

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed



Faculté des Sciences de la Terre et l'Univers

Département de Géologie

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du grade de master en Science de la Terre et d'Univers

Option : Risques géologiques

L'étude de l'instabilité des terrains sub tellien Nord West de la zone d'Elchourfa par approche géostatistique FR, WOE et AHP.

Présenté par le binôme :

Mr. **Malki El haouari Zouhir** & M^{lle}. **Sara Belhadj**

Soutenu le 28 septembre 2022 devant le Jury composé de :

M ^m Ablaoui Halima	Enseignante à l'université Oran 2	Présidente
Mr Foukreche Mohamed	Enseignant à l'université Oran 2	Examineur
Mr Nadji Abdelmansour	Enseignant à l'université Oran 2	Rapporteur
Mr Roukh Zine El Abidine		Co encadrant

Dédicace

A celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation et de ses dévouements

A ma chère mère

A celui qui s'est changé la nuit en jour pour m'assurer les bonnes conditions

A mon chère père

A ma petite famille qui m'a toujours soutenue et à mon cher binôme Sara Belhadj

A mes amis Mohamed Chellabe et Walide Zache

A tous mes collègues et amis

Je dédie ce modeste travail

Malki El Houari Zouhir

Dédicace

Je dédie ce mémoire à ma mère qui m'a encouragée à aller de l'avant et qui m'a donnée tout son amour pour reprendre mes études.

A mon père qui nous a quittés voilà dix-neuf ans, dieu accorde la paix à son âme.

A ma petite famille qui m'a toujours soutenue et à mon cher binôme Malki El Houari Zouhir pour son entente et sa sympathie.

A mes meilleures amies Nanas et Fatima Mestfaoui qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès

A tous mes amis de promotion de 2eme année master risques géologiques et Gestion, et toute personne qui occupe une place dans mon cœur

Je dédie ce travail à tous ceux qui ont participé à ma réussite.

Sara Belhadj

Remerciement

Nous remercions tout d'abord ALLAH le tout puissant pour nous avoir donné la force, la santé, et la patience pour arriver là où nous sommes

A l'issue de ce travail, il nous est agréable d'adresser nos remerciements à tous ceux qui ont contribué, à ce qu'il prenne forme, et s'achève en ayant atteint les objectifs tracés et ces quelques phrases ne sont pas suffisantes pour exprimer notre gratitude et reconnaissance

Ainsi c'est à Monsieur Roukh Zin Abidine que nous devons en tout premier lieu notre reconnaissance. Il a dirigé magistralement la mise en œuvre des différentes étapes du travail, un grand merci à monsieur Nadji nous avons bénéficié de leurs très grande expérience, de leurs remarques avisées et toujours pertinentes. Nous remercions les membres du jury Mme Ablaoui Halima et Mr Foukrache Mohamed qui ont bien voulu accepter d'examiner ce mémoire et à cet égard nous leur présentons nos profonds respects, et notre grande gratitude.

Nous rendons grâce à tous les enseignants du département de géologie qui nous ont suivis durant notre cursus.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Merci à tout le monde pour tout.

Liste des matières

Dédicace	3
Dédicace	4
Remerciement.....	5
Liste des matières.....	6
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	11
Résumé	12
Summary	13
Introduction générale.....	14
Introduction générale :	1
Chapitre I	4
I.1 Situation géographique de la zone d'étude.....	5
I.2 Cadre géologique général.....	7
I.2.1 Géologie du secteur d'étude.....	9
I.2.2 Litho-stratigraphie	10
I.3 Cadre géomorphologique.....	12
I.4 Caractéristiques hydrologique.....	13
I.5 Cadre climatique.....	14
I.5.1 Aperçu général sur le climat de la région d'étude	14
I.5.2 Etude des précipitations	14
I.5.2.1. Précipitations moyennes mensuelles.....	14
I.5.2.2. Précipitations saisonnières	15
I.6 Etude des températures	17
I.6.1 Relation température précipitation.....	18
I.7 Sismicité de la zone d'étude	20
Conclusion.....	20
Chapitre II	21
II.1 Introduction.....	22

II.2	Mouvements et instabilités de terrain	22
II.2.1	Définition	22
II.2.2	Classification des mouvements de terrain.....	22
II.2.3	Typologie des mouvements de terrain	23
II.2.3.1.	Mouvements lents et continus	23
II.2.3.2.	Mouvements à risque géologique (discontinus)	27
II.3	Glissements de terrain.....	30
II.3.1	Morphologie des glissements de terrain.....	30
II.3.2	Types des glissements de terrain	32
II.3.3	Principaux causes des glissements de terrain	33
II.3.4	Dynamique des glissements de terrain	35
II.3.5	Classification des glissements de terrain	36
II.3.6	Conséquences des glissements de terrain	38
	Conclusion	38

Chapitre III..... 39

III.1	Introduction	40
III.2	Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain	40
III.2.1	Les approches dans le contexte quantitatif :	41
III.2.2	Les méthodes quantitatives	42
III.2.3	Les méthodes probabilistes	43
III.3	Cartographie de l’inventaire des mouvements de terrain.....	44
	Conclusion	45

Chapitre IV..... 46

IV.1	Introduction	47
IV.2	Méthodes et technique d’inventaire des glissements de terrain	47
IV.2.1	Acquisition de l’information avec Google Earth	47
IV.2.2	Approches GPS disponibles.....	48
IV.2.3	L’inventaire par L’apport de la télédétection : L’utilisation de la télédétection optique pour l’analyse des mouvements de terrain	48
IV.2.3.1	La localisation et l’inventaire	49
IV.2.3.2	Caractérisation	52
IV.2.3.3	Les caractéristique et paramétrage de la déformation de terrain.....	53
IV.3	Processus d’étude d’un glissement de terrain.....	53
IV.3.1	Repérage topographique d’une zone instable.....	53
IV.3.2	L’enquête historique.....	54
IV.3.3	Etude géologique et géomorphologique	54
IV.4	Les factures de prédispositions.....	55
IV.4.1	L’occupation du sol	56
IV.4.2	La pente	56

IV.4.3	Lithologie.....	56
IV.4.4	L'hygrométrie.....	57
IV.4.5	L'exploitation humaine	57
	Conclusion :	57

Chapitre V..... 59

V.1	Inventaire des glissements de terrain.....	60
V.2	Les facteurs causatifs des glissements de terrain	62
V.2.1	La pente	63
V.2.2	Lithologie	63
V.2.3	Précipitations	64
V.2.4	Distance par rapport au cours d'eau	65
V.2.5	Occupation des sols	66
V.2.6	L'altitude	67
V.3	Données paramétriques de la zone d'étude :.....	68
V.4	Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain et interprétations des résultats	69
V.5	Les méthodes statistiques	72
V.5.1	La méthode statistique de rapport de fréquence (RF).....	72
V.5.2	La méthode statistique AHP (Analytical hierarchy process)	72
V.5.3	La théorie de l'évidence (WOE)	73
V.5.4	Analyse Hiérarchique des procédés (AHP).....	73
V.6	Interprétation des résultats	76

Conclusion générale 81

	Conclusion générale	82
--	---------------------------	----

Bibliographie 83

	SOURCES:	87
	CARTES:	87
	Liste des sites web.....	87

Liste des figures

Figure 1: situation géographique du secteur d'étude (Kheloufi, A 2021).	6
Figure 2: Carte géologique d'Algérie d'après (M.G. Bétier, 1952), aperçu sur le secteur d'étude.	8
Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude.	9
Figure 4: Carte de localisation des coupes de secteur étudiant, (Neurdin, 1992).....	10
Figure 5: Coupe géologique S-N route Sig d'après (Neurdin, 1992).	11
Figure 6: Carte géomorphologie de la zone d'étude.	12
Figure 7: Carte schématique montre les différents aspects hydrologiques.	13
Figure 8: Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT (Période 2011-2020).	15
Figure 9: Précipitations saisonnières (Période 2011-2020).	16
Figure 10: Précipitations moyennes annuelles (Station du Barrage Chorfa (II) ANBT, Période 2011-2020).	17
Figure 11: Températures moyennes mensuelles (Station du Barrage Chorfa (II) ANBT, (Période 2011-2020).	18
Figure 12: Courbe Ombro-thermique de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.	19
Figure 13: les principaux traits structuraux selon Thomas 1985 et les séismes significatives survenus dans la région Nord Occidental de l'Algérie (in Belayadi et all 2016).	20
Figure 14: Les affaissements, (Beltas R. et Medjider R 2021).	24
Figure 15: Phénomène de tassement par retrait et gonflement pour un site plastique, (Beltas R. et Medjider R 2021).....	25
Figure 16: Exemple de fluage, (Beltas R. et Medjider R 2021)	26
Figure 17: Phénomène de solifluxion, (Beltas R. et Medjider R 2021).....	26
Figure 18: Le phénomène d'effondrement, (Beltas R. et Medjider R 2021).....	27
Figure 19: Différents types de chutes de bloc : a) éboulisation ; b) éboulement (< 100 m ³) ; c) écroulement (> 100 m ³) ; d) basculement ; e) glissement. Modifié de Highland, 2004.....	28
Figure 20: Phénomène de coulée boueuse, (Oukil C. et Bouchiba M.A, 2019).....	29
Figure 21: Morphologie générale d'un glissement de terrain, (Beltas R. et Medjider R, 2021).....	31
Figure 22: Les différents types de glissements de terrain, (Beltas R. et Medjider R 2021)	33
Figure 23: La dynamique d'un glissement de terrain.	36
Figure 24: Exemple de quelque glissement de terrain recensé, (1) localisation des glissements de terrain (a) glissement rotationnel, (b) glissement rotationnel, (c) glissement transnational, (d) glissement transnational, (e) basculement, (f) glissement complexe, (g) éboulement.	61

Figure 25: Carte des pentes de la zone d'étude.....	63
Figure 26: Carte d'occupation de sol de secteur d'étude.	67
Figure 27: carte hypsométrique de la zone d'étude.....	68
Figure 28: Carte de susceptibilité réaliser par la méthode rapport de fréquence.....	70
Figure 29: Carte susceptibilité réalisé par la méthode Weight of evidence.....	70
Figure 30: Carte susceptibilité réalisé par la méthode d'Analyse hiérarchique.	71
Figure 31 : Utilisation du module AHP sur Arc GIS.....	75

Liste des tableaux

Tableau 1: les coordonnées du secteur étudié.....	5
Tableau 2: Localisation géographiques de station climatique du Barrage Chorfa (II) ANBT.....	14
Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.....	15
Tableau 4: Précipitations saisonnières de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.....	16
Tableau 5: Précipitations moyennes annuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.....	17
Tableau 6: Températures moyennes mensuelles maximales (M), minimales (m) et moyennes (2011-2020) de la station du Barrage Chorfa (II) ANB.....	18
Tableau 7: Précipitations et températures moyennes mensuelles.....	19
Tableau 8: Classification des mouvements de terrain (Varne .D.J, 1978).	30
Tableau 9: La classification de glissement de terrain. Selon la vitesse.	37
Tableau 10: Classes de vitesses définies par Varnes (1978).	37
Tableau 11: La classification de glissement de terrain. Selon la profondeur, Office l'environnement Division Prévention des dangers, 2009.....	38
Tableau 12: Source des données du secteur d'étude.	69
Tableau 13: Echelle de comparaison.	74
Tableau 14: Indice Aléatoire (IA).....	75
Tableau 15: Pondération de chaque classe des paramètres utilisés dans cette étude basée sur la méthode statistique racio de fréquence, la théorie de l'évidence et AHP	79

Résumé

L'étude de l'instabilité des terrains en zones accidentées sub telliennes de la Wilaya d'Oran a connu ces dernières années un retentissement notable envers la communauté scientifique et les collectivités locales pour mieux cerner les paramètres intrinsèques d'une prévention contre les mouvements de terrain et de planifier le plan de prévention régional des glissements de terrain (PPRG). Comme le secteur d'El chorfa se situe sur les versants septentrionaux des chainons sub-telliens du faisceau 'Tessala- Oulad Ali' souvent exposé aux manifestations séismiques, l'établissement de la cartographie de susceptibilité aux glissements de terrain devient ainsi nécessaire. Dans cette étendue de terrains où se croisaient plusieurs contraintes naturelles pour engendrer un écosystème vulnérable à plusieurs paramètres causatifs des glissements de terrain qui font l'objet de cette modeste recherche sur le risque géologique et ces répercussions sur l'environnement; en l'occurrence la composante hydrique du barrage d'El chorfa. Vue sa position de piedmonts des reliefs et l'assistance des changements de faciès entre les terrains sédimentaires et métamorphiques, la densité du chevelu hydrographique, les variations climatiques à potentiel d'érosion notable additivement aux sollicitations des tremblements de terre plus ou moins modérées l'état de consistance de ces terrains ne peut être qualifiée de zone stable.

L'objectif de notre travail est focalisé sur la résolution géo spatiale de ces différents paramètres, par l'utilisation des approches statistiques sous l'environnement de SIG. Une première ébauche de notre travail intéressait l'établissement d'un inventaire des glissements de terrain lors des sorties sur sites pour distinguer le type et l'ampleur du phénomène envisagé. Une seconde phase est consacrée surtout au travail géomatique dont nous avons apprécié, sous l'encadrement de nos enseignants ; notamment les résultats obtenus par le logiciel Arc Gis (V. 10.8)

A ce stade de réalisation de cartes thématiques, la carte de synthèse (susceptibilité) du secteur d'Elchorfa a fait l'objet de l'application de plusieurs approches statistiques telles que : Ratio de Fréquence (RF), la Théorie de l'Evidence (WOE) et la méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) qui ont donné le meilleur classement des poids des différents paramètres introduits dans cette étude multicritère. L'utilisation des équations algébriques, sous l'environnement SIG, nous a permis de calculer l'Indice Global de la Susceptibilité (IGS) pour chaque méthode statistique utilisée. Une attribution qualitative en nombre de cinq catégories de susceptibilité a été imposée pour distinguer les zones faibles à très faible des modérées, des zones fortes à assez forte vulnérabilité.

Mots Clés : Secteur d'Elchorfa; susceptibilité aux glissements de terrain; Cartographie thématique de l'indice global de susceptibilité (IGS); SIG; RF; WOE et AHP approche statistique.

Summary

The study of land instability in rugged sub-Tellian areas of the Wilaya of Oran has experienced in recent years a notable impact on the scientific community and local communities to better identify the intrinsic parameters of prevention against land movements and plan the regional prevention plan of landslides (PPRG). As the area of El Chorfa is located on the northern slopes of the sub-tellurian chains of the beam

'Tessala- Oulad Ali' often exposed to seismic events, the establishment of the mapping of susceptibility to landslides becomes necessary. In this area of land where several natural constraints crossed to generate an ecosystem vulnerable to several causative parameters of landslides that are the subject of this modest research on the geological risk and its repercussions on the environment, in this case the water component of the dam El Chorfa. Considering its position of piedmonts of the reliefs and the assistance of the changes of facies between the sedimentary and metamorphic grounds, the density of the hydrographic network, the climatic variations with potential of notable erosion additive to the solicitations of the more or less moderate earthquakes the state of consistency of these grounds cannot be qualified as stable zone.

The objective of our work is focused on the geo-spatial resolution of these different parameters, by using statistical approaches under the GIS environment. A first draft of our work was interested in the establishment of an inventory of landslides during field trips to distinguish the type and extent of the phenomenon considered. A second phase is devoted especially to the geomatic work of which we appreciated, under the supervision of our teachers; in particular the results obtained by the software Arc Gis (V. 10.8)

At this stage of realization of thematic maps, the map of synthesis (susceptibility) of the sector of El Chorfa

El chorfa sector has been the subject of the application of several statistical approaches such as: Ratio of

Frequency Ratio (FR), the Theory of Evidence (WOE) and the method of Hierarchical Process Analysis (HPA) which gave the best ranking of the weights of the different parameters introduced in this multi-criteria study. The use of algebraic equations, under the GIS environment, allowed us to calculate the Global Susceptibility Index (GSI) for each statistical method used. A qualitative attribution in number of five categories of susceptibility was imposed to distinguish the weak to very weak zones from the moderate ones, from the strong to rather strong zones of vulnerability.

Keywords: El chorfa area; landslide susceptibility; Thematic mapping of the global susceptibility index (GSI); GIS; RF; WOE and AHP statistical approach.

Introduction générale

Introduction générale :

Les glissements de terrain sont des phénomènes géodynamiques qui se produisent dans Plusieurs parties du monde et souvent les plus graves sur la surface de la terre. Ils provoquent des Modifications sur le paysage et peuvent détruire des édifices et des constructions et causent parfois des décès. Ces phénomènes se développent dans un massif de sols meubles ou de roches argileuses tendres et se produisent dans des circonstances très variées (Smahi.A, 2015).

Ces mouvements se produisent lors des tremblements de terre (séismes, explosions souterraines ou sous-marines, etc.), et/ou lors des périodes pluvieuses intenses avec des précipitations prolongées, de l'action conjuguée de facteurs géologiques et géomorphologiques divers. Ces phénomènes naturels souvent catastrophiques engendrent des instabilités de terrains et parfois des effondrements de structures se trouvant dans le voisinage immédiat (Ramos1.A et all 2014).

Ce problème constitue actuellement l'une des préoccupations majeure des ingénieurs chargés de la gestion des risques naturels. La susceptibilité représente la prédisposition d'une zone à être touchée par certains phénomènes dangereux, en un temps indéterminé, évaluée à l'aide de critères de prédisposition à ces phénomènes ou actions, sans prendre en compte sa période de retour ou la possibilité de se reproduire (Ramos1.A et all 2014).

Dans littérature, plusieurs méthodes sont utilisées pour cartographier de la susceptibilité aux glissements de terrain, (Chen, W et all 2014) utilisent la méthode statistique valeur informative, la théorie de l'évidence et aussi utilisé pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain (Regmi .N.R, 2010); Lee, S. et Choi, J. 2004.), la méthode AHP est appliquée dans plusieurs partie du monde pour estimer le degré de susceptibilité ainsi que la régression logistique utilisée par (Ohlmaher G.C & Davis J, 2003) pour cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Récemment, et avec le développement scientifique plusieurs chercheurs utilisant différents méthodes statistiques pour cartographie la susceptibilité aux glissements de terrain (Pourghasemi .H & .C, 2012); la comparaison des résultats permettant de choisir le meilleur model pour la région étudié.

En Algérie, quelque tentatives sont publiées récemment contient des études sur les glissements de terrain (Hallal, N et all 2019) (Bouhadad .Y, 2010) (Guemache M.A, 2011) ainsi que la cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain est spécialement dans l'Est du payé (Achour, Y et all 2017) (Hadji, R et all 2013) (Roukh .Z.A & Nadji.A, 2019).

L'objectif de ce travail présenté dans ce mémoire est d'identifier les zones exposées aux glissements de terrain par la cartographie algébrique de la susceptibilité au glissement de terrain de la région d'El chorfa Nord-ouest de l'Algérie par les méthodes statistiques et le système d'information géographique (SIG).

De ce fait notre travail se divise en quatre parties, qui sont les suivantes :

- La première partie est consacrée à l'étude bibliographique, qui est une étude théorique, sur les mouvements de terrain (leurs circonstances, leurs caractéristiques, leurs types et leurs différentes causes) ainsi quelques exemples de glissements dans le monde et en Algérie.
- La deuxième partie contient les différentes méthodes de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain dont on cite l'approche directe qualitative et l'approche indirecte probabiliste qui se divise en plusieurs méthodes d'analyses de la susceptibilité.
- La troisième partie décrit les paramètres d'entrée dans l'évaluation de la susceptibilité qui représente les différentes méthodes et techniques d'inventaire des glissements de terrain et les facteurs de prédisposition environnementale.
- la dernière partie porte une méthodologie adéquate à notre recherche dont la quelle une démarche analytique est appliquée. Premièrement, une présentation de la zone d'étude contient la situation géographique de la zone, la morphologie, les caractéristiques géologique et structurale, hydrologique, climatiques et enfin les caractéristiques sismo tectonique.

Ensuite, l'établissement d'une carte d'inventaire contient la position des glissements de terrain affectant la zone d'étude par différentes techniques on se base sur l'outil informatique et le SIG. Le croisement de la carte d'inventaire avec les facteurs causatifs nous a permis d'établir une analyse statistique de la distribution spatiale de ce phénomène.

Six facteurs sont jugés insuffisants pour évaluer la susceptibilité telle que, la pente, la lithologie, les précipitations, structure, l'occupation du sol et l'altitude.

Une évaluation de l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain est entamée par l'intégration de trois méthodes statistiques couplées avec le SIG. Deux méthodes statistiques quantitatives bien variées dites Ratio de Fréquence (FR) et la théorie de l'évidence (Weight Of Evidence -WOE) sont utilisées pour calculer la pondération de chaque classe des facteurs utilisés, ces techniques sont basées sur le croisement de l'inventaire des glissements de terrain avec les différents facteurs causatifs. Une troisième méthode semi-quantitative dite Analytical Hierarchy

Proces (AHP) basé sur la prise de décision est utilisé pour estimer le poids de chaque paramètre utilisé.

La classification de l'indice global de la susceptibilité permettant d'établir trois cartes de susceptibilité aux glissements de terrain. Le croisement de ces derniers avec celle de l'inventaire de glissement de terrain nous a permis d'entamer une validation et comparaison entre les différentes méthodes utilisées.

Chapitre I

Caractérisation de la zone d'étude

I.1 Situation géographique de la zone d'étude

La commune d'Elchorfa est située à l'ouest de Mascara à la limite avec la wilaya de Sig et Sidi Bel Abbès, à environ 63 Km. Elle s'étend sur une superficie de 222km².

La commune d'Elchorfa s'étend sur une superficie de 177 km² et compte une population de 2920 habitants (en 31/12/2013). La densité de la population est de 16 habitants par km².

Le commun fait partie de la daïra de Sig. Elle est limitée comme suit :

1. Au nord par la commune de Sig.
2. Au sud par la commune de Bordj Boudjabha de la wilaya de Sidi Bel Abbès.
3. A l'Est par la commune d'El Gueitna et la commune de Bouhannifia
4. A l'Ouest par la commune d'El Gaada.

Une zone éparsée constituée de villages, dont les plus importants sont : Ouled Ali Bouziane, Rehailia et Sidi Ali Cherif.

La zone d'étude fait partie de la chaîne montagneuse des monts de Beni Chougrane (Nord-ouest de l'Algérie). Elle se trouve à l'intersection de huit communes : Sig, Zahana, Elchorfa, El Gaada, Oggaz (Wilaya de Mascara), Makedra (W. Sidi Bel Abbès), Oued Tlelat et Tafraoui (W. Oran) (Figure 1). Cette zone couvre une superficie de 408km² et d'un périmètre total de 89.761 km. Elle se localise exactement entre quatre points, Système de projection des coordonnées (WGS_1984_UTM_Zone_30N);

Point/ cordonnée	P1	P2	P3	P4
X_UTM(m)	733614.615	733614.615	761177.115	761177.115
Y_UTM(m)	3917175.881	3938275.881	3938275.881	3917175.881

Tableau 1: les coordonnées du secteur étudié.

