., Baghem, M., el Madjid Chouabi, A., Demdoun, A. (2013).- Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria. *Quaternary International* 302:224-237.

Hadji, R., Limani, Y., Demdoun, A. (2014).- Using multivariate approach and GIS applications to predict slope instability hazard case study of Machrouha municipality, NE Algeria. In : *Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)*, 1st International Conference on, 2014. IEEE, pp 1-10.

Hadji, R., Rais, K., Gadri, L., Chouabi, A., Hamed, Y. (2017).- Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale : a case study from Ouled Driss and Machrouha municipalities, Northeast Algeria. *Arabian Journal for Science and Engineering* 42 :281-300.

Lee, S., Talib, JA. (2005). Probabilistic landslide susceptibility and factor effect analysis *Environmental geology* 47:982-990

Mahdadi, F., Boumezbeur, A., Hadji, R., Kanungo, DP., Zahri, F. (2018). GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences* 11:476.

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.

Pourghasemi, H., Moradi, H., Aghda, SF. (2013a).- Landslide susceptibility mapping by binary logistic regression, analytical hierarchy process, and statistical index models and assessment of their performances. *Natural Hazards* 69:749-779.

Pradhan, B. (2011). Manifestation of an advanced fuzzy logic model coupled with Geo-information techniques to landslide susceptibility mapping and their comparison with logistic regression modeling. *Environmental and Ecological Statistics* 18:471-493.

Pradhan, B., Jebur, MN., Abdullahi, S. (2017).- Spatial Prediction of Landslides Along Jalan Kota in Bandar Seri Begawan (Brunei) Using Airborne LiDAR Data and Support Vector Machine. *Laser Scanning Applications in Landslide Assessment*. Springer, pp 167-178.

Raja, NB., Çiçek, I., Türkoğlu, N., Aydın, O., Kawasaki, A. (2017).- Landslide susceptibility mapping of the Sera River Basin using logistic regression model. *Natural Hazards* 85:1323-1346.

Regmi, NR., Giardino, JR., Vitek, JD. (2010).- Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA. *Geomorphology* 115:172-187.

Süzen, M., Doyuran, V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. *Environmental geology* 45:665-679.

Thiery, Y. (2007). Susceptibilité du Bassin de Barcelonnette (Alpes du Sud, France) aux mouvements de versant': cartographie morphodynamique, analyse spatiale et modélisation probabiliste. Thèse de doctorat, Université de Caen, 445p.

Van Westen, CJ. (1993).- Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. ITC Publication, Vol.15. International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, Enschede 245pp.

Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A., Yomralioglu, T. (2011).- A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena* 85:274-287.

Youssef, AM., Al-Kathery, M., Pradhan, B. (2015).- Landslide susceptibility mapping at Al-Hasher area, Jizan (Saudi Arabia) using GIS-based frequency ratio and index of entropy models. *Geosciences Journal* 19:113-134.



## **LA LISTE DES FIGURES**

FIGURE 1 : approche méthodologique préconisé (théorie de l'évidence)

FIGURE 2 : carte des formations lithologiques.

FIGURE 3 : carte d'inventaire des glissements de terrains.

FIGURE 4 : image de quelque exemple de glissement de terrain dans la zone d'étude.

FIGURE 5 : carte des pentes.

FIGURE 6 : carte d'orientation (exposition) des pentes.

FIGURE 7 : carte de distance de proximité aux cours d'eau.

FIGURE 8 : la carte d'altitude

FIGURE 9 : la carte de la fracturation potentielle.

FIGURE 10 : carte de la susceptibilité aux glissements de terrain

FIGURE 11 : résultat de la carte de susceptibilité de glissement de terrain.

## **LISTE DES TABLEAUX**

TABLEAU -1 : source d'information des facteurs utilisés.

TABLEAU -2 : technique de calcul de rapport de fréquence pour chaque classe des paramètres intégré dans cette étude.

TABLEAU -3 : la densité des glissements de terrain versus les classes de la susceptibilité de terrain.