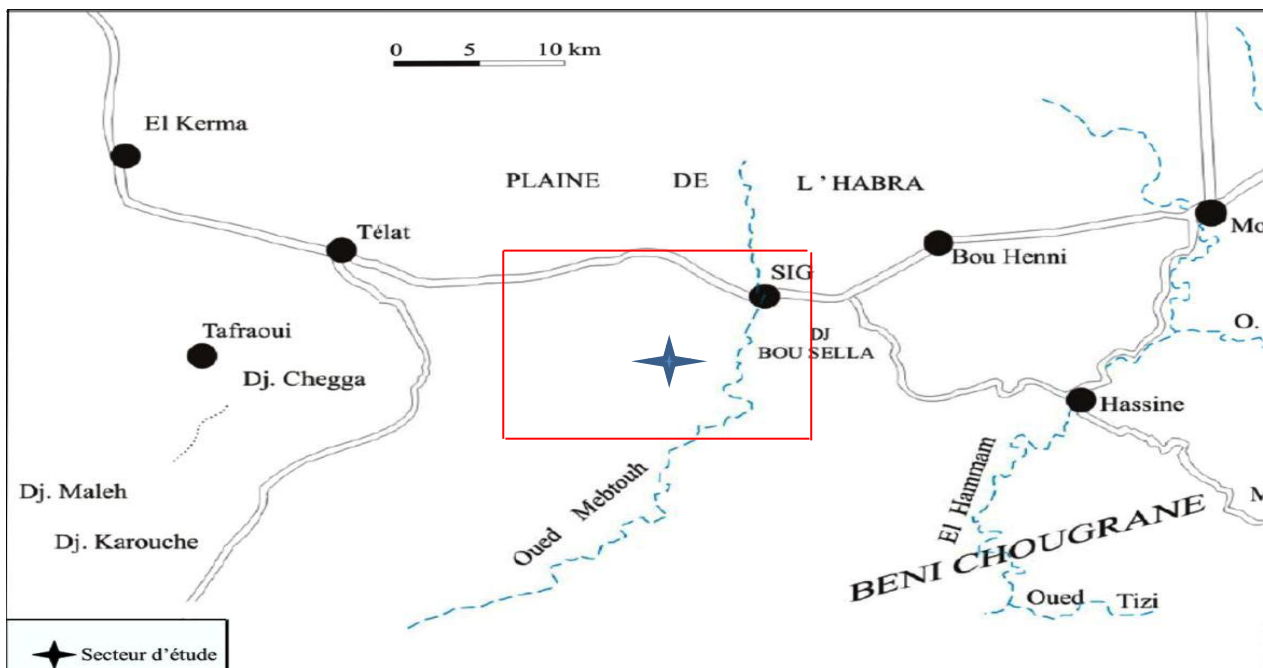


Figure 1: situation géographique du secteur d'étude (Kheloufi, A 2021).

I.2 Cadre géologique général

Le bassin du bas Chélif fait partie des bassins néogènes sublittoraux d'Algérie. Il correspond au sillon médian de (Delfaud J. & al., 1973). C'est un bassin intra montagneux, synorogénique, lié aux phases paroxysmales de l'orogénèse alpine (Perrodon A., 1957)

Ce bassin subsidés est caractérisé par une sédimentation néogène qui apparaît généralement continue au centre, par contre sur les marges, elle présente des interruptions dues aux jeux de la tectonique provoqués par l'orogénèse alpine (ROUCHY 1982).

Ce bassin est issu des dernières étapes de l'orogénèse alpine (Perrodon A., 1957) .

L'étude des variations, tant de la macrofaune que de la microfaune, nous conduit à distinguer deux grands cycles sédimentaires : le cycle miocène et le cycle pliocène (Perrodon A., 1957)

Le cycle miocène comprend :

➤ Un **Miocène Inférieur** (Burdigalien) transgressif et discordant sur le substratum Crétacé, représenté par des conglomérats, grés et des marnes bleues. C'est la méga séquence I de DELFAUD et al, (1973).

Ce miocène inférieur a été daté de Burdigalien terminale à Serravalien terminale par Bessedik *et al.*, (2002).

➤ Un **Miocène Supérieur** (Vindobonien), correspond au deuxième cycle post-nappe (Delteil, 1974 ; Fenet, 1975 ; Guadria, 1975 ; Belkebir et Bessedik, 1991) et à la méga séquence II de DELFAUD et al, (1973).

Ce miocène supérieur est transgressif, formé par des grés et des conglomérats qui passent vers le centre du bassin à des marnes bleues d'âge Tortonien, les diatomites et les gypses d'âge messénien surmontent la formation marneuse:

- La formation infra-gypseuse :

Au messénien , se manifeste une sédimentation diatomique prenant place au centre du bassin(milieu profond) ;sur les marges et haut-fond ,de plates-formes carbonatées à algues et coraux , (PERRODON ,1957 ; GOURINARD ,1958 ;ROUCHY,1982 ; SAINT MARTIN ,1987,1990 ; SAINT MARTIN et al. ,1992 ;CORNEE et al .,1994).

- La formation gypseuse:

L'individualisation du Bassin du Bas Chélif s'effectue lorsque la construction récifale a connu le maximum de développement, ceci a favorisé une sédimentation évaporitique « gypseuse » qui s'alterne dans sa partie supérieure avec des sables fins et des marnes comme c'est le cas dans la région de Sahaouria (Atif, 2001).

I.2.1 Géologie du secteur d'étude

La zone d'étude fait partie du complexe sédimentaire tertiaire du bas Chelif.

D'après La carte géologique (Figure 3) la région présente trois domaines distincts :

Une région montagneuse correspond à une période anténéogènes qui occupe la moitié sud-ouest de la carte.

Une zone de plateau visible sur la partie Nord-ouest de la carte occupée par la plaine de M'Léta.

Enfin la parties NE s'ouvrent sur une dépression forment la plaine de l'habra.

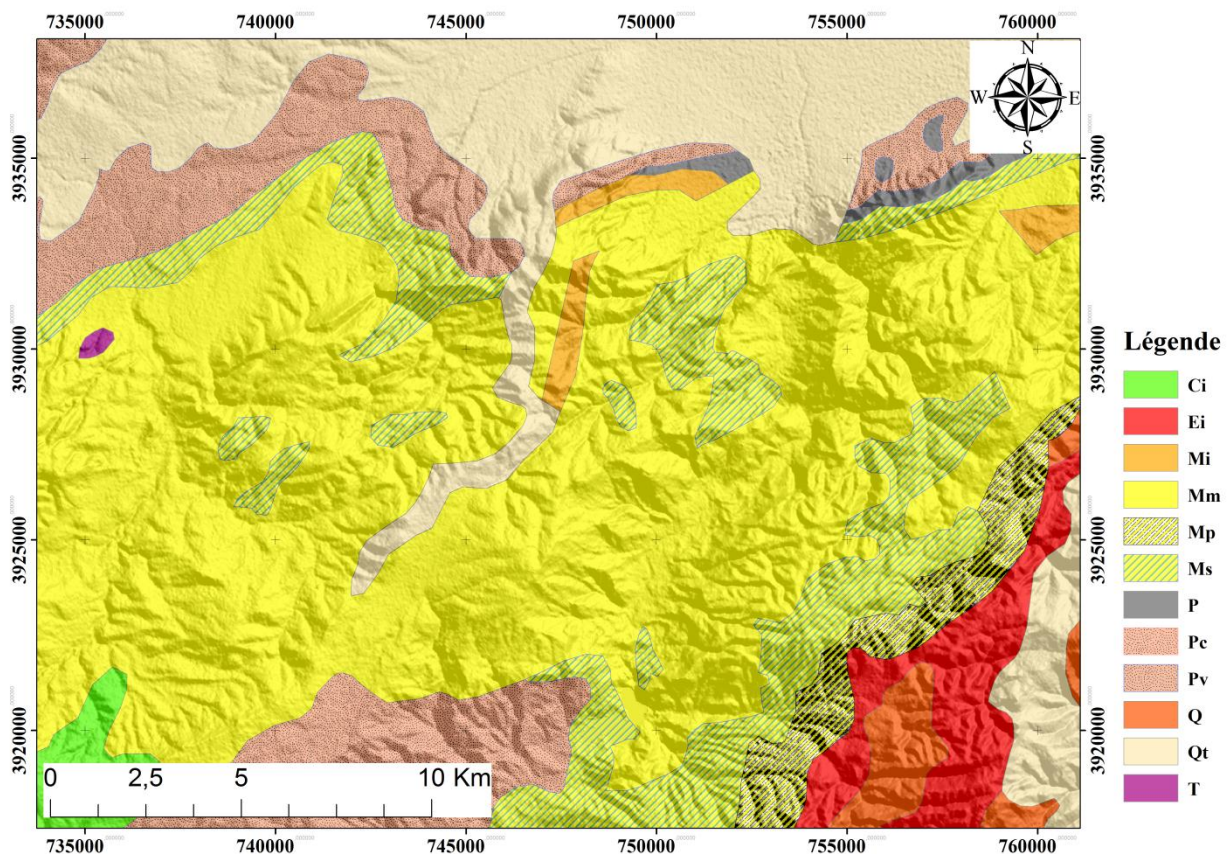


Figure 3: Carte géologique de la zone d'étude.

(**Ci** : faciès marins normaux ; **Mm** : calcaires, grès, argiles ; **Mp** : couche à Tripoli, marnes à gypse, calcaires, grès, argiles ; **Ms** : couche à Tripoli, marnes à gypse ; **P** : conglomérats, marnes bleues, mollasses, grès et formations dunaires subordonnées ; **Pc** : poudingues, calcaires lacustres ; **Pv** : calcaires lacustres, argiles à lignite, couches rouges ; **Qt** : alluvions, regs, terrasses).

I.2.2 Litho-stratigraphie

- **Le Miocène**

Il est représenté par la miocène supérieur mari. Ses formations dominent la majorité du territoire de la commune. Il est constitué de calcaire, grès et argile.

- **Le pliocène**

Il est représenté par le pliocène continental, localisé dans la partie sud d'Elchorfa dans la partie haute de vallée de l'ouest Mebtouh. Il est formé de poudings et de calcaires lacustres.

- **Le quaternaire**

Les formations quaternaires affleurent sous forme d'alluvions. Elles se localisent au niveau des terrasses et lits d'Oueds.

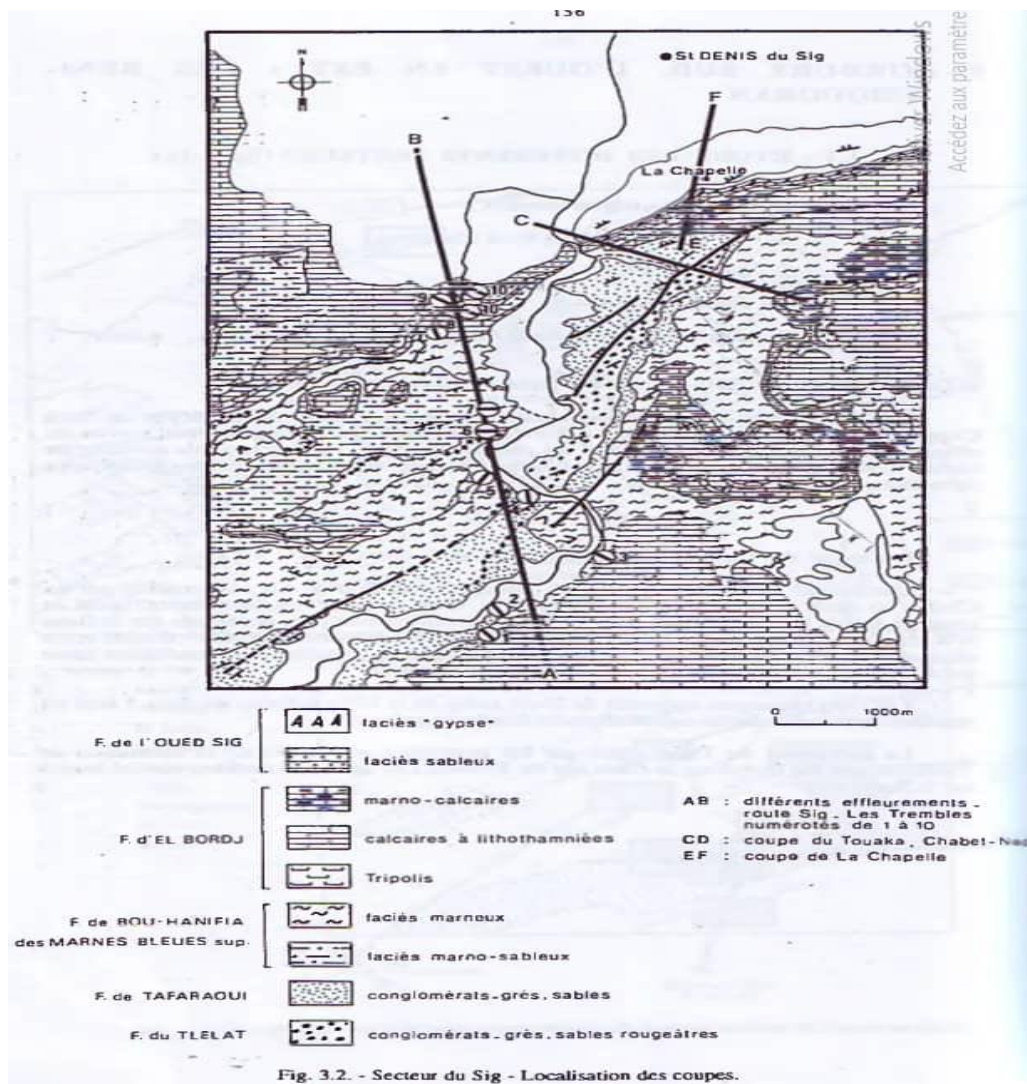


Fig. 3.2. - Secteur du Sig - Localisation des coupes.

Figure 4: Carte de localisation des coupes de secteur étudié, (Neurdin, 1992).

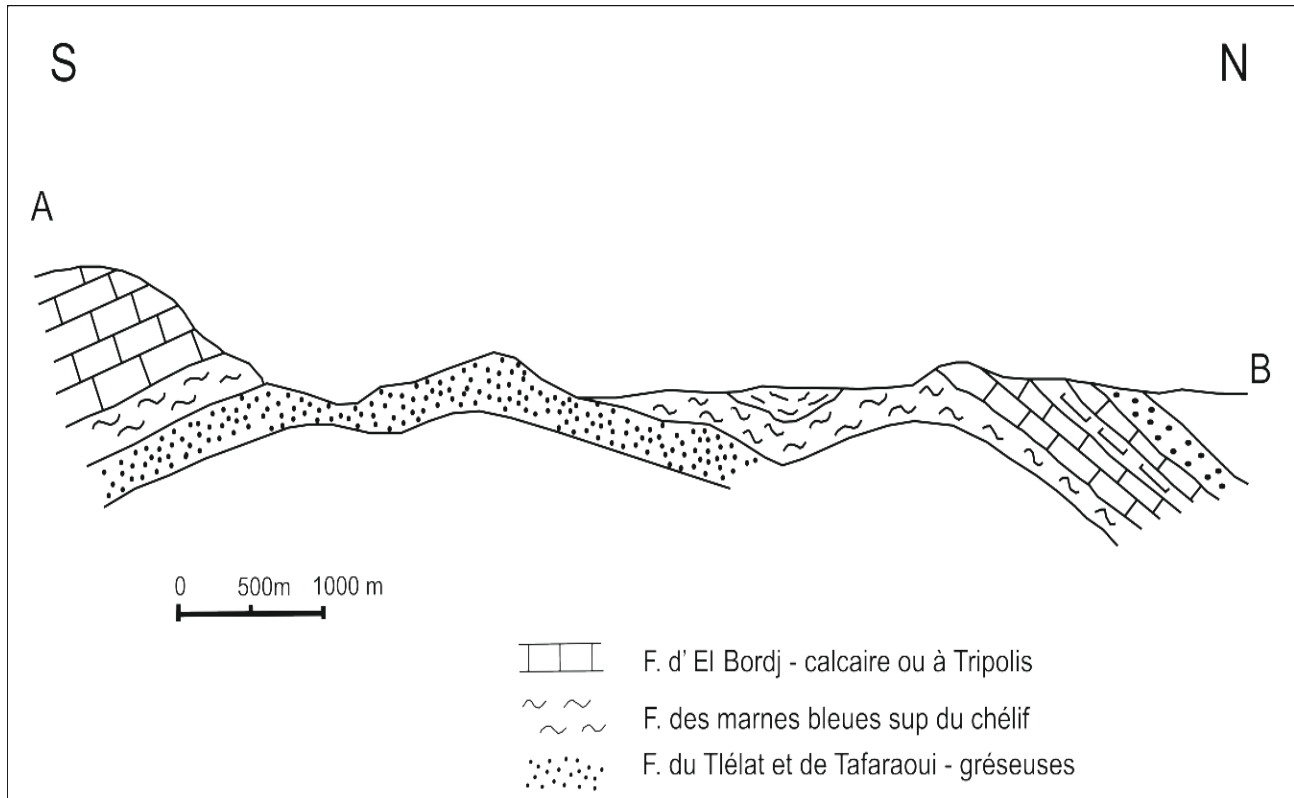


Figure 5: Coupe géologique S-N route Sig d'après (Neurdin, 1992).

- Apparemment, **la Formation du Telélat** manque sur toute la rive gauche de l'Oued Sig. Seule la coupe 4 traversant des grès rougeâtres à micro berceaux (Neurdin, 1992)
- **La Formation de Tafaraoui** affleure bien peu épaisse, sableuse, sablo-marneuse, gréseuse, riche en stratifications obliques et entrecroisées de petites dimensions, en galets mous, en débris de bois. Elle appartient au domaine de la plage.
- La Formation des marnes bleues supérieures se présente soit :
 - **sous le faciès "Marnes bleues"** soit sous le faciès marneux-sableux.
- **La Formation d'El Bordj** est ici soit représentée par des calcaires à algues, soit par des Tripolis surmontant directement les marnes bleues.
- Le faciès "calcaires à lithothamniées" réapparaît ici et va se développer de façon considérable à l'Est (au Sig, nous ne l'avons pas rencontré) (Neurdin, 1992).

I.3 Cadre géomorphologique

L'étude des formes du relief est une science revendiquée à la fois par les géographes et les géologues. Ces formes sont en effet, le résultat après l'action de plusieurs agents érosif (le vent, l'eau, etc.), et d'action internes (plissements, etc.).

L'Oranaï septentrionale représente un domaine important du Moï-pliocène dont fait partie de la zone d'étude.

La zone d'étude est située dans un sillon qui s'étend selon une direction tellienne NE-SW marqué par des piedmonts qui longent la partie sud de la plaine (Figure 6) montre l'existence de quatre unités morphologiques :

- Une zone montagneuse au sud de la plaine représentée par les monts de Tassala et ceux de Beni Chougrane
- Une zone de dépression située dans le Nord-Ouest représentée par la plaine de Mleta.
- Une autre zone de dépression situé dans Nord Est représentée par la plaine D'ElHabra.
- Une zone des plateaux située dans le centre représentés par les plateaux de Zahana et Sig.

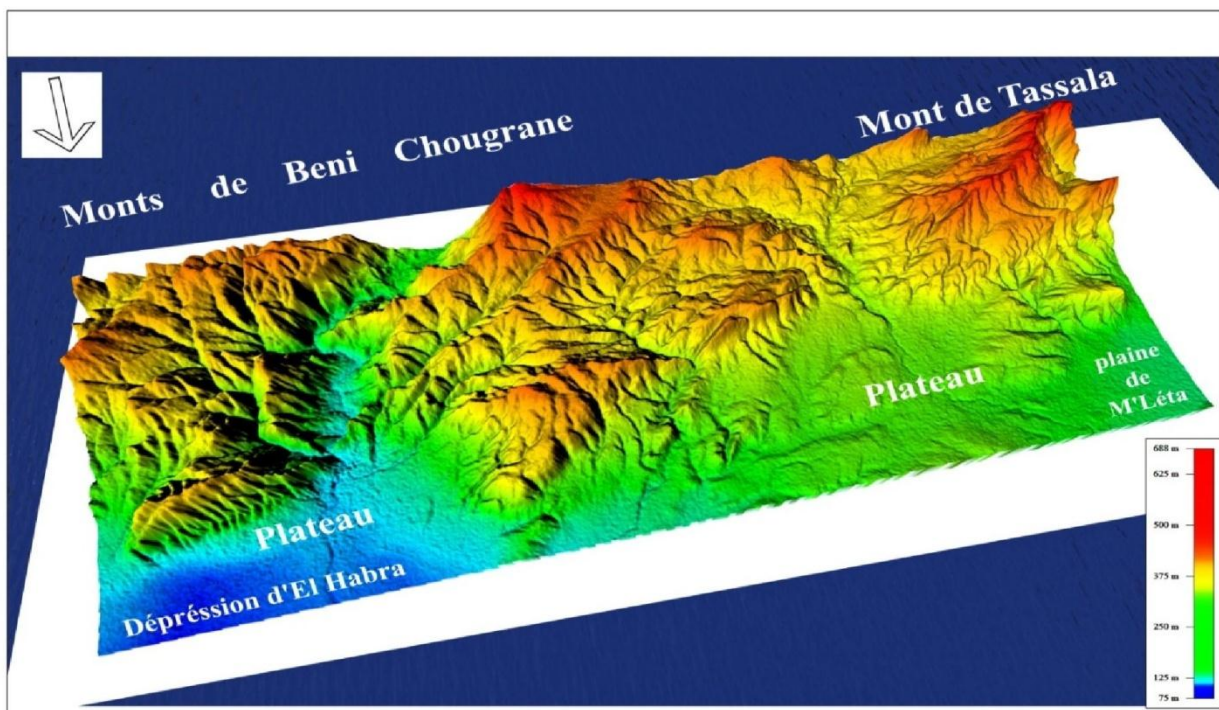


Figure 6: Carte géomorphologique de la zone d'étude.

L'altitude de la zone d'études variée entre 74 et 874m ainsi que la pente varie entre une pente minimale de 0° et une pente maximale de 57.18° (Figure 6).

I.4 Caractéristiques hydrologique

La zone d'étude situe entre trois sous bassin versant (Figure 7) bassin versant de grand sebkha d'Oran code 04-04, bassin versant d'El Habra code 11-16 et le bassin versant d'Elchorfa code 11-04.

Le chevelue hydrographique caractérisé par une densité assez importante.

Les deux principaux cours d'eau celle de oued El Mabtouh qui alimente les marais de la Mactaa, et le deuxième cours d'eau celle d'oued Tlélet dont les eaux de ruissèlement atteignent Dhaya Oum Ghhelaz.

La région d'ElChorfa se caractérise par un réseau hydrographique très dense, dont les plus importants sont :

- Oued ELchorfa qui longe de la commune à l'Ouest et qui draine des eaux dans le barrage de Sig
- L'Oued Mebtouh qui passe à l'extrême Sud-ouest de la commune, il est considéré comme le principal cours d'eau alimentant le barrage d'EL chorfa.

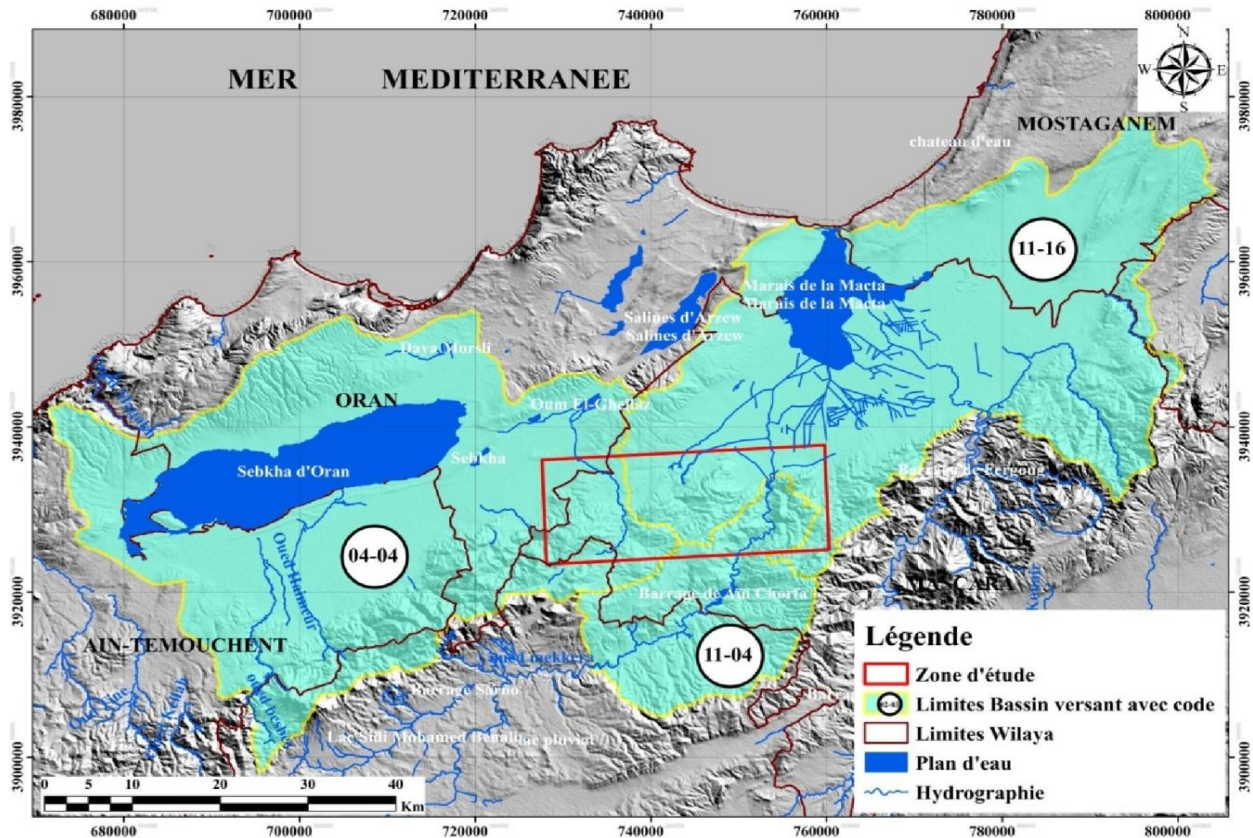


Figure 7: Carte schématique montre les différents aspects hydrologiques.

I.5 Cadre climatique

La climatologie intervient dans l'étude des eaux souterraines, car la recharge des réservoirs souterrains est conditionnée principalement par les précipitations météorologiques (Foucault A., 2009).

L'ensemble des eaux de sources a une origine essentiellement météorique.

La connaissance des caractéristiques climatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique.

I.5.1 Aperçu général sur le climat de la région d'étude

L'Algérie est caractérisé par un climat influencé par la mer méditerranée, avec un régime climatique, allant du pluvial à l'aride en passant par le semi-aride. La région d'étude est insérée dans une zone montagneuse de Béni Chougrane, qui fait partie de l'Oranais, sur laquelle plusieurs études climatologiques ont porté (Emberger, 1930-1972).

Les données climatologiques traitées relèvent de la direction de l'exploitation du Barrage Chorfa (II). Elles sont réparties sur une période de 10 ans (2011-2020). La station climatique du Barrage Chorfa(II) (ANBT) se trouve dans la commune de Chorfa (Tableau 2), Daïra de Sig, wilaya de Masacra.

Station	Latitude	Longitude	Altitude(m)
Barrage Chorfa(II)(ANBT)	35°24'06.86"N	0°15'09.96"O	231 m

Tableau 2: Localisation géographiques de station climatique du Barrage Chorfa (II) ANBT.

I.5.2 Etude des précipitations

La précipitation est un facteur primordial dans la détermination du régime climatique, car elle constitue la principale entrée des systèmes hydrologiques.

I.5.2.1. Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Chorfa (II) sont présentées sur le (Tableau 3).

L'analyse des données pluviométriques (Tableau 3) montrent que le module pluviométrique moyen est de l'ordre de 338mm. Le mois le plus pluvieux est le mois de Novembre avec un maximum de 57mm, et le mois le plus sec est celui de Juillet, avec une valeur minimale de 2mm

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Janv	Févr	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
P. moyennes mensuelles (2011-2020)	18,20	29,18	56,89	54,24	44,70	28,61	38,80	46,68	15,61	2,85	0,71	1,61	338,07

Tableau 3: Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.

La représentation graphique (Figure 8) montre que la répartition des précipitations mensuelles est irrégulière d'un mois à l'autre. Cette répartition est représentée par deux régimes, un régime sec de Mai à Septembre et un régime pluvial d'Octobre jusqu'à Avril.

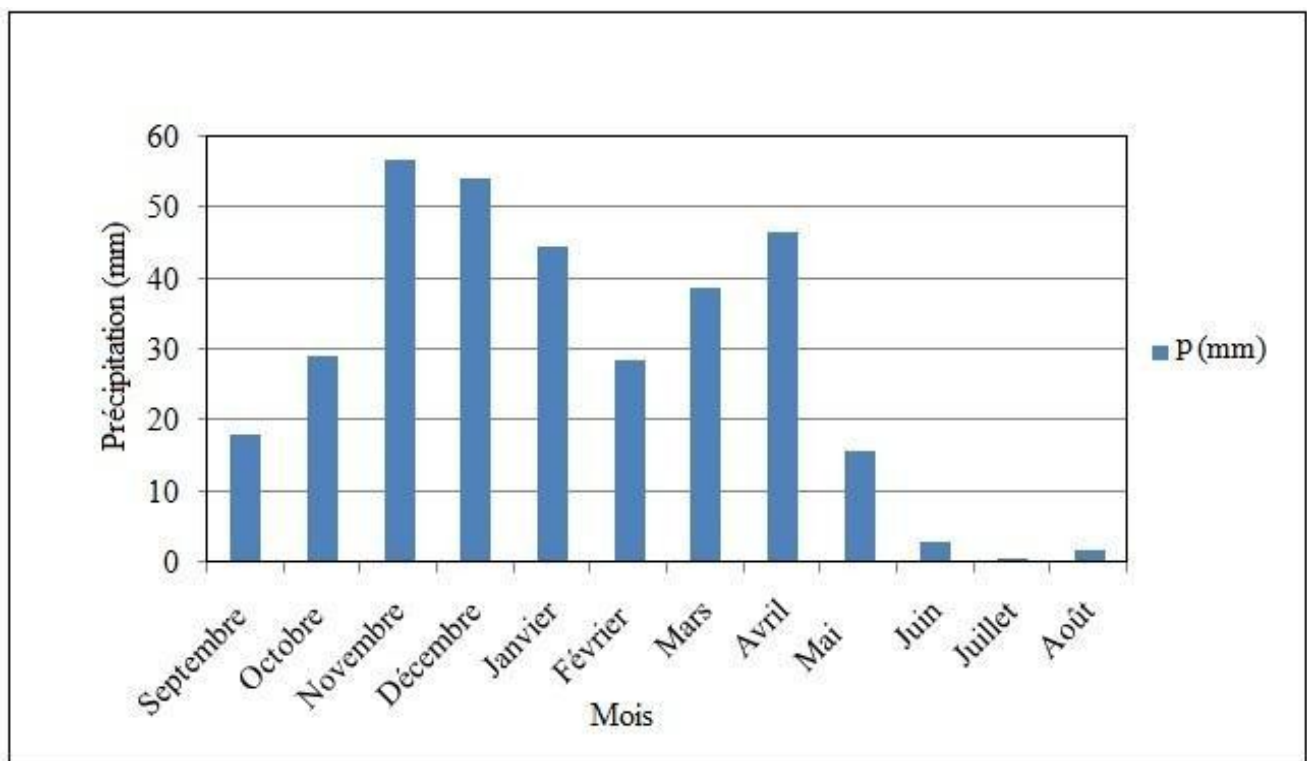


Figure 8: Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT (Période 2011-2020).

I.5.2.2. Précipitations saisonnières

La répartition des précipitations saisonnières de la période (2011-2020) est présentée dans le (Tableau 4) et la (Figure 9).

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Total	Indice saisonnier
P. Saisonnières (mm)	104,27	127,5 5	101,09	5,17	338,07	HAPE
%	30,84	37,73	29,90	1,53	100%	

Tableau 4: Précipitations saisonnières de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.

L'étude des précipitations à travers les saisons (Tableau 04) montre que les pluies se répartissent de façon inégale entre les saisons. La période d'Hiver reçoit la plus grande quantité des précipitations (Figure 9), avec un pourcentage de 37.73% de la pluviométrie totale, par contre la saison d'Eté, reçoit la plus faible quantité des précipitations, avec un pourcentage de 1.53% de la quantité totale.

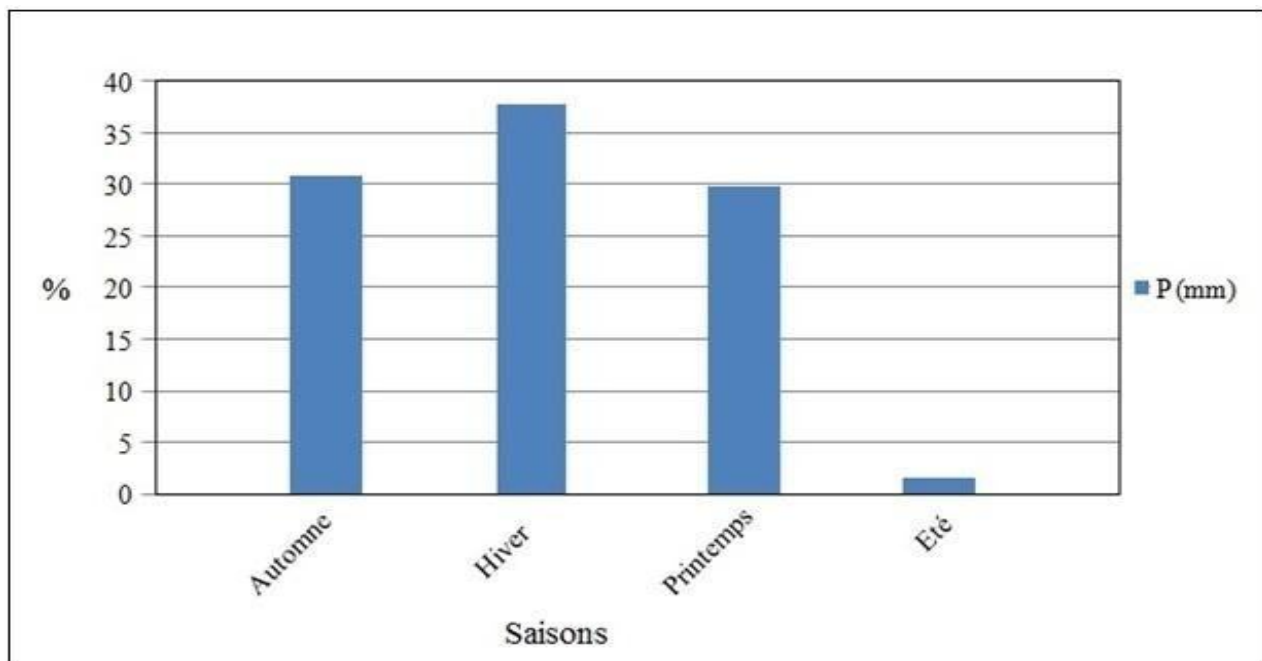


Figure 9: Précipitations saisonnières (Période 2011-2020).

L'analyse des précipitations moyennes annuelles (Tableau 5) permet de connaître la quantité de la précipitation accumulée pour chaque année, afin de faire la comparaison entre ces années en fonction de la quantité.

Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
P. annuelle (mm)	335,92	407,30	529,00	321,50	284,10	369,40	226,00	499,80	241,50	166,20

Tableau 5: Précipitations moyennes annuelles de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.

La représentation graphique des précipitations moyennes (Figure 10) donne une courbe dentée, ce qui signifie que les précipitations sont caractérisées par une variation interannuelle, avec un maximum de précipitation enregistrée en 2013, égale à 529mm, et une valeur minimum estimée à 166mm en 2020.

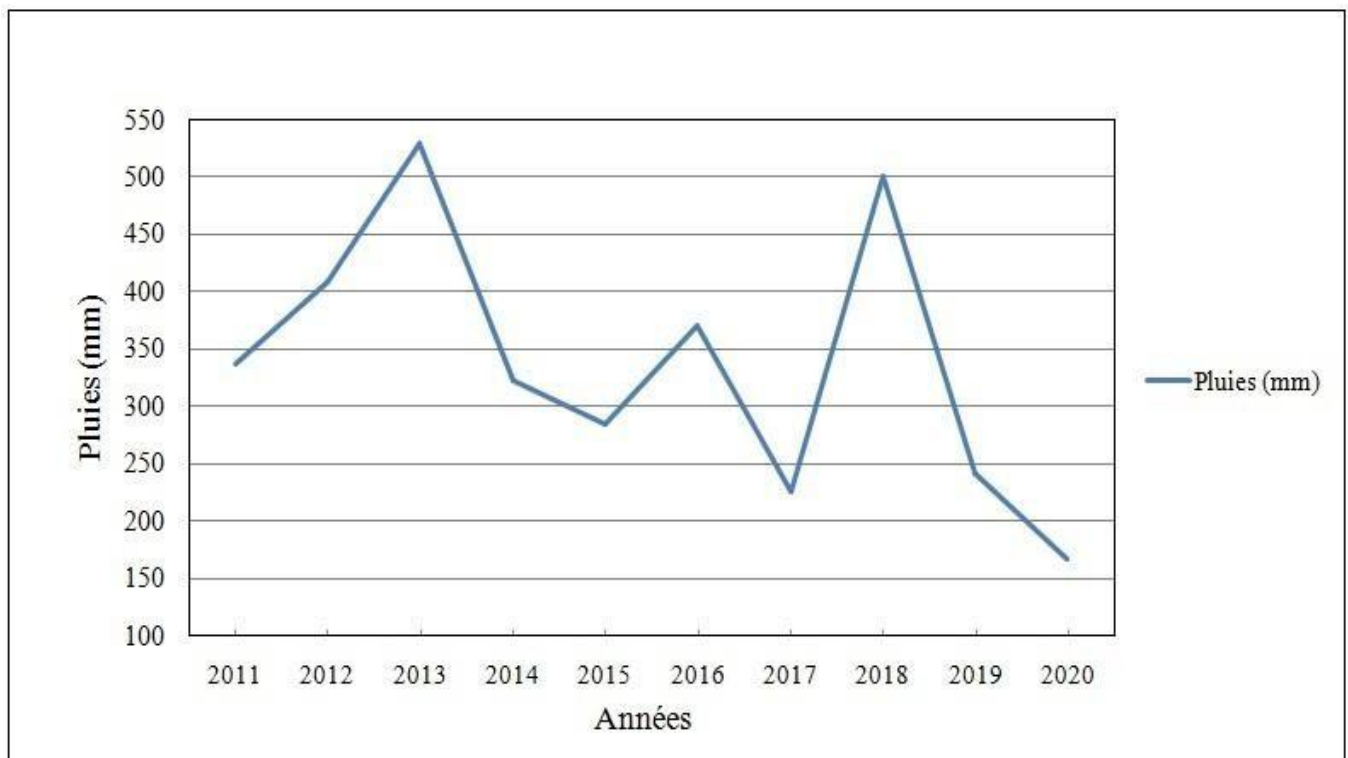


Figure 10: Précipitations moyennes annuelles (Station du Barrage Chorfa (II) ANBT, Période 2011-2020).

I.6 Etude des températures

La température constitue un facteur important dans l'estimation du déficit d'écoulement. Les valeurs de la température enregistrées au niveau du barrage Elchorfa (II) sont présentées dans le (Tableau 6).

6).

Ce tableau montre que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au mois de janvier, et les valeurs les plus élevées sont enregistrées au mois d'août.

T (°C)	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar s	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Moy
Max	23,33	19,80	14,55	9,66	10,56	11,95	11,89	14,54	18,47	21,79	26,16	27,64	17,53
Moy	20,22	16,82	11,98	8,21	7,53	9,24	9,69	12,55	14,70	19,24	22,72	24,16	14,76
Min	17,10	13,83	9,42	6,76	4,50	6,54	7,50	10,57	10,93	16,70	19,27	20,68	11,98

Tableau 6: Températures moyennes mensuelles maximales (M), minimales (m) et moyennes (2011-2020) de la station du Barrage Chorfa (II) ANB.

Les courbes de la température maximale, minimale et moyenne (Figure 11), montrent une décroissance de la température à partir du mois de Septembre au mois de janvier, et une croissance du mois de Février au mois.

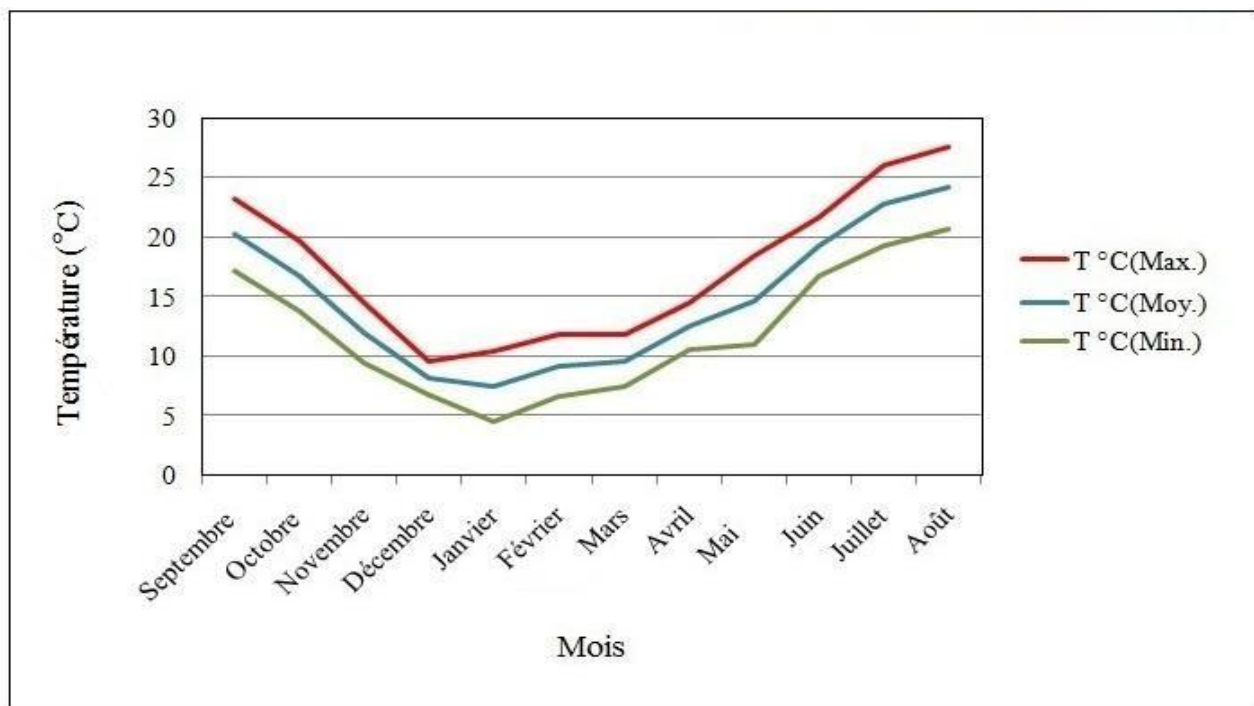


Figure 11: Températures moyennes mensuelles (Station du Barrage Chorfa (II) ANBT, (Période 2011-2020).

I.6.1 Relation température précipitation

Le diagramme de Gaussen a pour objectif de représenter les valeurs de précipitations en (mm) et les

valeurs de température en °C sur deux axes. Les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations $P=2T$. Le diagramme pluviaux-thermique permet de fixer le début et la fin d'une période sèche et humide.

Un mois est sec lorsque les précipitations moyennes exprimées en mm, sont inférieures ou égales au double des températures durant la même période (In Amroune A., 2018).

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
P (mm)	18,20	29,18	56,89	54,24	44,70	28,61	38,80	46,68	15,61	2,85	0,71	1,61
T °C	20,22	16,82	11,98	8,21	7,53	9,24	9,69	12,55	14,70	19,24	22,72	24,16

Tableau 7: Précipitations et températures moyennes mensuelles.

L'analyse de la courbe pluviaux-thermique (Figure 12) montre l'existence de deux périodes, une période humide (excédentaire) de mi-October au début Mai et une période sèche (déficitaire) s'étalant presque sur cinq mois.

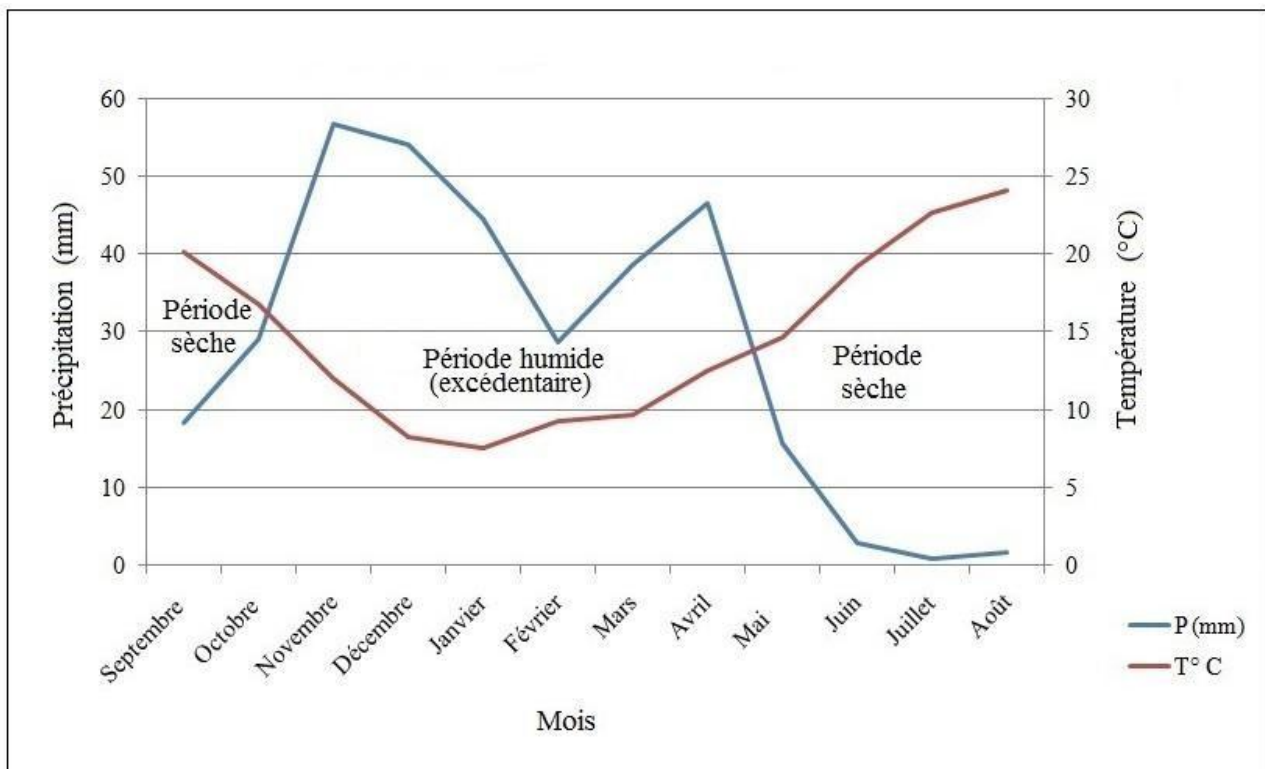


Figure 12: Courbe Ombro-thermique de la station du Barrage Chorfa (II) ANBT.

I.7 Sismicité de la zone d'étude

La zone d'étude fait partie de la chaîne Atlas tellienne de l'Algérie appartenant à la limite de la plaque tectonique Afrique- Eurasie qui forme une bande déformée d'environ 100 KM de largeur. Le Nord-ouest de l'Algérie a connu plusieurs tremblements de terre.

D'après Thomas 1985, la région d'étude se situe dans le fuseau de Beni Chougran caractérisé par des failles inverse de direction NE-SW et d'autres failles inverse observées dans la plaine d'El Habra et Mleta d'une direction NW-SE.

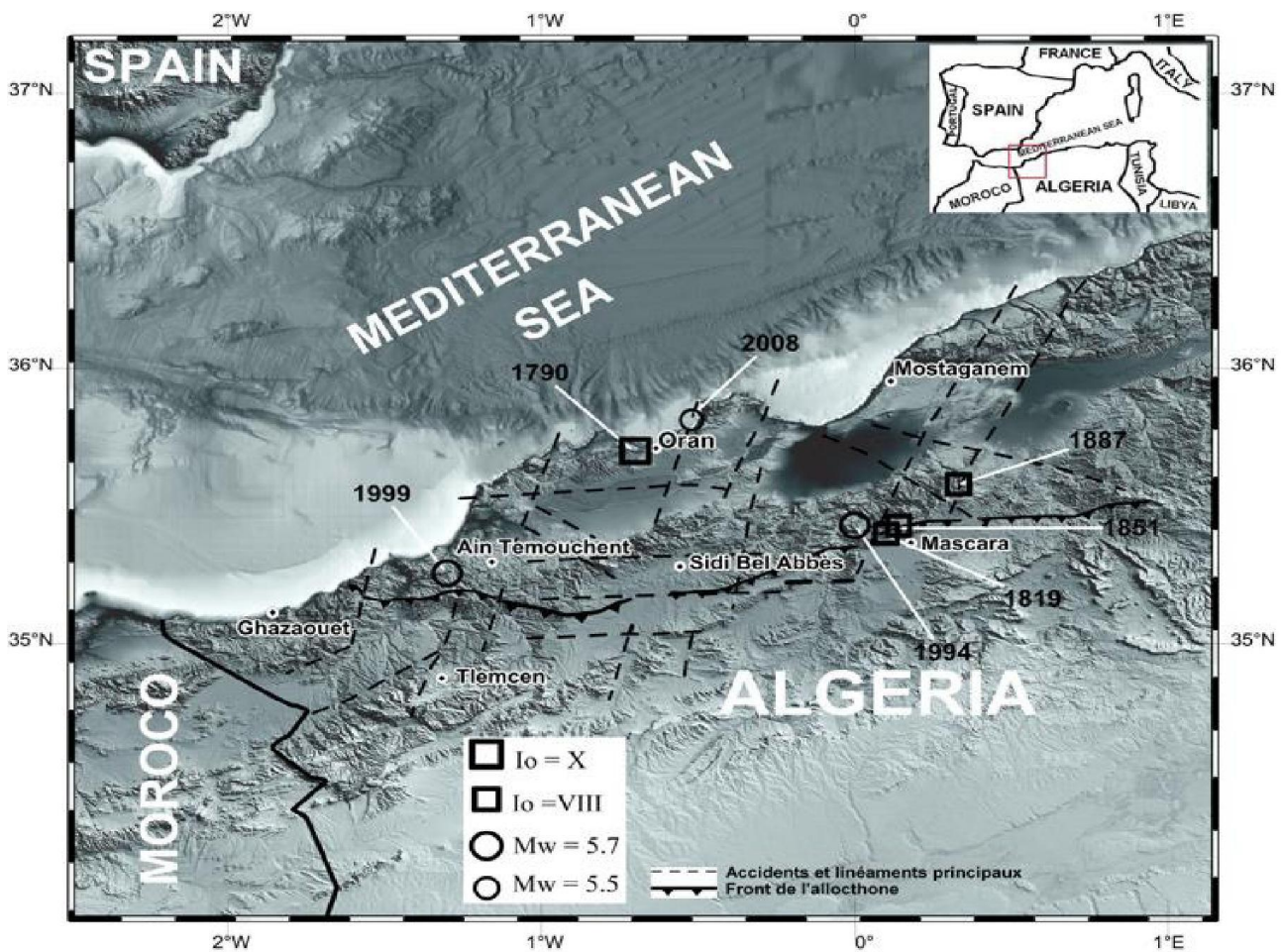


Figure 13: les principaux traits structuraux selon Thomas 1985 et les séismes significatives survenus dans la région Nord Occidental de l'Algérie (in Belayadi et all 2016).

Conclusion

La zone étudiée fait partie du grand bassin versant de la Macta.

Elle est caractérisée par un climat semi-aride influencé par les courants humides en hiver et chauds en été. Les précipitations moyennes annuelles, calculées sur une période allant de 2011 à 2020, varient entre 166mm et 336mm à la station du Barrage Chorfa (II), et la température moyenne est égale à 14,76 °C pour la même période.

Chapitre II

Analyses bibliographique

II.1 Introduction

De nombreux pays demande sont confrontés par des phénomènes naturels importants susceptibles de provoquer parfois des catastrophes pour les personnes et les biens. Ces phénomènes sont d'origine très diverses, résultant de la déformation de la rupture et du déplacement du sol.

Un mouvement de terrain est un déplacement, plus ou moins brutal, du sol ou du sous-sol sous l'effet d'influences naturelles (agent d'érosion, pesanteur, séisme, etc.) ou anthropiques (exploitation de matériaux, déboisement, terrassement, etc.). Ce phénomène comprend diverses manifestations, lentes ou rapides, en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure. Les glissements de terrain sont des accidents graves, parfois de grande ampleur, se produisent soudainement ou peuvent durer plusieurs mois. Ils affectent aussi bien des ouvrages construits par l'homme que des pentes naturelles.

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols, ...etc.) et par leur dimension (certains glissements, peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m³).

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris : ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme.

Leur dynamique répond naturelle mentaux lois de la mécanique.

II.2 Mouvements et instabilités de terrain

II.2.1 Définition

Les mouvements de terrain sont les manifestations du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte des neiges, pluviométrie anormalement forte, séisme, etc.) ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.).

II.2.2 Classification des mouvements de terrain

Les classifications des mouvements de terrain qu'ils soient d'origine naturelle ou anthropique sont nombreuses.

On peut citer la classification internationale (Hutchinson, 1988); la classification Européenne (Soldait, 1996) ; la classification automatique, (Dikau et al, 1996), etc.

Divers caractéristiques ont été prises en compte dans ces classifications, elles peuvent se baser sur: les mécanismes et la composante principale du déplacement, (Varnes, 1984; Martin, 2006); La géométrie et l'état d'activité (Dikau et al, 1996); les caractéristiques géotechniques et les vitesses de déplacement (Hungretal, 2001); le type de matériaux (Corominas, 1998); le contexte géologique et géomorphologique (Hutchinson, 1988) et voire même la combinaison tous les critères précédents, (Antoine et Giraud, 1993;Hadj, 2015).

Selon la vitesse du déplacement deux types peuvent être distingués les mouvements lents : pour lesquelles la déformation est progressive et peut être accompagné par des ruptures: ils regroupent les affaissements, les tassements, les glissements, la solifluxion, le fluage, le retrait-gonflement et le fauchage.

Les mouvements rapides : se propagent d'une manière brutale et soudaine, selon le mode de propagation des matériaux en masse ou à l'état remanié : les effondrements, les chutes de pierres ou blocs, les éboulements ou les écroulements, les laves torrentielles et les coulées boueuses.

On peut classer les mouvements de terrains en deux grands types :

- Les mouvements de pentes : concernent les déplacements obliques sur des surfaces libres inclinées ou ils s'affectent les pentes naturelles ou artificielles.
- Les mouvements verticaux : concernent les déplacements verticaux confinés abaissant sans rupture des surfaces horizontales.

II.2.3 Typologie des mouvements de terrain

II.2.3.1. Mouvements lents et continus

a) Affaissement

Les affaissements sont des dépressions topographiques en forme de cuvette à grande rayon de courbure dû au fléchissement lent et progressif du terrain de couverture avec ou sans fractures ouvertes (Figure 14).

Dans certains cas il peut être le signe annonciateur d'effondrement des bâtiments s'ils ne présentent en général pas de risque pour les personnes, ils peuvent avoir des conséquences sur les ouvrages en surface, allant de la simple fissuration jusqu'à la ruine complète.

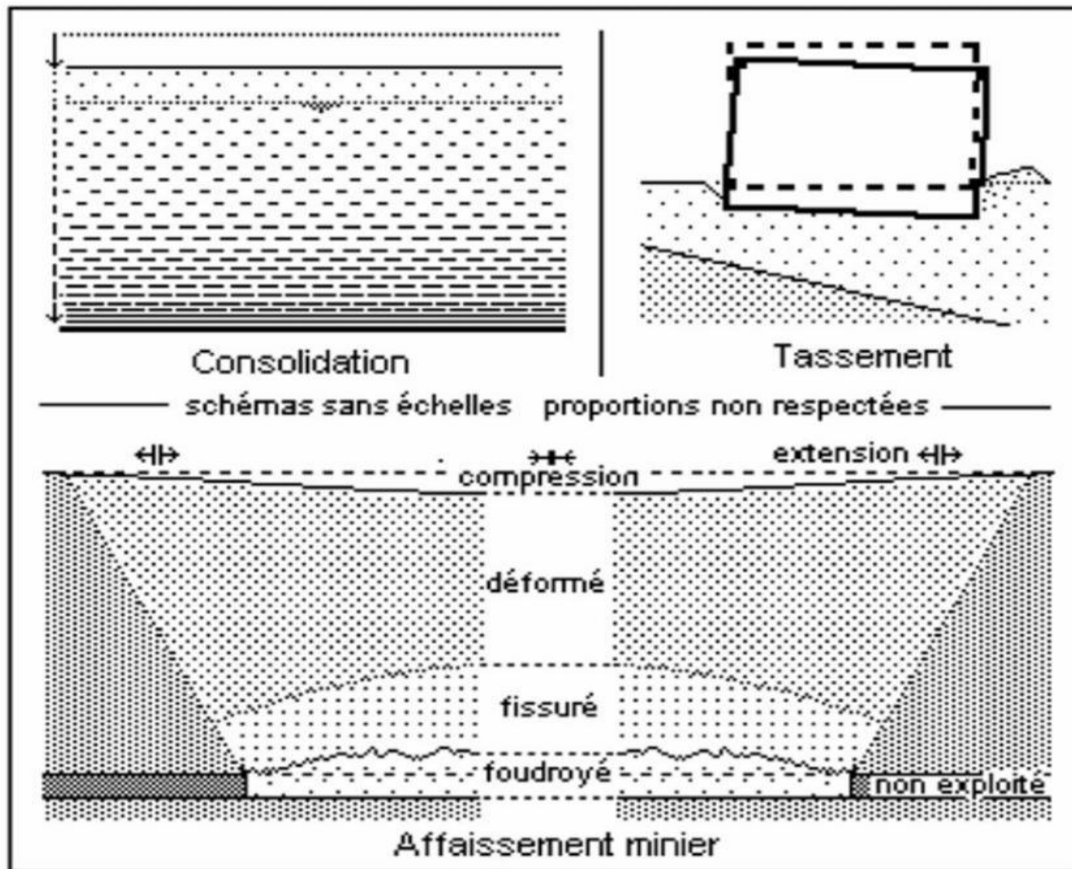


Figure 14: Les affaissements, (Beltas R. et Medjider R 2021).

b) Tassement par retrait gonflement

Le retrait-gonflement des argiles est lié aux variations de teneur en eau des terrains argileux : ils gonflent avec l'humidité et se rétractent avec la sécheresse (Figure 15). Ces variations de volume induisent des tassements plus ou moins uniformes et dont l'amplitude varie suivant la configuration et l'ampleur du phénomène. Sous une habitation, le sol est protégé de l'évapotranspiration, et sa teneur en eau varie peu dans l'année.

Parmi les conditions d'apparition de ce phénomène on peut citer :

- La nature de sol concerne exclusivement les sols à dominante argileuse.
- Les phénomènes climatiques jouent un rôle assez important pour les déclencher dans les périodes de sécheresse.
- La présence de la nappe et l'existence de circulations souterraines à faibles profondeurs.
- La géomorphologie: un terrain en pente entraîne une dissymétrie des fondations.
- Les racines des végétaux aspirent l'eau du sol.

- Et les défauts de construction.

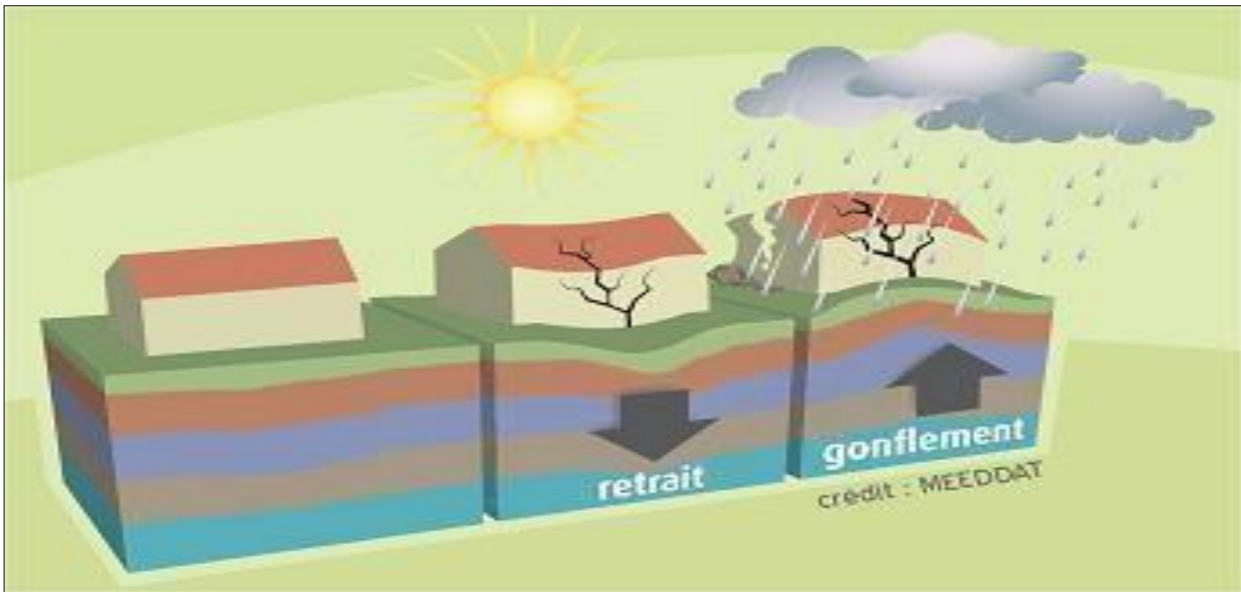


Figure 15: Phénomène de tassement par retrait et gonflement pour un site plastique, (Beltas R. et Medjider R 2021)

c) Fluage

Sont parfois regroupés dans la catégorie des glissements de terrain, il s'agit d'un mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente (Figure 16) qui résulte d'une déformation gravitaire continue d'une masse de terrain non limitée par une surface de rupture clairement identifiée, mais par une zone de transition avec le massif stable.

Les mouvements lents : pour lesquels la déformation est progressive et peut être accompagnée par des ruptures: ils regroupent les affaissements, les tassements, les glissements, la solifluxion, le fluage, le retrait-gonflement et le fauchage.

Les mouvements rapides : se propagent d'une manière brutale et soudaine, selon le mode de propagation des matériaux en masse ou à l'état remanié : les effondrements, les chutes de pierres ou blocs, les éboulements ou les écroulements, les laves torrentielles et les coulées boueuses.

On peut classer les mouvements de terrains en deux grands types :

- Les mouvements de pentes : concernent les déplacements obliques sur des surfaces libres inclinées ou ils s'affectent les pentes naturelles ou artificielles.
- Les mouvements verticaux : concernent les déplacements verticaux confinés abaissant sans rupture des surfaces horizontales.

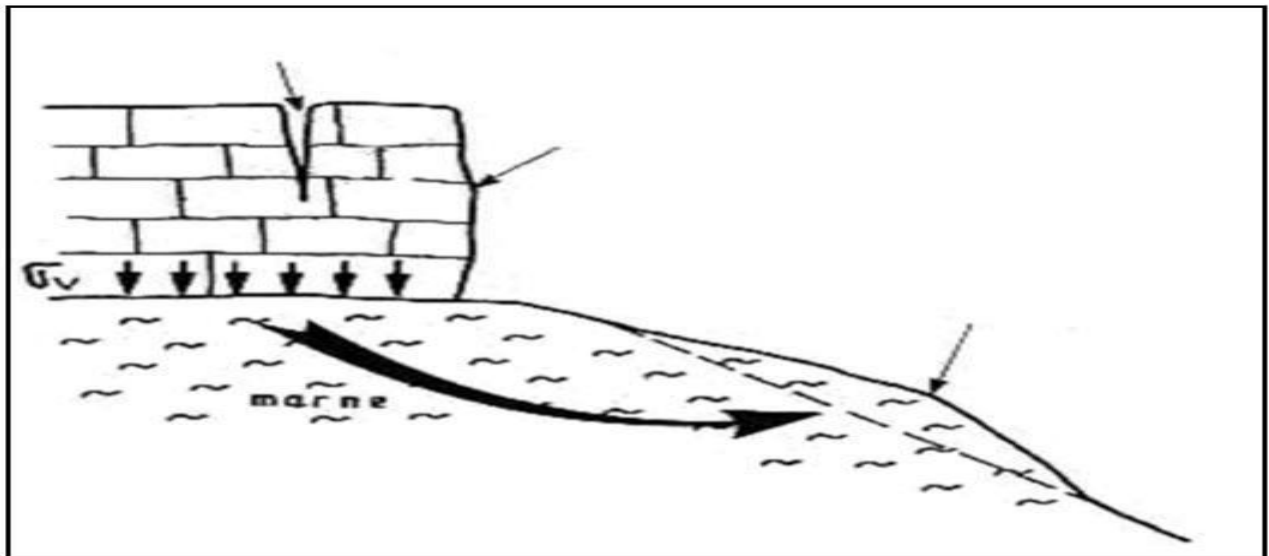


Figure 16: Exemple de fluage, (Beltas R. et Medjider R 2021)

d) Solifluxion

La solifluxion est un phénomène d'écoulement des sols en surface sur des pentes très faibles. Elle correspond à un mouvement de masse superficiel qui est déclenché lorsque la charge en eau dépasse le seuil de plasticité du matériau. Le sol peut alors fluer dans la pente sur un plan de décollement saturé d'eau (Figure 17).

La grande majorité des chercheurs de ce domaine considèrent que le processus de solifluxion est composé principalement de deux mécanismes majeurs: la gélifluxion et la reptation.

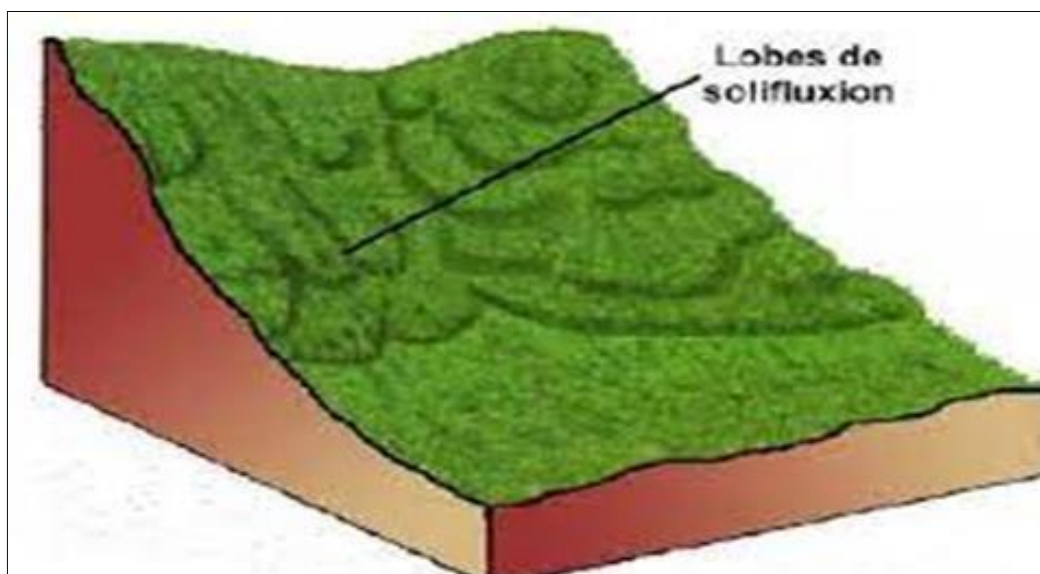


Figure 17: Phénomène de solifluxion, (Beltas R. et Medjider R 2021).

II.2.3.2. Mouvements à risque géologique (discontinus)

a. Effondrement

Les effondrements sont des mouvements gravitaires à composante essentielle verticale, qui se produisent de façon plus ou moins brutal.

Ils sont le résultat d'une rupture des appuis ou du toit d'une cavité souterraine, jusqu'à l'ouverture d'une excavation cylindrique (Figure 18).

Les dimensions de cette excavation dépendent de plusieurs paramètres : la nature lithologique ; le volume et la profondeur de la cavité et le mode de rupture.

Ces phénomènes trouvent leur origine dans des paramètres naturels ou dans des activités passées d'extraction de matériaux dans le sous-sol.

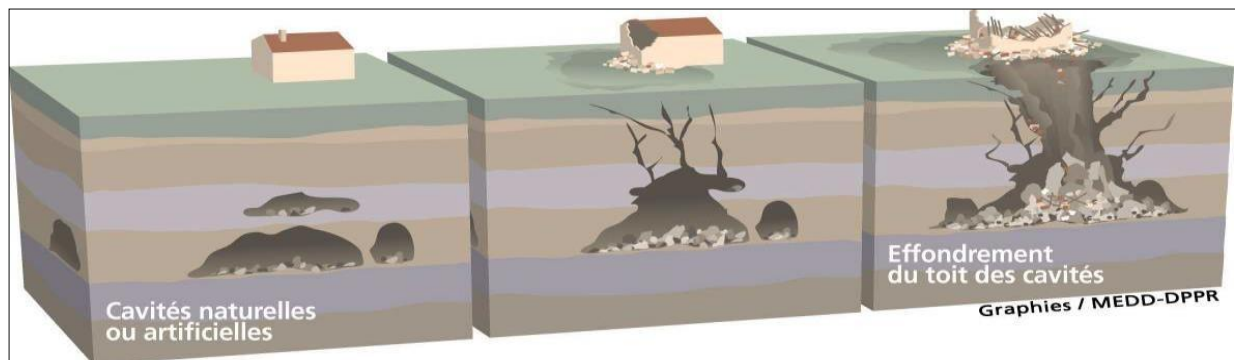


Figure 18: Le phénomène d'effondrement, (Beltas R. et Medjider R 2021)

b. Chutes de pierres ou de blocs

Les chutes de masses rocheuses sont des mouvements d'une masse rocheuse, composé d'une ou de plusieurs particules, quand se sépare d'un versant rocheux, d'une paroi ou une falaise et se déplace, propulsée par l'action de la gravité, suivant une trajectoire verticale ou sub verticale (CRUDEN .D.M & VARNES D.J, 1996), Ces mouvements sont l'origine de plusieurs facteurs de prédisposition et déclenchant tel que : la densité, l'orientation des discontinuités, la morphologie de versant (falaise, pente), les pressions hydrostatiques due à la pluviométrie et à la fonte de neige, les secousses sismiques ou anthropiques.

Selon le type du mouvement de propagation, on distingue trois types (Varne .D.J, 1978) qui sont présentées par la (Figure 19) ci-dessous :

- Les écroulements / éboulements en chute libre.
- Les chutes par rotation ou basculement du bloc ou masse rocheuse.
- Les glissements sur une surface inclinée.

- **Écroulements**

Ce sont des chutes soudaines de masses rocheuses importantes. Ils sont généralement dus à des causes internes au massif. Ils peuvent se produire suite à la dislocation d'une masse rocheuse diaclases par altération interne ou accroissement de pressions interstitielles. Par Glissements banc sur banc d'une masse rocheuse stratifiée, par écroulements de masses mises en surplomb par érosion ou dislocation de couches tendres sous-jacentes. Ou par fluage ou glissement d'une couche sous-jacente (Hadji, 2015).

- **Basculements**

Ou bien le fauchage, Ils s'agissent comme des phénomènes lents assez fréquents qui affectent les matériaux qui sont soumis à un moment induit par la gravité sur une masse ne possédant pas suffisamment d'appuis à sa base. Il précède souvent des chutes de bloc ou induit des ruptures importantes dans un versant.

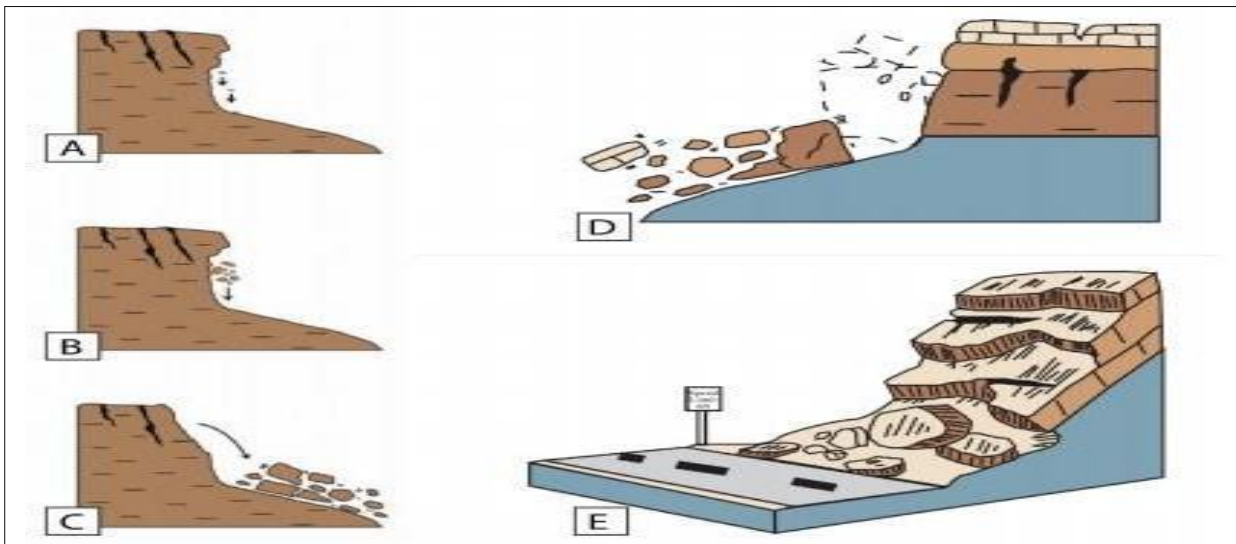


Figure 19: Différents types de chutes de bloc : a) éboulement ; b) éboulement (< 100 m³) ; c) écroulement (> 100 m³) ; d) basculement ; e) glissement. Modifié de Highland, 2004.

c. Coulées boueuses

Les coulées boueuses sont des phénomènes très rapides affectant des masses de matériaux remaniés, soumis à de forte concentration en eau, sur de faibles épaisseurs généralement (0-5 m). Ce type de phénomène est caractérisé par un fort remaniement des masses déplacées, une cinématique rapide et une propagation importante. Elles prennent fréquemment naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain (Figure 20).



Figure 20: Phénomène de coulée boueuse, (Oukil C. et Bouchiba M.A, 2019)

Type de mouvement		Type de matériau		
		Roches	Sols	
			Granuleux	Fins
Chutes (Falls)		Eroulement rocheux (Rock fall)	Eroulement de débris (Debris fall)	Eroulement de terrain (Earth fall)
Basculements (Topples)		Basculement rocheux (Rock topples)	Basculement de débris (Debris topples)	Basculement de terrain (Earth topples)
Glissements (Slides)	Rotation (Rotational)	Affaissement rocheux (Rock slump)	Affaissement de débris (Debris slump)	Affaissement de terrain (Earth slump)
		Masse rocheuse en glissement (rock block slide)	Débris en glissement (Debris blockslide)	Terrain en glissement (Earth block slide)
	Translation (Translation a)	Glissement rocheux (Rock slide)	Glissement de débris (Debris slide)	Glissement de terrain (Earth slide)

Déplacement latéraux (Spreads)	Déplacement de roche (Rock spread)	Déplacement de débris (Debris spread)	Déplacement de terrain (Earth spread)
Écoulement (Flows)	Avalanche de roche (Rock flow)	Lave torrentielle (Debris flow)	Coulée de terrain (Earth flow)
Complexes (Complex)	Combinaison d'au moins deux principaux types de mouvements.		

Tableau 8: Classification des mouvements de terrain (Varne .D.J, 1978).

II.3 Glissements de terrain

Un glissement de terrain est un phénomène géologique regroupant un ensemble des déplacements, ces déplacements généralement lents (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.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, des forces extérieures (hydraulique, ou sismique), ou d'une modification des conditions aux limites.

Leur vitesse est variable. Plus les glissements sont superficiels, plus la fissuration du terrain est visible en surface.

Les indices caractéristiques pouvant être observés dans les glissements de terrain sont généralement la formation d'une niche d'arrachement, des fissurations, des bourrelets (au pied), des arbres basculés ou tordus, des zones de rétention d'eau. (Djeral, 2009-2010).

II.3.1 Morphologie des glissements de terrain

Les divers éléments d'un glissement tels que proposés par l'IAEG (International Association of Engineering Geologists) sont (Figure 21) :

1. Escarpement principal : Surface inclinée ou verticale, souvent concave limitant le glissement à son extrémité supérieure et prolongée en profondeur par la surface du glissement.
2. Escarpement secondaire : Surface circulaire semblable à l'escarpement principal, mais visible dans la masse remaniée. Ces escarpements confèrent à la masse en mouvement une structure en escalier.

3. Pied : Correspond à l'intersection aval de la surface topographique initiale et la masse glissée. Le pied est souvent masqué par le bourrelet.
4. Surface de glissement (Ou de rupture) : C'est la surface qui sépare la masse glissante des terrains en place.
5. Fissures et crevasse : rupture au sein du matériau se manifestant par des fentes d'importance et de formes diverses suivant leur position.
6. Couronne : sone située au-dessus de l'escarpement principal souvent peu affecte par le désordre. Seules quelques fissures ou crevasses témoignant de la mise en traction des terrains dans ces zones.
7. Tête : c'est la limite amont du glissement et plus précisément partie ou le matériau glissé se trouve en contact avec l'escarpement principal.
8. Élément : fraction de la masse glissée entre deux escarpements.
9. Flan : limite latérale du glissement prolongeant l'escarpement principal.
10. Extrémité inférieure (pouce) : zone aval du mouvement du terrain ou extrémité du bourrelet.
11. Rides transversales : elles se forment dans le bourrelet du mouvement du terrain, témoins d'effort de compression pouvant aboutir à des chevauchements dans le matériau.
12. Corps : partie centrale du glissement recourant la surface de rupture.

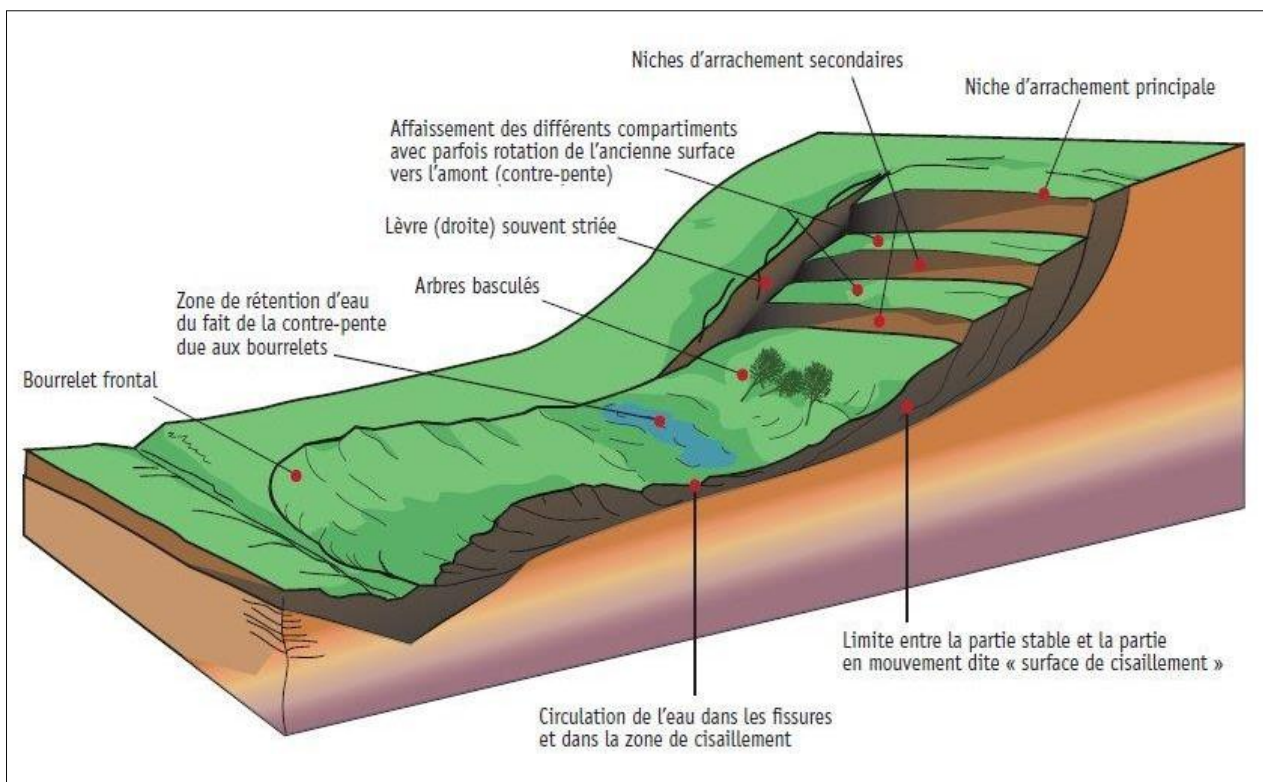


Figure 21: Morphologie générale d'un glissement de terrain, (Beltas R. et Medjider R, 2021)

II.3.2 Types des glissements de terrain

Selon la géométrie de la surface de rupture, on peut distinguer trois types principaux de glissement présenté dans la (Figure 22) :

1. Glissement plan ou translationnel

En générale, il se produit dans les sols stratifiés ou les roches fissurées. Lors d'un glissement plan, les couches de l'ensemble de terrain se déplacent selon une surface plus ou moins plane, il s'agit souvent du toit d'une couche de mauvaise résistance nommée « couche de savon».

2. Glissement circulaire ou rotationnel

Ils se forment principalement dans des milieux homogènes et isotropes, ils se manifestent par une rotation sur une surface de cisaillement ayant l'allure générale d'une cuillère vaguement sphérique, qui donne aux versants une topographie chaotique.

Ce type est regroupe en deux catégories :

➤ Glissement rotationnel simple

C'est le type de glissement le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre.

➤ Glissement rotationnel complexe

Qui se manifeste généralement sous forme de surfaces multiples dues à des glissements en chaîne, causé généralement par :

- Caractéristiques mécaniques variant en profondeur ;
- Anisotropie de structure ;
- Anisotropie mécanique ;
- Suppression d'une butée de pied entraînant une rupture régressive ou un effondrement.

➤ Glissement composite

Caractériser par une surface de rupture de forme nettement moins géométrique et parfois même tout à fait quelconque.

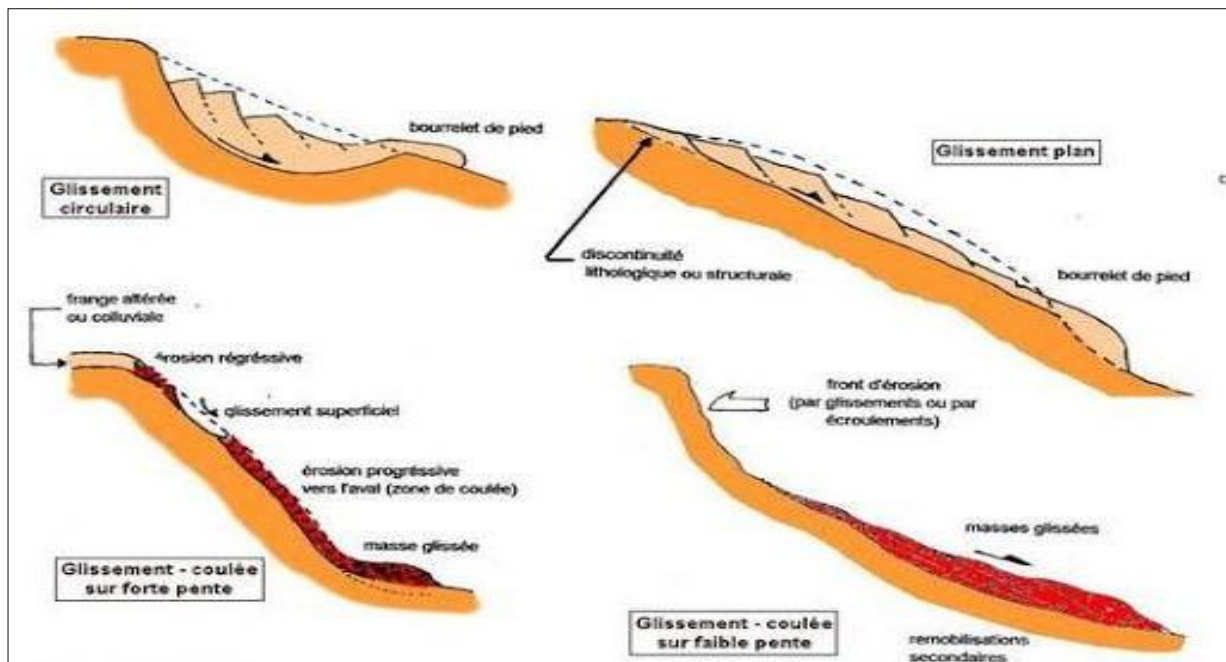


Figure 22: Les différents types de glissements de terrain, (Beltas R. et Medjider R 2021)

II.3.3 Principaux causes des glissements de terrain

La manifestation des glissements de terrain résulte généralement de la combinaison des facteurs aggravants (permanents) ou déclencheurs, que l'on décrit ci-dessous :

a. Facteurs conditionnant

Les facteurs conditionnant sont ceux qui déterminent les conditions de stabilité ou d'instabilité du versant : (Kabou Y, 2013).

- Lithologie : représente un facteur conditionnant majeur dans la stabilité des versants. Elle étudie les caractéristiques des sols et roches existants sur le terrain, telle la composition, la texture, les caractéristiques mécaniques, la perméabilité, la susceptibilité d'altération

- La pente : est l'un des facteurs déterminant dans la genèse des glissements de terrain.

En effet, pour qu'une rupture puisse se produire sur un versant, il faut qu'il y ait l'intervention de la gravité accompagnée d'un appel au vide. Ce phénomène ne pouvant prendre naissance sur des terrains plats, la prise en compte du degré de pente des versants et des couches est d'une importance capitale.

Relief par sa composante altimétrique représente aussi l'un des facteurs les plus déterminants dans la genèse des glissements de terrain. Ainsi, plus l'altitude augmente, plus le risque d'occurrence de mouvement de terrain n'est présent

- La structure : le pendage, la présence de joints de stratification, de plis, de schistosité constituent des zones de faiblesse dans un massif.
- Proximité du réseau de drainage : est généralement liée au phénomène d'érosion hydrique parmi lesquels on trouve les sapements de berges. Ce phénomène se développe généralement dans les portions des cours d'eau où la vitesse d'écoulement est suffisamment puissante pour éroder la partie basale d'un versant.
- L'activité tectonique récente à actuelle : peut conditionner ou déclencher un mouvement de masse au niveau de la zone de broyage des failles (cisaillements et/ou décrochements) formée de matériaux fraisés.

L'occurrence des mouvements de masse se trouve généralement accentuée à proximité des résurgences.

b. Facteurs déclenchant

Les facteurs déclenchant engendrent les mouvements par changements rapides des conditions du versant définies par les facteurs déterminants :

-L'eau, déclencheuse et accélératrice de glissement : lorsque l'eau s'infiltré dans le sol, elle prend la place qu'occupait l'air dans les interstices.

L'eau étant plus lourde que l'air, le terrain peut se retrouver surchargée, ce qui joue en faveur de la gravité au détriment de la force de cohésion.

- Précipitations : tiennent un rôle direct dans le déclenchement des mouvements de masse. En effet, la pluviométrie agit directement sur le déclenchement des mouvements de masse en diminuant la résistance au cisaillement et en rendant les terrains gorgés d'eau plus plastiques ; ce qui a pour conséquence directe le déplacement de la masse sous son propre poids.

-Sismicité : ne peut déclencher un mouvement de masse qu'à partir d'une magnitude critique d'activation de l'ordre de $M = 4$ (Guzzetti et al. 1999). Cependant on peut assister à de petits écoulements lors de libération d'énergies inférieures à la magnitude critique.

-Les cours d'eaux et les résurgences : Sont souvent responsable indirectement dans le déclenchement des mouvements de masse. En effet, leur action érosive (ravinement, sapement de berge, érosion régressive, etc....) engendre souvent déstabilisation de versants. L'action de l'eau peut être aussi de nature chimique lorsqu'elle entraîne une altération des matériaux par différentes actions comme l'oxydoréduction, l'hydrolyse, l'hydratation, la dissolution, etc.

-Végétation : la couverture végétale joue un rôle très important dans la stabilité des talus qui peut être favorable (les racines augmentent la cohésion du sol), ou défavorable (l'effet du vent sur les arbres qui constitue un effort moteur, l'effet de levier qui peut arracher les arbres et laisser des vides dans le sol, l'érosion de la roche...), de plus, elle peut nous renseigner sur la position de la nappe.

- **Les causes mécaniques** : on peut citer :

- Les vibrations : dues à un séisme ou à des activités humaines (explosion, passage d'un train). Il y a une augmentation momentanée du poids du terrain qui peut suffire pour que le seuil de stabilité soit franchi et que le terrain se mette en mouvement.
- Les surcharges : Le déclenchement peut intervenir en jouant directement sur la force motrice par effet de surcharge gravitaire. Cette surcharge résulte d'un stockage naturel de matériaux sur le versant instable.

II.3.4 Dynamique des glissements de terrain

Les glissements de terrain se caractérisent par des phases d'activité où les vitesses de déplacement sont élevées alternées avec des phases de calme. Proposent quatre phases (Djeral, 2009-2010) (Figure 23)

- La phase de préparation : dans cette phase on remarque une absence d'évolution mesurable ou un mouvement de faible amplitude qui peut conduire à une diminution progressive des caractéristiques du terrain.
- La phase du paroxysme (rupture) : c'est une période généralement de courte durée pendant laquelle on observe des déplacements importants. La stabilisation de glissement a lieu généralement après cette phase.
- La phase d'amortissement (relaxation) : elle succède immédiatement à la phase de paroxysme c'est la phase la plus couramment rencontrée par le géotechnicien car il est amené à intervenir dans cette phase pour stabiliser ou surveiller le phénomène.
- La phase de stabilisation : le versant est stabilisé pour une durée indéterminée

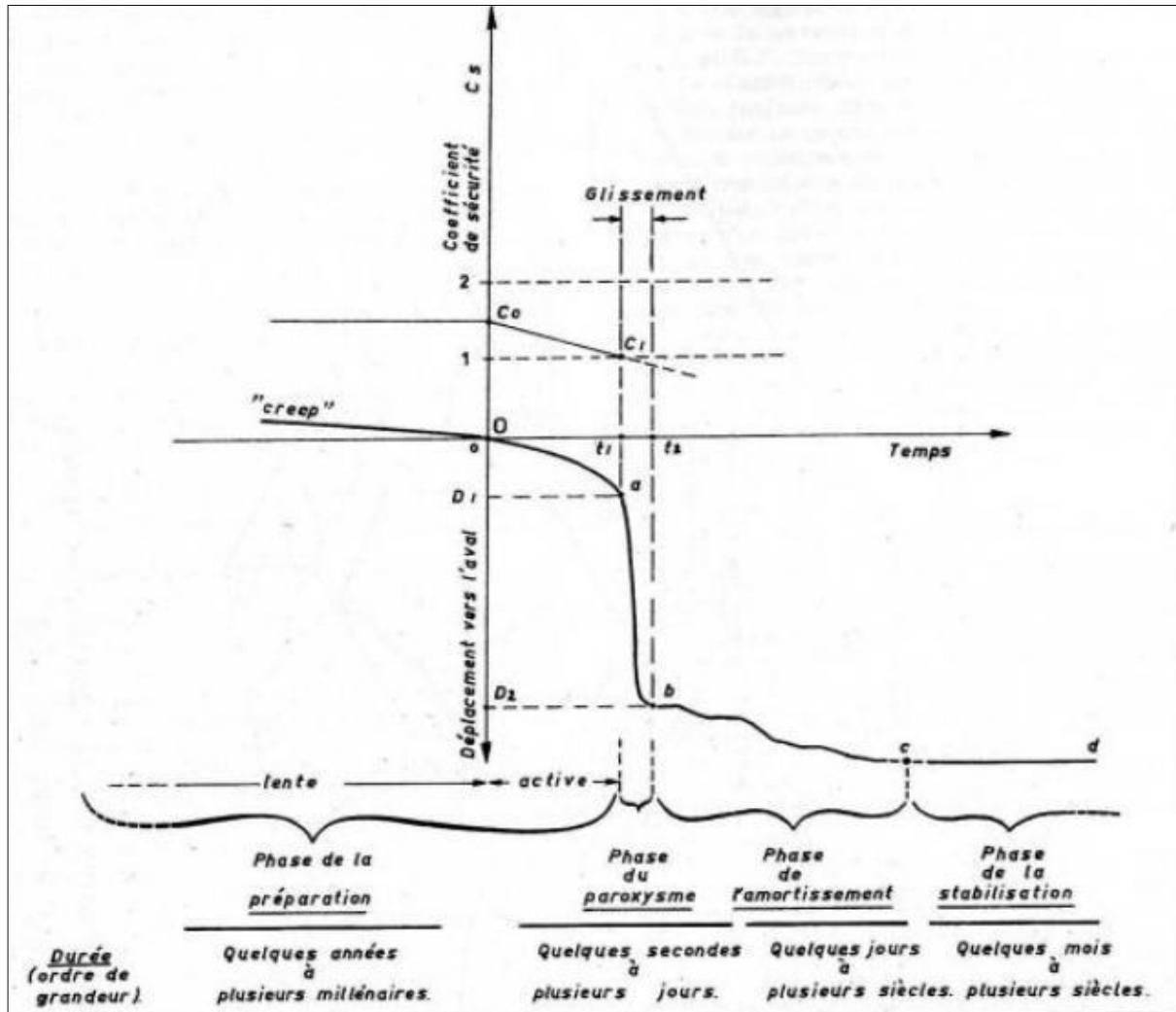


Figure 23: La dynamique d'un glissement de terrain.

II.3.5 Classification des glissements de terrain

Les glissements de terrain peuvent être classés selon la profondeur estimée de la surface de glissement et selon le degré d'activité, défini par une évaluation de la vitesse moyenne à long terme des mouvements (Tableau 9).

II.3.5.1. Selon la vitesse

La vitesse de glissement d'un terrain permet de distinguer les glissements permanents et les glissements spontanés.

- **Glissement de terrain permanent** : Le mouvement est régulier vers l'aval sur une longue période, la masse se déplace le long d'une surface de glissement existant
- **glissement de terrain spontané** : Le mouvement terrain meuble et/ou de roche est relativement rapide vers l'aval suite à un déclenchement subit ; contrairement au glissement

permanent. Ce glissement forme toujours une nouvelle surface de glissement ou zone de rupture (coulée de boue par exemple).

Glissement	Vitesse
Substabilité, très lent	0-2cm/an
Peu actif, lent	2-10cm/an
Actif	>10cm/an

Tableau 9: La classification de glissement de terrain. Selon la vitesse.

A partir des classes de vitesses définies par (Varne .D.J, 1978), les bornes de ces classes ont été redéfinies en 1994. pour chacune de sept classes de vitesse des types de réaction et des impacts significatifs en termes de vies humaines ou de dégâts aux constructions ont été proposés qui sont montrées dans le (Tableau 10).

Classe	Description	Vitesse	Effets
01	Extrêmement lent	Moins de 16 mm/an	Pas de dommage aux structures construites.
02	Très lent	De 1,6 m/an à 1,6 mm/an	Quelques structures sont sans dommage peuvent réparées.
03	Lent	De 1,3 m/mois à 1,6 m/an	Les routes et les structures peuvent conservées à partir de lourds travaux.
04	Modéré	De 1,8 m/h à 13 m/mois	Les structures localisées sur la masse déplacée sont extrêmement endommagées
05	Rapide	De 3 m/min à 1,8 m/h	Les constructions sont détruites par les mouvements.
06	Très rapide	De 5 m/s à 3 m/min	Destruction majeure avec la morte de quelques personnes
07	Extrêmement rapide	Plus de 5m/sec	Catastrophe majeure conduite à dégâts importantes des personnes et des biens.

Tableau 10: Classes de vitesses définies par Varnes (1978).

II.3.5.2. Selon la profondeur

En fonction de la profondeur, on distingue (Tableau 11) :

a. Glissement superficiel

Dus à des pics de pression interstitielle. Ils peuvent également être modifiés indirectement par les changements climatiques.

b. glissement semi profond

Où la profondeur est comprise entre 2m à 10m.

c. Glissement profond

Les glissements profonds se rapportent à des phénomènes d'instabilité de plus grande ampleur, qui peut affecter l'ensemble d'un versant.

Glissement	Profondeur
Glissement superficiel	0-2m
Glissement profond	2-10m
Glissement semi profond	10-30m
Glissement très profond	>30m

Tableau 11: La classification de glissement de terrain. Selon la profondeur, Office l'environnement Division Prévention des dangers, 2009.

II.3.6 Conséquences des glissements de terrain

Du fait des fissures, des déformations et des déplacements en masse, les glissements peuvent entraîner des dégâts importants aux constructions. Dans certains cas, ils peuvent provoquer leur ruine complète (formation d'une niche d'arrachement d'ampleur pluri métrique, poussée des terres incompatibles avec la résistance mécanique de leur structure.

L'expérience montre que les accidents de personnes dus aux glissements et coulées sont peu fréquents, mais possibles (cas d'un phénomène relativement rapide et/ou survenant de nuit, les modifications importantes affectant le terrain conduisent à des mouvements différentiels notables du sous-sol et portent un sérieux préjudice à la stabilité des bâtiments.

Suite aux fissures qui se développent dans les éléments de structure du bâtiment, aux tassements qu'ils subissent et à leur basculement, une destruction partielle ou totale des bâtiments est possible. Les portes et les fenêtres ne peuvent plus être utilisées. Les hommes et les animaux sont mis danger dans les bâtiments.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons définis les différents types de mouvements de terrain quelques soit lente ou rapide et on base sur les glissements de terrain ; en effectuant une classification selon la profondeur et la vitesse du mouvement.

Nous avons aussi traité les différents types (plan, rotationnel), et les phases d'un glissement de terrain ainsi les causes principaux pouvant induire ou déclencher une instabilité.

Chapitre III

Méthodologie de travail

III.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'identifier les méthodes de la cartographie les plus pertinentes permettant de réduire les incertitudes liées aux données, aux différentes approches.

Le risque se définit par le nombre potentiel de personnes tuées ou blessées, les dégâts aux propriétés et les perturbations potentielles aux activités économiques en raison de l'occurrence d'un phénomène destructeur particulier pour un secteur donné et une période de référence. (Varne .D.J, 1978).

La cartographie du risque glissements de terrain, nécessite l'évaluation du niveau de l'aléa et d'enjeux humains ou la vulnérabilité des éléments exposés.

Malgré de nombreuses recherches, l'évaluation du risque "glissement de terrain" souffre d'un manque d'études sur la vulnérabilité qui correspond au niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux qui sont les éléments exposés (Glade .T, 2003) rassemblent tous les éléments anthropiques qui peuvent être touchés par l'aléa: la population, les bâtiments et ouvrages d'art, les activités économiques, services et infrastructures ainsi que le patrimoine environnemental et culturel présents à un moment donné sur la zone potentiellement affectée par l'aléa (Si-Ali Bakhta 2012) qui est définie par une intensité, une probabilité dépend de facteurs de prédisposition et de facteurs déclenchant. D'occurrence spatiale et temporelle qui Pour évaluer cet aléa nécessite au préalable d'apprécier la susceptibilité des terrains à un type de glissement, c'est à dire la possibilité qu'un glissement se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Cela revient à répondre à trois questions : quel type de glissement de terrain est susceptible de se produire ? Quels sont les facteurs de prédisposition ? Où ces facteurs sont-ils spatialement réunis ?

De la Plusieurs approches d'évaluation susceptibilité des versants, fondées sur l'outil SIG dont on cite trois approches principales une approche directe (ou qualitative) ou une approche indirecte (fondée sur des modèles spatiaux statistiques) et un troisième approche déterministes ou (physiques) (Thiery M.Y, 2007)

III.2 Cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain

La cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain ; glissements de terrain est un important outil pour la gestion et l'atténuation des effets de ces phénomènes. Les cartes de susceptibilité contiennent d'importantes informations sur la distribution spatiale, sans aucune implication temporelle, des mouvements de terrain. Par conséquent, elles constituent des outils

indispensables pour les planificateurs qui doivent déterminer les localités favorables au développement urbain ou rural (Waltham, 2005) (Gutiérrez, 2008) (Nachbaur, 2011) (Pueyo-Anchuela, 2011).

La cartographie de la susceptibilité est importante pour les zones où : les enregistrements historiques des événements mouvements de terrain sont manquants, les relevés météorologiques sont discontinus ou rares, la magnitude ou l'intensité des séismes, qui ont déclenché les mouvements de terrain, est inconnue (Chacón, 2006).

Plusieurs approches sont utilisées pour la réalisation de cette cartographie. Selon la méthodologie utilisée, elles peuvent être subdivisées en deux principaux groupes : les méthodes qualitatives et les méthodes quantitatives (Dewitte, 2006) (Nachbaur, 2011) (Papadopoulou-Vrynioti, 2013) (Poiraud, 2014).

III.2.1 Les approches dans le contexte quantitatif :

Les approches heuristiques directes et indirectes font partie des méthodes qualitatives. Elles sont recommandées pour la réalisation des cartes régionales de susceptibilité aux mouvements de terrain à petite échelle (<1:125,000) (Jiménez-Perálvarez, Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS, 2009) (Glade) (Bălteanu, 2010.)

- **L'approche heuristique directe**

L'approche heuristique directe est aussi nommée méthode géomorphologique (Soeters, 1996). Elle se base sur la cartographie des mouvements d'une façon directe sur le terrain par des géomorphologues, géologues ou géotechniciens (van Westen C. R., 2003) (Ardau, 2007).

La cartographie de la susceptibilité aux mouvements de terrain dépend, donc, de l'opinion de l'expert qui rend cette approche plus subjective.

- **L'approche heuristique indirecte**

L'approche heuristique indirecte s'appuie sur la combinaison de cartes indexées. Des poids sont attribués aux différents facteurs de prédisposition pris en compte et éventuellement à chacune des classes de chaque facteur (van Westen C. R., 1997). Les facteurs de prédisposition sont ensuite indexés selon ces poids, conduisant à des valeurs de susceptibilité qui peuvent être groupées en classes de susceptibilité. Cependant la difficulté de cette méthode d'analyse multicritère, très large, réside dans la détermination de la pondération exacte des différents facteurs de prédisposition, ce qui rend également cette méthode subjective.

Afin de palier à cette part de subjectivité rencontrée dans l'application des approches heuristiques, des méthodes de plus en plus objectives telles que les méthodes statistiques, probabilistes et déterministes sont utilisées.

III.2.2 Les méthodes quantitatives

Les méthodes quantitatives regroupent les approches statistiques, probabilistes et déterministes.

Ces méthodes sont des approches de cartographies indirectes.

- **Les approches statistiques**

Les approches statistiques sont très recommandées pour les analyses de la susceptibilité à moyenne échelle (1:25,000–1:50,000) (Jiménez-Perálvarez, Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS, 2009).

Elles peuvent être scindées en deux groupes : les méthodes statistiques multi variées et la méthode statistique bi variée.

Dans les méthodes statistiques multi variées tous les facteurs de prédisposition sont traités ensembles et leurs interactions aident à résoudre le phénomène statistiquement (Dat04). Autrement dit, les cartes des facteurs de prédisposition sont croisées avec les cartes de distributions des mouvements de terrain, et une corrélation est établie pour les zones stables et instables en employant des analyses discriminantes telles que les régressions multiples linéaires et logistiques ainsi que les réseaux de neurones (Carrara, 1995) (Chung) (Guzzetti, 1999) Ermini, et al., 2005).

L'un des premiers travaux d'analyses statistiques multi variées était celui de Carrara et al. (1977). L'analyse statistique permet, alors, de dire quel facteur ou quelle combinaison de facteurs explique le mieux les occurrences de mouvements de terrain.

Les régions sans mouvements de terrain qui présentent des scores équivalents à celles associées aux mouvements de terrain sont alors considérées comme sujettes aux futurs mouvements (Dewitte, 2006).

En revanche dans la méthode statistique bi variée les facteurs de prédisposition ne sont pas corrélés entre eux (Süzen et Doyuran, 2004). Autrement dit, l'inventaire des mouvements de terrain est comparé séparément avec chaque facteur de prédisposition et l'influence de chaque facteur est déterminée indépendamment des autres facteurs.

Ces méthodes sont basées sur le principe que les facteurs importants conduisant à l'apparition d'un mouvement de terrain sont indépendants (Mebrahatu, 2011). Diverses variétés d'analyse statistique bi variée sont à distinguer. Parmi lesquelles, on peut citer : la méthode « Weights of evidence » (Bonham-Carter et al. 1988; Agterberg et al. 1989 ; Poli et Sterlacchini, 2007).

La méthode d'indexation des mouvements de terrain (Van Westen, 1993 ; Van Westen et al., 1997) et la méthode de la matrice (DeGraff et Romesburg, 1980; Maharaj, 1993; Irigaray, 1995; Cross, 1998; Irigaray et al., 1999 ; Clerici et al., 2002 ; Chacón et al., 2006 ; Irigaray et al., 2007; Jiménez-Perálvarez et al., 2009 ; Costanzo et al., 2012 ; Jiménez-Perálvarez, 2012 ; Boualla et al., 2016).

C'est cette dernière méthode qui a été utilisée dans le présent travail, d'une part pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain et d'autre part pour évaluer la susceptibilité aux dolines d'effondrement.

Il s'agit d'une technique d'analyse statistique bi variée suffisamment démontrée et validée (Chacón et al. 2006).

III.2.3 Les méthodes probabilistes

Les méthodes probabilistes permettent de réaliser des modèles de susceptibilité en analysant les relations statistiques entre la distribution spatiale des mouvements de terrain connus et celle de l'ensemble des facteurs de prédisposition (Ozdemir, 2009 ; Yilmaz, 2010 ; Oh et Lee, 2010b ; Oh et Lee, 2011 ; Pourghasemi et al., 2013 ; Gutiérrez et al., 2014). Ces méthodes se basent sur les probabilités et sur la logique floue (Zadeh, 1965, 1978), notamment l'approche bayésienne qui s'appuie sur le rapport de vraisemblance et sur la fonction de croyance de Dempster-Shafer (Chung et Fabbri, 1999 ; Clerici et al., 2002 ; Zêzere et al., 2004 ; Pourghasemi et al. 2012a). Les méthodes probabilistes se basent aussi sur des fonctions monotones croissantes du rapport de vraisemblance : la fonction «Weights of Evidence» (Mohammady et al. 2012) et la fonction «Certainty Factor» (Pourghasemi et al. 2012b).

III.2.4 Les méthodes déterministes

Les méthodes déterministes s'appuient généralement sur la combinaison entre les données topographiques, les conditions hydrologiques (saturation du sol et perméabilité) et les propriétés géotechniques des sols (cohésion et angle de friction), pour la réalisation des analyses de stabilité de pente et la détermination d'un facteur de sécurité « Fs » (Selby, 1993). Ces méthodes permettent de produire des modèles de susceptibilité aux mouvements de terrain qui ressemblent aux modèles

réalisés par les méthodes statistiques (Dewitte, 2006), mais elles s'appliquent le plus souvent à grande échelle.

III.3 Cartographie de l'inventaire des mouvements de terrain

Les cartes d'inventaires représentent la cartographie des zones où les mouvements de terrain se sont produits (Highland et Bobrowsky, 2008). Ces cartes d'inventaires des mouvements de terrain peuvent être classées selon leur échelle et le type de la cartographie (Guzzetti et al., 2000 ; Galli et al., 2008 ; Guzzetti et al., 2012). En se basant sur l'échelle de la carte, on distingue des cartes d'inventaire à petite échelle (1:25,000) préparées en utilisant les photographies aériennes à une échelle supérieure à 1:20,000 comme les images satellites à haute résolution, les modèles numériques du terrain et les investigations étendues sur le terrain. Selon le type de la cartographie, les cartes d'inventaire des mouvements de terrain sont subdivisées en deux classes ; des inventaires archives et des inventaires géomorphologiques (Guzzetti et al., 2000 ; Malamud et al., 2004). Les inventaires archives donnent des informations, sur les mouvements de terrains, obtenus à partir de la littérature et d'autres sources d'archives. Tandis que les inventaires géomorphologiques peuvent être également classés en inventaires historiques, événementiels, saisonniers ou multitemporels. L'inventaire géomorphologique historique présente des mouvements de terrain qui sont apparus durant une période de dizaines, de centaines ou de milliers d'années (Cardinali et al., 2001 ; Galli et al., 2008 ; Guzzetti et al., 2012).

L'inventaire événementiel montre les mouvements de terrain causés par un seul événement déclencheur, par exemple un séisme ou une forte pluviométrie (Dai et al., 2010 ; Tsai et al., 2010 ; Gorum et al., 2011 ; Parker et al., 2011 ; Guzzetti et al., 2012). En exploitant un grand nombre d'images aériennes ou satellites, des inventaires saisonniers ou multi temporels peuvent être réalisés (Guzzetti et al. 2012). L'inventaire saisonnier montre les mouvements de terrain déclenchés par un seul ou plusieurs événements durant une seule ou plusieurs saisons (Fiorucci et al. 2011), alors que les inventaires multi temporels illustrent les mouvements de terrain déclenchés par de multiples événements durant de longues périodes (Galli et al. 2008). La date des mouvements de terrain dans les inventaires saisonniers ou multi temporels est représentée par la date de l'événement déclencheur, de l'imagerie ou de l'enquête sur le terrain (Guzzetti et al. 2012).

La qualité de l'inventaire repose sur la précision de la cartographie de terrain ainsi que sur le type et l'exactitude de l'information géographique et thématique représentée sur la carte (Guzzetti et al., 2012). La taille du plus petit mouvement de terrain reporter sur la carte d'inventaire, permet de juger si l'inventaire est complet ou non. En effet, pour dire qu'un inventaire est statistiquement

presque complet, Malamud et al. (2004) exige que la surface des glissements de terrain, représentés sur la carte d'inventaire, soit supérieure à 225 m². En addition, la précision géographique de l'inventaire mesure le degré de conformité entre la cartographie du mouvement de terrain et la position, ainsi que la taille et la forme du même mouvement (Santangelo et al., 2010). De plus, la précision thématique se réfère à l'exactitude de l'information complémentaire associée à chaque mouvement de terrain dans un inventaire, telle que le type du mouvement, l'âge estimé, la profondeur de la rupture et le degré d'activité (Guzzetti et al., 2012). Cependant, la précision d'un inventaire dépend de plusieurs facteurs (Guzzetti et al., 2012) :

- L'échelle, la date et la qualité des photographies aériennes, ou les caractéristiques de l'image satellite (la résolution radiométrique, la date, la présence de nuages),
 - Le type, l'échelle et la qualité de la carte de fond utilisée pour représenter les mouvements de terrain,
 - Les outils utilisés pour l'interprétation et l'analyse de l'imagerie, incluant les stéréoscopes, les ordinateurs et les logiciels de visualisation 3D,
 - Les compétences et l'expérience des interpréteurs. En résumé, les cartes d'inventaire des mouvements de terrain représentent une étape indispensable pour la réalisation des cartes de susceptibilité aux mouvements de terrain (Soeters et van Westen, 1996 ; Guzzetti et al., 1999 ; Chung et Fabbri, 1999, 2003, 2005).

Certains auteurs les considèrent comme étant un genre de carte élémentaire de susceptibilité, parce qu'elles localisent un type particulier de mouvement de terrain (Dewitte, 2006).

Conclusion

Plusieurs méthodes de cartographie alternative existent, permettant d'obtenir des résultats performants et terme de qualité de zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain.

L'application de ces méthodes requièrent une longue procédure ainsi des données tel que l'inventaire des glissements de terrain et les facteurs de prédisposition. L'utilisation du Système d'information géographique (SIG) et les méthodes statistiques permettant d'aboutir une analyse de la distribution spatiale des phénomènes étudiés, leur densité et la pondération de chaque facteur.

La validation des résultats permet de sélectionner le modèle le plus adapté pour chaque zone d'étude.

Chapitre IV

Les paramètres utilisés dans
l'évaluation de la
susceptibilité

IV.1 Introduction

Les glissements de terrain apparaissent lorsque les sols ou des roches se déplacent, fragilisés par les activités humaines ou par des phénomènes naturels qu'ils soient climatiques, géologiques ou encore géomorphologiques. Ils représentent une menace sérieuse pour les vies et les activités humaines,

L'objectif de ce chapitre est de définir en premier lieu les différentes méthodes et techniques d'inventaire des glissements de terrain et en deuxième lieu les facteurs de prédispositions, la Collecte et l'inventaire des données sur l'occurrence et l'activité des mouvements de terrain sur de grandes zones constitue un point crucial pour la gestion des risques liés aux mouvements de terrain (Hervas, 2003).

Les mouvements de terrain sont particulièrement difficile à localiser, présents en grand nombre, sur de larges étendues et souvent situés dans des endroits difficiles d'accès.

L'inventaire des glissements de terrain basé sur de différents critères morphologiques (forme de la niche d'arrachement, trace de coulée, déplacement superficiel, bourrelet, drainage superficiel, forme générale du glissement, position sur le versant, dimensions) et de l'aspect de la couverture végétale.

IV.2 Méthodes et technique d'inventaire des glissements de terrain

IV.2.1 Acquisition de l'information avec Google Earth

Les méthodes employées pour la récolte, le traitement et l'analyse des données sont basées sur l'analyse des images Google Earth. Depuis 2005, Google Earth fournit en libre accès une couverture dans le monde entier d'images à haute et très haute résolution spatiale.

Cette mine d'informations a fourni de nouvelles possibilités d'exploiter les images satellites pour la détection et la cartographie de glissements de terrain notamment en exploitant la visualisation en 3D et les couvertures multi-temporelles (FISHER et al. 2012 ; GUZZETTI et al. 2012 ; COROMINAS et al. 2014). Il faut cependant reconnaître quelques difficultés dues au fait que les images peuvent être de qualité variable et que des décalages peuvent exister au niveau des jointures (FISHER et al. 2012).

La reconnaissance de différents processus de mouvement gravitaire n'est pas aisée d'autant qu'il existe de nombreux types de mouvements ayant chacun des caractéristiques morphologiques plus ou moins différentes (HUNGR et al. 2013). Même si l'interprétation d'images satellitaires ne permet pas une identification rigoureuse de tous les types de processus, il est important

d'endifférencier au minimum les grandes catégories. Chaque type de glissements de terrain répond à des conditions environnementales qui ne sont pas nécessairement identiques et leurs impacts peuvent être très différents (CRUDEN & VARNES, 1996 ; GLADE & CROZIER, 2005). Dans l'analyse des risques liés aux glissements de terrain, COROMINAS et al. (2014) recommandent de prendre en compte les éléments à risque qui peuvent être affectés par l'apparition de phénomènes dangereux, tels que la population, les biens ou l'environnement. Les images Google Earth sont utilisées pour l'identification de ces éléments.

IV.2.2 Approches GPS disponibles

L'observation des déplacements en surface représente le moyen le plus simple et le plus utilisé pour la surveillance des zones de glissement. Le développement et la standardisation fulgurants au cours des deux dernières décennies de l'outil GPS (Global Positioning System) ont permis d'accroître considérablement les potentialités de mesures de positionnement.

La facilité d'acquisition et la précision se sont en effet trouvées accrues et un enregistrement automatique et continu s'est avéré possible. Les résultats escomptés des mesures GPS pour l'étude des glissements de terrain sont rentables et efficaces du point de vue des temps et coûts de mesure ainsi que des délais d'accès aux données, par rapport à d'autres méthodes ayant même vocation. Cet outil permet de recueillir une quantité importante de données, en particulier lors de l'installation de stations permanentes. Une longue chronique du déplacement au niveau de points d'un glissement de terrain améliore la connaissance de la cinématique de la zone sur le long terme.

Au cours des années 2000, les techniques GPS ont été largement appliquées pour surveiller les mouvements superficiels de zones instables, ceci en complément ou en guise d'alternative aux méthodes conventionnelles (théodolites, inclinomètres, ...). Les résultats de différents travaux portant sur la surveillance par GPS de glissements de terrain mettent en évidence l'aide précieuse de cet outil dans le cadre des mouvements de surface d'une vitesse de quelques cm par mois à plusieurs cm par jour (*Mora et al, 2003*).

IV.2.3 L'inventaire par L'apport de la télédétection : L'utilisation de la télédétection optique pour l'analyse des mouvements de terrain

Jusqu'à présent, la méthode de télédétection la plus utilisée pour l'étude des mouvements de terrain a été la photo-interprétation visuelle d'ortho photographies pour localiser les mouvements déclarés ou des zones susceptibles d'avoir été affectées (fig. 24). Du fait du développement de nouvelles techniques d'observation par télédétection, de la disponibilité d'images satellites à très haute résolution (VHR, Very High Résolution) proposées par les nouveaux satellites tels que Ikonos (1999, résolution de 1m), SPOT 5 (2002, résolution optimale de 2,5m) ou Quickbird (2001,

résolution optimale de 0,61m) et du développement de nouvelles méthodes de traitement d'images. Les techniques de télédétection, les supports images et les méthodes de traitement utilisé pour l'étude des glissements de terrain vont dépendre du domaine d'application. On relève trois grands domaines d'application de l'utilisation de la télédétection pour l'étude des mouvements de terrain :

- la localisation et l'inventaire
- la caractérisation
- le suivi des déplacements et des volumes. (Monique. M 2008)

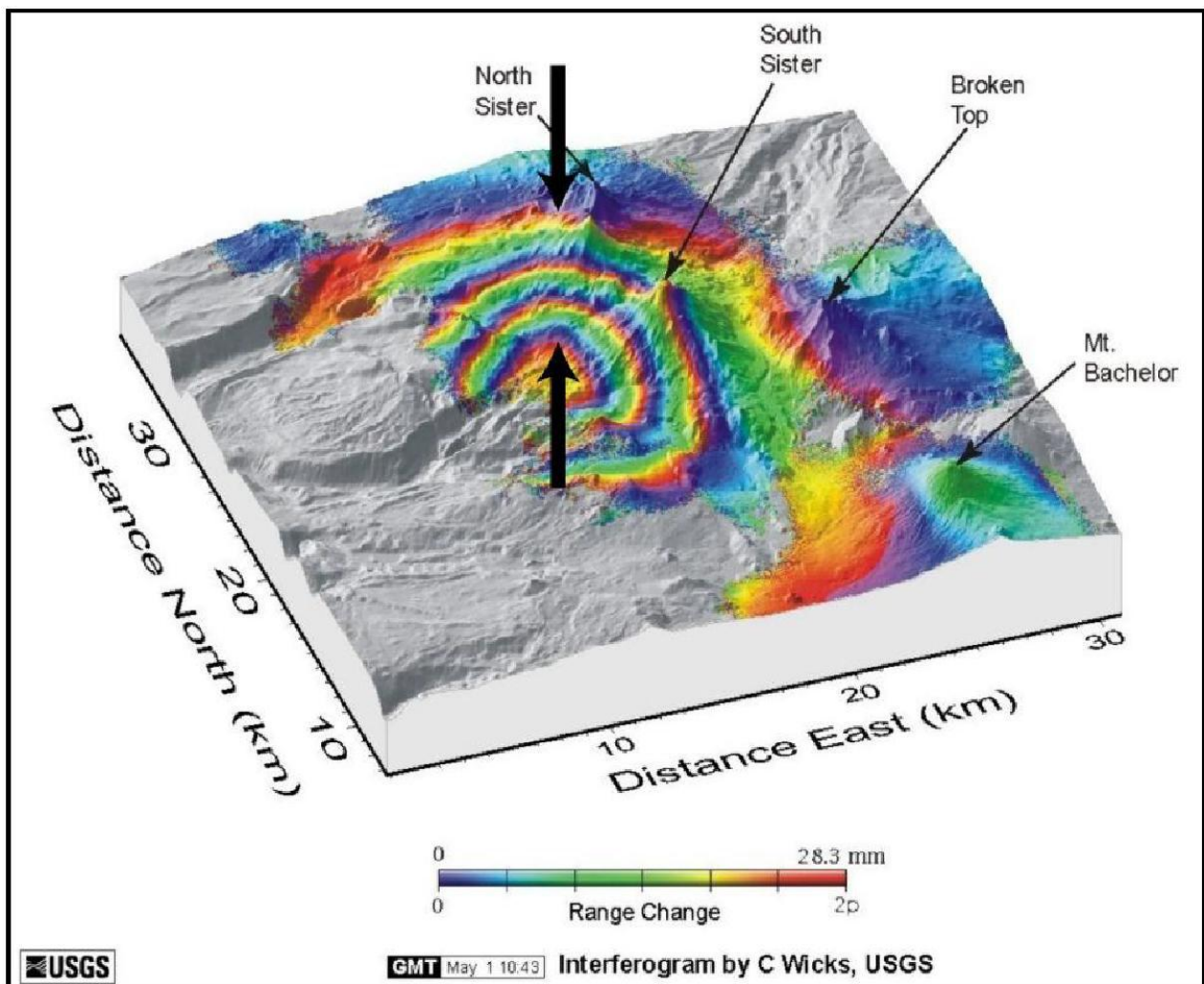


Figure 24 : Déformations par imagerie InSAR, les zones rouges ont subi des déplacements de l'ordre de 20mm, image C Wicks, USGS (hélène H 2017).

IV.2.3.1 La localisation et l'inventaire

a. Méthode géomorphologique (dite 'experte')

La méthode d'inventaire des glissements de terrain la plus classique est la méthode dite 'experte' consistant à faire des prospections de terrain dans les zones les plus susceptibles d'être touchées par des instabilités de versant pour y repérer les signes géomorphologiques de la présence

de glissements de terrain. Cela nécessite une connaissance experte des caractéristiques spécifiques des mouvements de terrain et beaucoup de temps ainsi que des financements. Cependant, avec l'arrivée des premières photographies aériennes, les prospections de terrain ont été combinées à l'analyse d'ortho photographies, celles-ci permettant de repérer les zones d'instabilités à l'avance et ainsi de cibler les sites à prospector. Ainsi, jusqu'aux années 90, la technique de télédétection la plus utilisée pour la cartographie et le suivi des caractéristiques (distribution et classification) et des facteurs de déclenchement (pente, lithologie, structure géologique et géomorphologique, occupation du sol, anomalies géologiques) des glissements de terrain était l'interprétation visuelle de photographies aériennes, et plus particulièrement l'interprétation de photographies aériennes par stéréoscopie l'utilisation de l'imagerie stéréoscopique est très importante pour la détection de morphologies caractéristiques créés par les glissements de terrain et qu'à ces unités géomorphologiques peuvent être associées des éléments caractéristiques tels que les escarpements, les discontinuités du couvert végétal, les perturbations de l'humidité des sols ou des conditions de drainage (Mantovani et al. (1996).

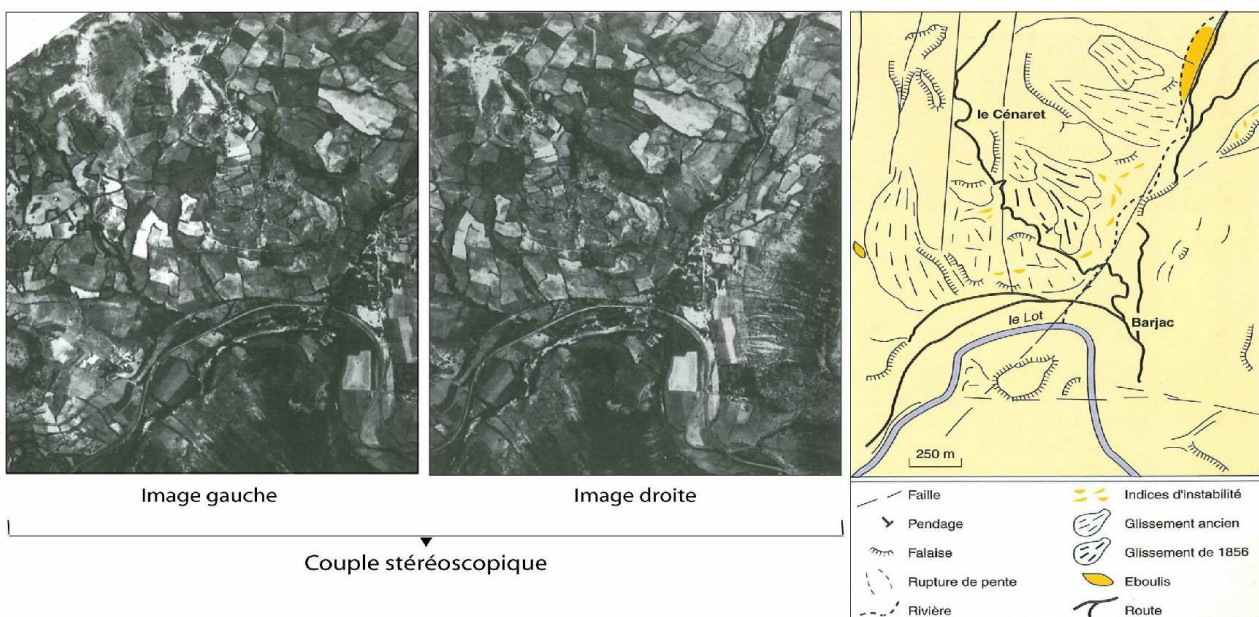


Figure 25 : Identification visuelle de glissements de terrain à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes. Exemple des glissements de terrain du versant rive droite de la Ginèse au niveau de Barjac (Lozère).

b. Méthode de traitement d'images semi-automatiques et automatiques

Un des grands avantages des méthodes d'identification semi-automatiques est qu'elles permettent de s'affranchir de la subjectivité imposée par les méthodes expertes. De plus, elles apportent un gain de temps considérable par rapport aux méthodes manuelles longues à mettre en

œuvre.

Les méthodes semi-automatiques de classification d'images satellites à moyenne résolution basées sur le pixel, très utilisées pour les analyses d'occupation des sols par exemple, n'ont pas, ou très peu, été appliquées à l'identification des mouvements de terrain.

Ces techniques de traitements d'images classiques basées sur les valeurs spectrales de pixels et qui ont fait leurs preuves sur des images satellites à moyenne résolution (> à 5 m) se trouvent remises en cause avec l'avènement d'images à très haute résolution spatiale (50 cm à 2,5 m) (Boulaassal, 2008).

En effet, la classification d'images THR, du fait de la précision et du grand nombre de pixels, qui enlèvent tous ses avantages à la classification supervisée.

Cependant, l'avènement de nouvelles techniques de traitement dites 'orientées objets' donne de nouvelles perspectives en ce qui concerne la classification des images THR. Ces nouvelles méthodes d'extraction automatique passent par une étape de segmentation, c'est-à-dire un découpage de l'image en zones homogènes de pixels selon un critère spectral appelées régions. Ces régions peuvent être ensuite utilisées comme 'régions d'intérêt' dans une classification classique de type supervisée (par exemple selon la méthode du plus proche voisin). Elles peuvent également être caractérisées par différents critères (taille, forme, texture, contexte, etc.) et être utilisées comme règles de classification dans un processus fondé sur des opérateurs de logiques floues.

L'avantage de ce type de méthode est qu'il permet de former des régions homogènes qui serviront de base à la classification. Plusieurs essais de mise au point de méthodes de reconnaissance semi-automatique d'unités géomorphologiques en utilisant la méthode d'analyse 'orientée objet' ont déjà été réalisés en utilisant le logiciel ECognition. Les données source utilisées sont de trois types:

1. données externes, i.e. cartographiques (carte géomorphologique ou topographiques (MNT, Lidar)) (Van Asselen 2006)
2. ortho photographies (Molenaar, 2005),
3. images satellite (Argialas et Tzotsos, 2006).

Trois exemples de travaux de recherche utilisant chacun un de ces types de données source sont présentés ci-dessous :

Van Asselen et Seijmonsbergen ont utilisé l'analyse 'orientée objet' pour tester une méthode semi-automatique d'identification d'éléments du paysage (terrasses fluviales, cônes de déjection, versant touché par des mouvements de terrain, talus de versant, falaise rocheuse, formes glaciaires,

chenaux) d'une région montagneuse d'Autriche à partir d'une carte géomorphologique, d'un MNT LiDaR et d'une carte des pentes dérivée du MNT LiDaR. La méthode a consisté en 5 étapes :

Délimiter les unités géomorphologiques à détecter sur une carte géomorphologique,

1. faire une analyse statistique des caractéristiques d'élévation et de pente de chaque type d'unité à partir de la carte géomorphologique et d'un MNT Lidar,
2. segmenter l'image des pentes extraites du Lidar
3. classifier l'image segmentée par une classification par règles guidée par les statistiques de l'étape 2 et la connaissance experte et,
4. comparer la carte des unités géomorphologiques produite par la méthode semi-automatique la carte géomorphologique experte de base.

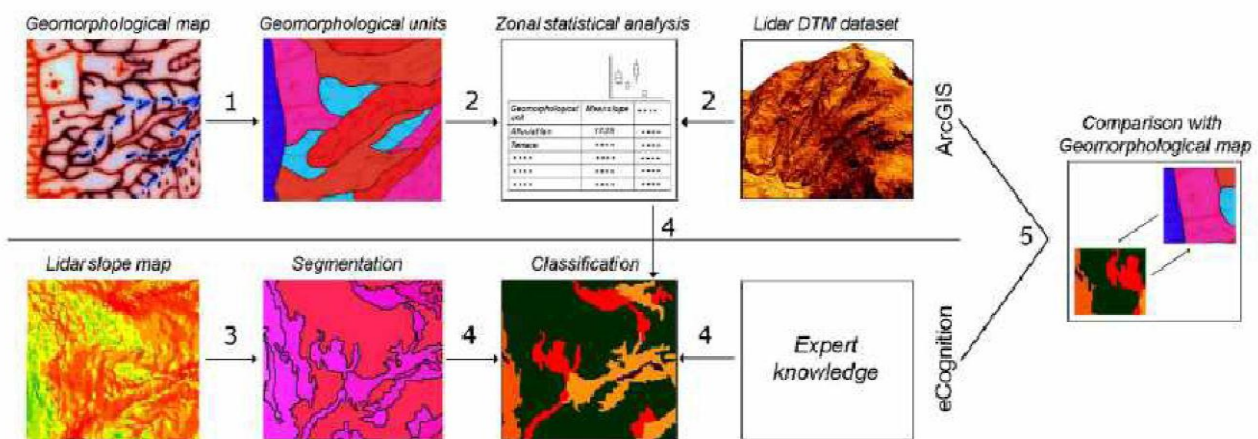


Figure 26 : Organigramme de la méthode semi-automatique experte de classification du paysage en unités géomorphologiques mise en place par Van Asselen et Seijmonsbergen (2006) (Van Asselen et All, 2006).

IV.2.3.2 Caractérisation

La caractérisation des mouvements de terrain correspond à la description en détail des éléments qui le composent (escarpement, zone d'accumulation, état de dégradation des fissures).

Les méthodes classiques de caractérisation des mouvements de terrain passent par une observation directe des caractéristiques sur le terrain et/ou par l'interprétation de photographies par stéréoscopie.

Une approche complémentaire à l'approche par photo-interprétation visuelle, quantitative, en estimant les dimensions (longueur, largeur, épaisseur et pente, vitesse de déplacement, et distribution des débris) le long et en travers du glissement en utilisant le stereo SAR, l'interférométrie SAR et les profils topographiques (par altimétrie LASER) (Metternicht et al. 2005).

IV.2.3.3 Les caractéristique et paramétrage de la déformation de terrain

Le suivi d'un mouvement de terrain peut se définir comme la comparaison de conditions telles que l'extension surfacique, la vitesse de déplacement, la topographie de surface ou l'humidité à différentes périodes pour caractériser l'activité d'un mouvement de terrain (Mantovani et al, 1996).

L'activité d'un glissement peut également être suivie et cartographiée par détection automatique des changements : les pixels ayant changé de caractéristiques entre deux images optiques de deux dates différentes peuvent être classifiés automatiquement (Hervas et al).

(2003). les techniques de télédétection radar s'avèrent être le moyen le plus adapté au suivi des mouvements de terrain. Elles permettent une grande précision de suivi (de l'ordre du cm) à une résolution temporelle élevée. L'interférométrie SAR (InSAR), satellite ou terrestre, est la technique qui a été la plus étudiée durant la dernière décade pour le suivi de la déformation des versants l'interférométrie SAR est une technique potentiellement utile pour enregistrer les déplacements de mouvements de terrain ayant une vitesse de déplacement de quelques centimètres par jour.

IV.3 Processus d'étude d'un glissement de terrain

IV.3.1 Repérage topographique d'une zone instable

a. Etablissement d'un plan topographique à grande échelle

Vue à l'insuffisance des cartes topographique à petite échelle, il est indispensable d'entreprendre un levé topographique à grande échelle, afin de repérer la zone glissée, d'en tirer un plan en courbes de niveau, et des profils jalonnées. Les levés géométriques périodiquement réalisés, permettent de suivre l'évolution des glissements.

b. Repérage des éléments caractéristiques du glissement de terrain

Les éléments auxquels on doit prêter attention lors du levé topographique de terrain sont essentiellement :

- Les arbres, inclinés droit ou tordus constituent les repères courants souvent les seuls dans les zones non urbanisées.
- Les poteaux électriques ou téléphoniques verticaux ou inclinés.
- Les murs de soutènement ou de construction, fournissent par l'observation des divers, des ventres, des fissures, de bon repères.
- L'existence de faille de plis et d'autre indice géologique.
- Les routes et les chemins de fer dont l'état détérioration témoigne d'un mouvement actif du terrain.

- les fissures de traction. (yahiaoui A et all 2013.

IV.3.2 L'enquête historique

La chronologie d'une zone instable est intéressante à reconstituer. Elle permet de mieux comprendre les causes profondes de la pathologie du glissement. Les archives administratives constituent autant de sources documentaires pour une enquête qui peut se faire suivant différentes démarches méthodologiques. Pour les événements récents, le recueil des témoignages est souvent pratiqué, notamment dans la recherche de la vitesse et du mode de glissement de terrain. La chronologie d'une zone instable est intéressante à reconstituer, car elle permet souvent de faire paraître une succession d'unités glissées d'âges différents, ou à partir d'un glissement connu pour découvrir d'autres phénomènes (yahiaoui A et all 2013).

IV.3.3 Etude géologique et géomorphologique

La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles. Il est important que l'étude géologique s'étend sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable, ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs.

La réalisation d'une série de coupes géologiques selon les lignes de plus grande pente permet de formuler une première hypothèse sur la position en profondeur de la surface de glissement.

Les éléments tectoniques qui doivent être définis sont le pendage des couches en place et la fissuration qui affecte ces couches. Ce n'est qu'ensuite après qu'on procède à l'exécution de sondage et autres investigations profondes et approfondies, implantation des sondages, essais géotechniques (yahiaoui A et all 2013).

Une étude géotechnique consiste à définir toutes les caractéristiques mécaniques d'un sol à partir d'essai in-situ et au laboratoire

Cette étude a pour but de :

- Définir avec précision la géologie du site étudié.
- Mesurer l'épaisseur des diverses formations rencontrées ainsi que leurs pendages.
- Définir la forme générale de la masse en mouvement et donc la position de la surface de glissement.
- Mesurer les caractéristiques mécaniques des couches de sol rencontrées.
- Repérer le niveau piézométrique des formations aquifères (G.Philipponnat, 1998).

IV.4 Les factures de prédispositions

La stabilité d'un versant est lié d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement, ...). En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (Érosion torrentielle, érosion météorique, facteurs anthropiques, etc...). Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence des matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorable à la rupture. La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles, etc. Il est important que l'étude géologique s'étende sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable ; ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs (LEBOURG,2000).

Dans le cas de séisme, il se produit une émission d'ondes sismiques de deux types qui se propagent dans le sol : les ondes de volume dites ondes longitudinales et transversales, et les ondes de surface dites ondes de love de Rayleigh. Ces ondes sismiques provoquent des sollicitations, ce qui peut conduire à des mouvements de terrain. Les déstabilisations dues au séisme peuvent se manifester de différentes façons. Elles peuvent provoquer immédiatement des glissements de terrain, des coulées, des chutes de blocs, et elles peuvent aussi avoir des effets à long terme, par augmentation de la fissuration du massif rocheux et diminution de sa résistance mécanique.

D'autre part les Facteurs hydrogéologiques et pluviométriques, La variation des conditions hydrauliques est l'une des principales causes de glissement de terrain et son action dans la rupture de l'équilibre se manifeste de plusieurs façons et à différents stades.

Et Facteurs anthropiques, L'aménagement de terrain provoque des déséquilibres qui généralement, à l'échelle humaine, passent inaperçus, mais lorsqu'une situation est à l'état d'équilibre précaire, la moindre intervention peut générer des désordres importants. Malgré l'état actuel des connaissances, il est encore fréquent de constater des instabilités, suite à des travaux et à une mauvaise anticipation de la stabilité.

La variation des conditions hydrauliques est l'une des principales causes de glissement de terrain et son action dans la rupture de l'équilibre se manifeste de plusieurs façons et à différents stades. Peut être considérée à la fois comme un facteur de prédisposition et comme un facteur

déclenchant. La proximité au réseau de drainage, la taille ou l'ordre des bassins versants, la localisation des nappes et zones humides sont généralement attribués aux facteurs de prédisposition. Les facteurs déclenchant concernent les précipitations, les niveaux et battements de nappe, le régime des cours d'eau, etc. (Fressard.M ; 2013).

IV.4.1 L'occupation du sol

Est également un facteur très important dans la genèse des processus de mouvements de versant. Différents types de données thématiques peuvent être utilisés, de la simple carte d'occupation du sol, aux cartes de densité ou de profondeur/extension racinaires des différentes formations végétales. Ces cartes nécessitent des mises à jour fréquentes, notamment dans les milieux fortement anthropisés, où l'occupation du sol est soumise à des évolutions importantes sur des pas de temps relativement courts (évolution des pratiques agricoles, urbanisation, etc.). La photo-interprétation, la classification d'images satellites, la collecte de bases de données nationales ou internationales et les levés de terrain sont les principales méthodes permettant d'obtenir des données sur l'occupation du sol. (Fressard ; M.2013) 'L'occupation du sol est un paramètre non négligeable dans l'élaboration de cartes de susceptibilité par SIG (van Westen et al. 2006). Comme pour les MNT, cette variable peut être disponible ou produite spécifiquement. (Thierry. M; 2007)

IV.4.2 La pente

Est l'un des principaux facteurs pris en compte dans l'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de terrains, Les forces de frottement et de cohésion limitent les effets de la gravité, lorsque l'équilibre des forces change, le terrain devient instable.

En effet, pour qu'une rupture survienne sur un versant, il faut nécessairement qu'il y ait un appel de vide quelque part (Ahmed Nasreddine El FAHCHOUCHE et al.2015) Il n'y a pas de règle formelle mais on a constaté que les pentes les plus sujettes aux glissements ont une inclinaison qui va de 20 à 30° (Fiche SSGM).

IV.4.3 Lithologie

La stabilité d'un versant est lié d'une part, à la nature géologique des formations le constituant et d'autre part, à sa morphologie (pente, escarpement, ...).

En effet, il existe de nombreux éléments qui interviennent dans la modification de la morphologie d'un versant (érosion torrentielle, érosion météorique, facteurs anthropiques, etc...).

Les facteurs géologiques sont souvent intrinsèques aux massifs de sols ou de roches, ils affectent sa stabilité mais aussi sa résistance à la dégradation en fonction de la présence des matériaux fragiles, altérés, cisailés ou fissurés qui se nomment matériaux favorable à la rupture.

La première étape d'une étude de stabilité des pentes est l'établissement de la structure géologique du site : nature des terrains du substratum, épaisseur des formations superficielles, présence de failles, etc. Il est important que l'étude géologique s'étende sur une zone plus large que l'emplacement précis de la zone instable ; ceci permet par exemple de mettre en évidence que le glissement actuel n'est qu'une partie d'un glissement ancien, de rechercher une alimentation en eau souterraine extérieure à la zone étudiée, ou d'utiliser l'information apportée par l'analyse d'autres glissements du même type dans les environs (LEBOURG,2000).

IV.4.4 L'hygrométrie

Influence directement les propriétés mécaniques du sol, en fonction de sa porosité. C'est un facteur prépondérant, lors d'averses plus importantes, le nombre de glissements de terrain augmente. Une teneur en eau élevée affaiblira généralement les propriétés mécaniques de l'écoulement, accélérant son déclenchement ; des cycles répétés déchargement et déchargement en eau amèneront de l'érosion. En période de gel l'eau occupe plus d'espace, générant des efforts internes importants ; le dégel modifie ensuite cet équilibre, et entraîne des déplacements plus ou moins importants. L'hygrométrie peut enfin avoir des origines humaines.

IV.4.5 L'exploitation humaine

La présence d'arbres ou de champs agricole peut venir stabiliser la pente, la déforestation peut perturber l'équilibre. Les herbes hautes plantées sur les dunes des littoraux stabilisent par leurs racines la couche supérieure et limitent l'exposition au vent.

Conclusion :

Vue la complexité et la variété des glissements de terrain, leur identification et localisation deviennent difficiles est surtout dans les zones inaccessibles (montagne), en parallèle l'inventaire des mouvements des terrains est une opération importante pour qu'on passe à évaluer le degré de la susceptibilité aux glissements de terrain. Le développement scientifique met en face des techniques et des méthodes basées sur l'exploitation des images satellites (optique et radar), les photos aériennes, positionnement par GPS ainsi que l'exploitation des résultats réalisées par les méthodes classiques telles que les archives.

Pour mieux comprendre le mécanisme des glissements de terrain il est nécessaire d'identifier les facteurs de déclenchement et de prédispositions.

Généralement, le déclenchement des mouvements des versants due à un déclenchement d'un séisme notable ou d'une forte pluviométrie. D'autres facteurs entrent aussi dans l'évolution des glissements de terrain tels que la pente, l'aspect de la pente, l'altitude, la courbure, la lithologie,

densité de la fracturation, densité de réseau hydrographique et l'occupation du sol. L'exploitation des informations collectées par l'inventaire des glissements de terrain et les différents facteurs sur un SIG permettant d'entamer une étude de zonage des sites sujettes aux glissements de terrain on se basant sur l'utilisation des méthodes statistiques (quantitative, qualitative et semi quantitative).

Chapitre V

Cas d'étude

V.1 Inventaire des glissements de terrain

Dans notre cas d'étude la carte d'inventaire est établie à partir de l'interprétation des images satellitaire Google Earth ainsi que les levées de terrain et par le positionnement via le GPS.

On mentionnant qu'aucune carte d'inventaire de glissement de terrain n'est établie dans la zone d'étude.

L'objectif de cet inventaire est de recenser, localiser et caractériser les principaux mouvements de terrain qui sont survenus dans la zone d'étude.

❖ Exemple de quelque site remarquable

L'expertise institue présente une étape fondamentale dans l'inventaire des glissements de terrain, dont laquelle le géologue experte est capable d'une part d'identifier, localiser, mesurer les glissements de terrain et d'autre part de vérifier les glissements de terrain inventorier par l'interprétation des photos aériennes, images satellite, l'archive, presse ou documents antérieures.

Dans ce travail des sorties de terrain est entamer afin de localiser et vérifier le maximum de site. L'enquête de terrain nous a permis de localiser et identifier plusieurs glissement, quelle que exemples sont motionnés dans le suivant paragraphe :

1- Un glissement de terrain de type rotationnel a été localisé à l'aide de l'interprétation de l'image satellite Google Earth (fig.a) d'une superficie d'environ 8.2 Ha. Parmi les indices d'instabilités observés est ceux la déviation de la trajectoire du cours d'eau ainsi que dégradation dans la topographie.

2- un deuxième glissement de terrain de type rotationnel est identifié à partir de l'image Google Earth, il est caractérisé par une niche d'arrachement, une surface de glissement et une zone d'ablation. Ce glissement est de superficie d'environ 9 Ha (figure b).

3- un troisième glissement de terrain de type translation al est localisé sur le terrain à partir de l'application mobile GPS Essentiel (fig.c).

4- un glissement rotationnel est identifié proximité de la route (vers le village d'Elchorfa) dont les coordonnées observées est (X_utm= 752259.7, Y_utm= 3931563.93) (fig.d).

5- un basculement des formations calcaire est observé au niveau du chemin communal lie le village d'El Gaada et Sig (fig.e). Les coordonnées du site observées est (X_utm=751309.02, Y_utm= 3930215.64).

6- Un glissement de terrain ancien de type complexe affecté les formations marneux calcaire et identifiées à partir de l'image Google Earth et vérifié sur le terrain. La superficie du glissement

de terrain est de 6.64 Ha (fig.f).

7- les éboulements des formations calcaires sont observés à côté de la route emmenant de Sig à Elchorfa (fig.g) dont les coordonnées observés est (X_utm= 752318.21, Y_utm= 3931540.77)

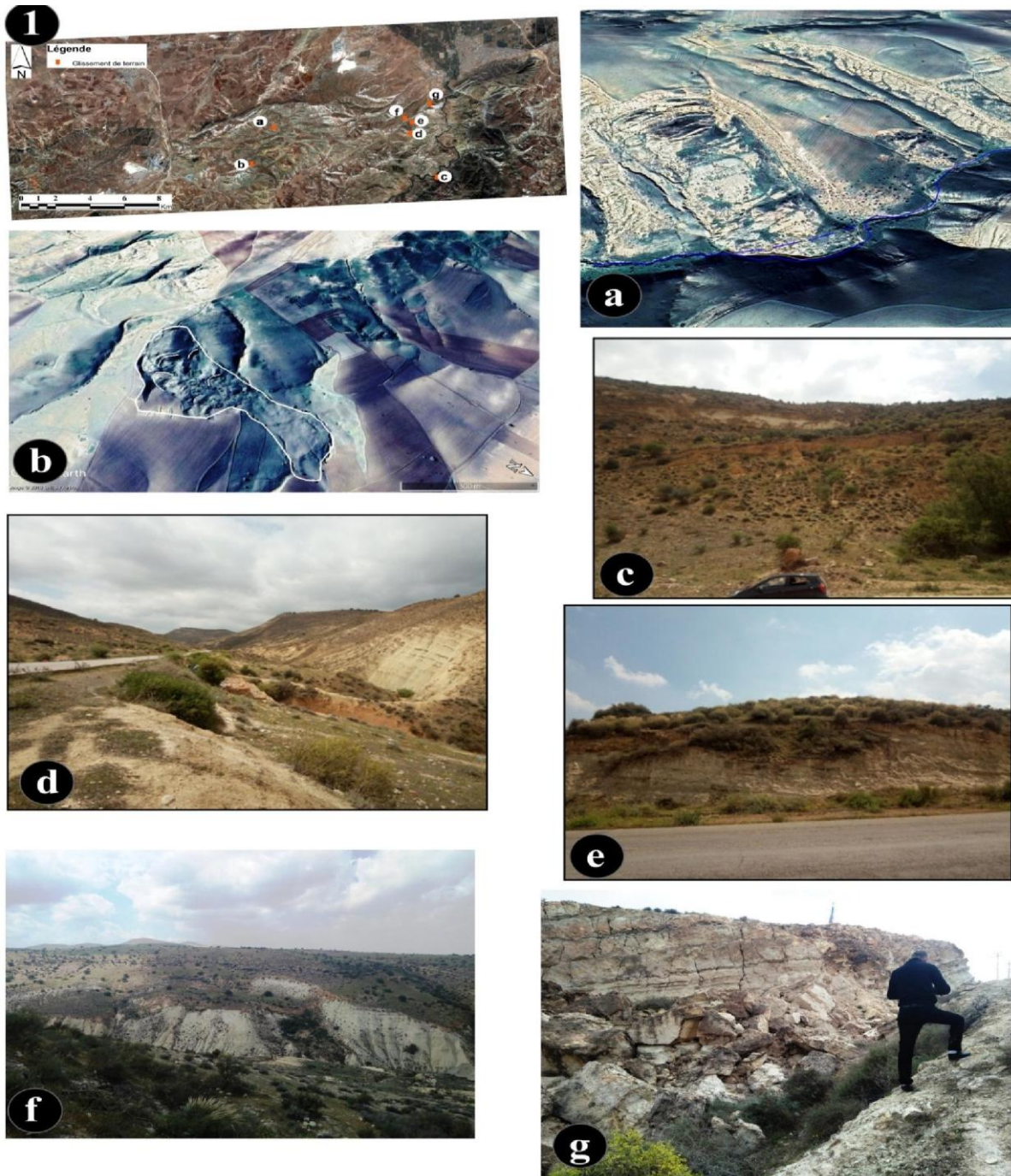


Figure 24: Exemple de quelque glissement de terrain recensé, (1) localisation des glissements de terrain (a) glissement rotationnel, (b) glissement rotationnel, (c) glissement transnational, (d) glissement transnational, (e) basculement, (f) glissement complexe, (g) éboulement.

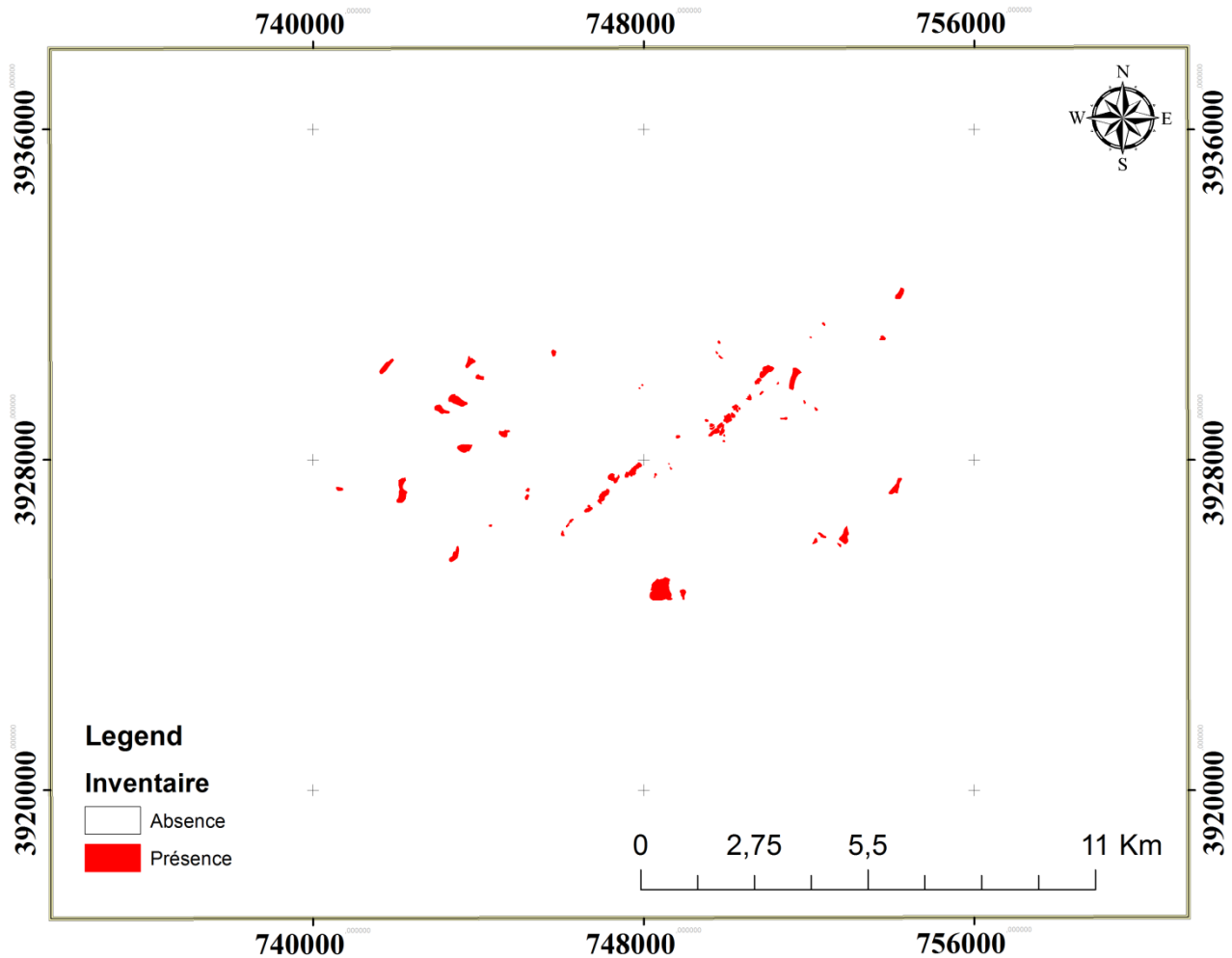


Figure28: Carte d'inventaire de glissement de terrain de la zone d'étude.

V.2 Les facteurs causatifs des glissements de terrain

Les processus à l'origine des glissements de terrain sont très complexes et diversifiés ; La géologie, le relief et l'exposition de la pente sont des paramètres fondamentaux plus au moins constants sur de longues périodes.

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence déstabilisante sur un versant tels que l'aspect de la pente, l'altitude, la géologie, la densité des linéaments, la distance par rapport aux réseaux hydrographiques et d'autres facteurs déclenchant liée à la précipitation et la circulation des eaux souterraines ainsi que les tremblements de terre qui permettent déclencher ou réactiver les mouvements de terrain.

Dans cette étude six paramètres sont intégrés dans un environnement SIG tels que la lithologie, pente, altitude, distance par rapport aux cours d'eaux, l'occupation du sol et les précipitations afin d'évaluer l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain.

V.2.1 La pente

Présente un paramètre fondamentale dans l'évaluation de la susceptibilité, la variation de la pente influe directement sur le processus de glissements de terrain ,plus la pente est forte plus la susceptibilité est élevée , dans ce contexte une carte de pente est établie a partir d'un MNT et recalculée en Cinq classes (0 – 10°),(10-20°),(20-30°),(30-40°) et (> 40°) (figure29) on utilisant les modules du logiciel ARC –GIS.

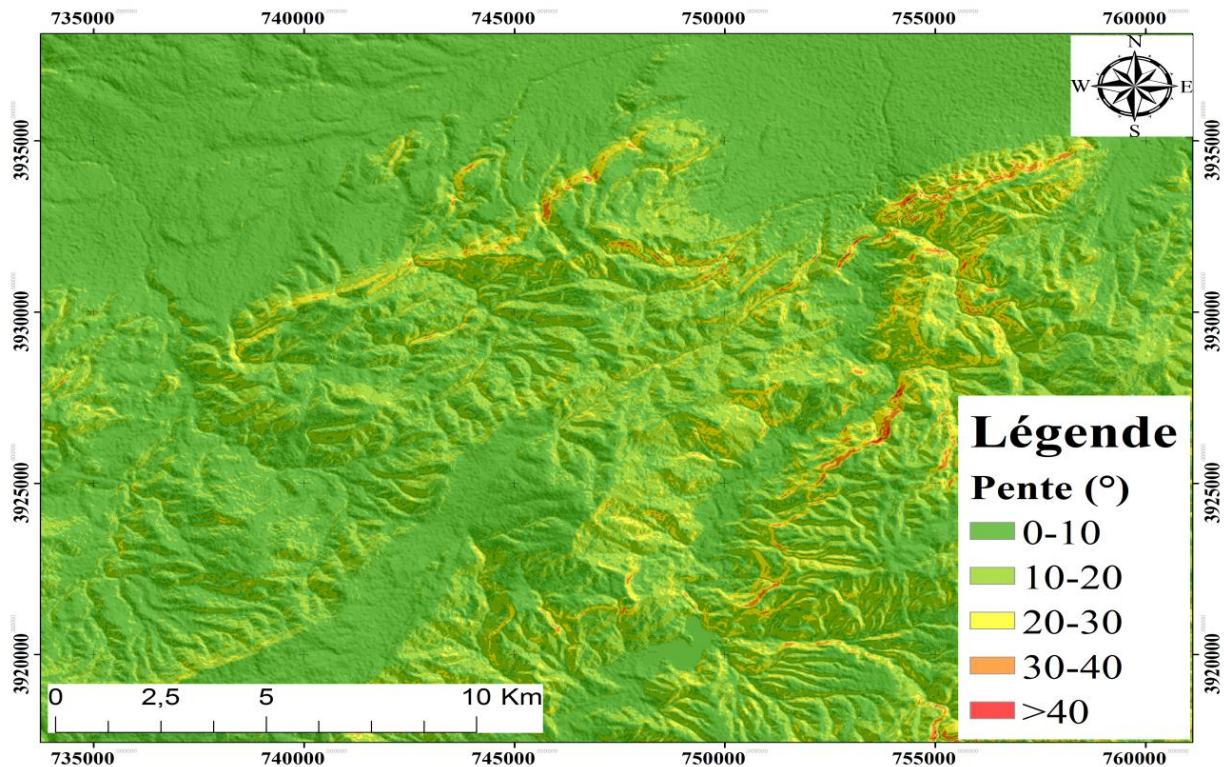


Figure 25: Carte des pentes de la zone d'étude

V.2.2 Lithologie

La nature du terrain est l'un des paramètres les plus causatifs au glissement de terrain, les caractéristiques mécaniques du terrain représentent les données de base imposées par la nature et l'histoire du terrain.

Les terrains vulnérables au glissement : par leur nature propre, certains terrains sont prédisposés au glissement, il s'agit :

- des terrains à granulométries fines (silts, limons).
- des argiles, surtout celles constituées de montmorillonite.

La perte de résistance par remaniement des sols rencontrés dans les versants naturels joue un rôle très important dans les glissements de terrains. La variation importante lithologique, dans une même formation géologique peut être à l'origine d'une répartition des mouvements de terrain.

La carte lithologique de la zone d'étude établie par la digitalisation des formations lithologiques de la carte géologique de Saint Denis de Sig à l'échelle 1/50000.

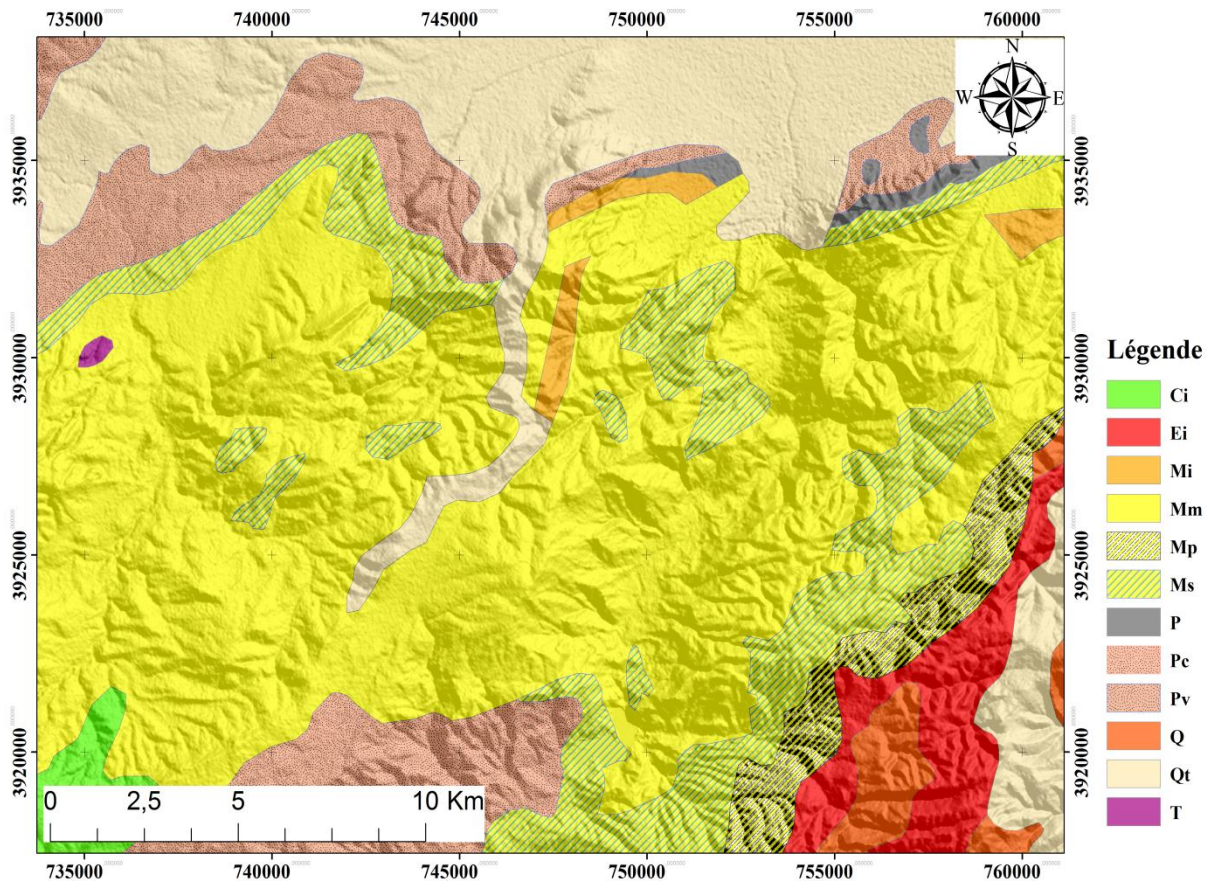


Figure 30: Carte de lithologie de la zone d'étude.

V.2.3 Précipitations

Les précipitations représentent toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre sous forme liquide ou solide.

Elles sont caractérisées par une grande variabilité dans l'espace et dans le temps, aussi bien à l'échelle annuelle qu'à celle d'un événement pluvieux.

Les précipitations sont constituées de gouttelettes dont les dimensions sont suffisantes pour avoir une vitesse de chute appréciable.

Le volume et la constance des précipitations participent au déclenchement des glissements de terrain, les zones caractérisées par des fortes précipitations sont plus susceptibles aux glissements de terrain.

La carte des précipitations des moyennes annuelles est réalisée à partir de la carte des précipitations du Nord Algérie ANRH 2005 et recalculée en quatre zones (250), (260), (270 mm / an) (figure 31).

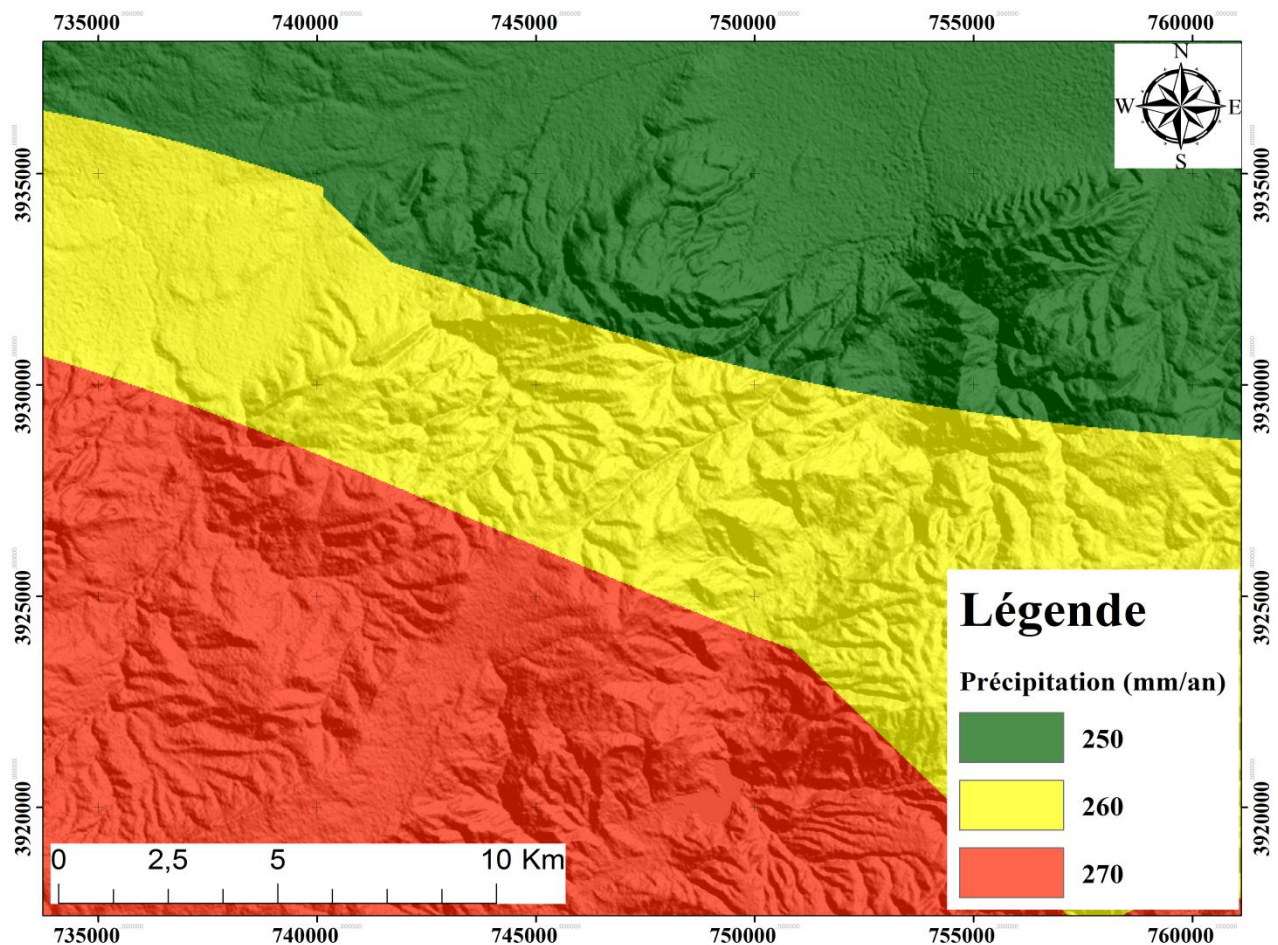


Figure 31: Carte de précipitation de la zone d'étude.

V.2.4 Distance par rapport au cours d'eau

La proximité aux cours d'eau augmente le degré de la susceptibilité aux glissements de terrain à cause de l'érosion causée par le courant d'eau qui au niveau de pied du versant, la carte a été réalisée par la classification des zones Buffer en six classes (0-50), (50-150), (150-200), (>200m) (figure 32).

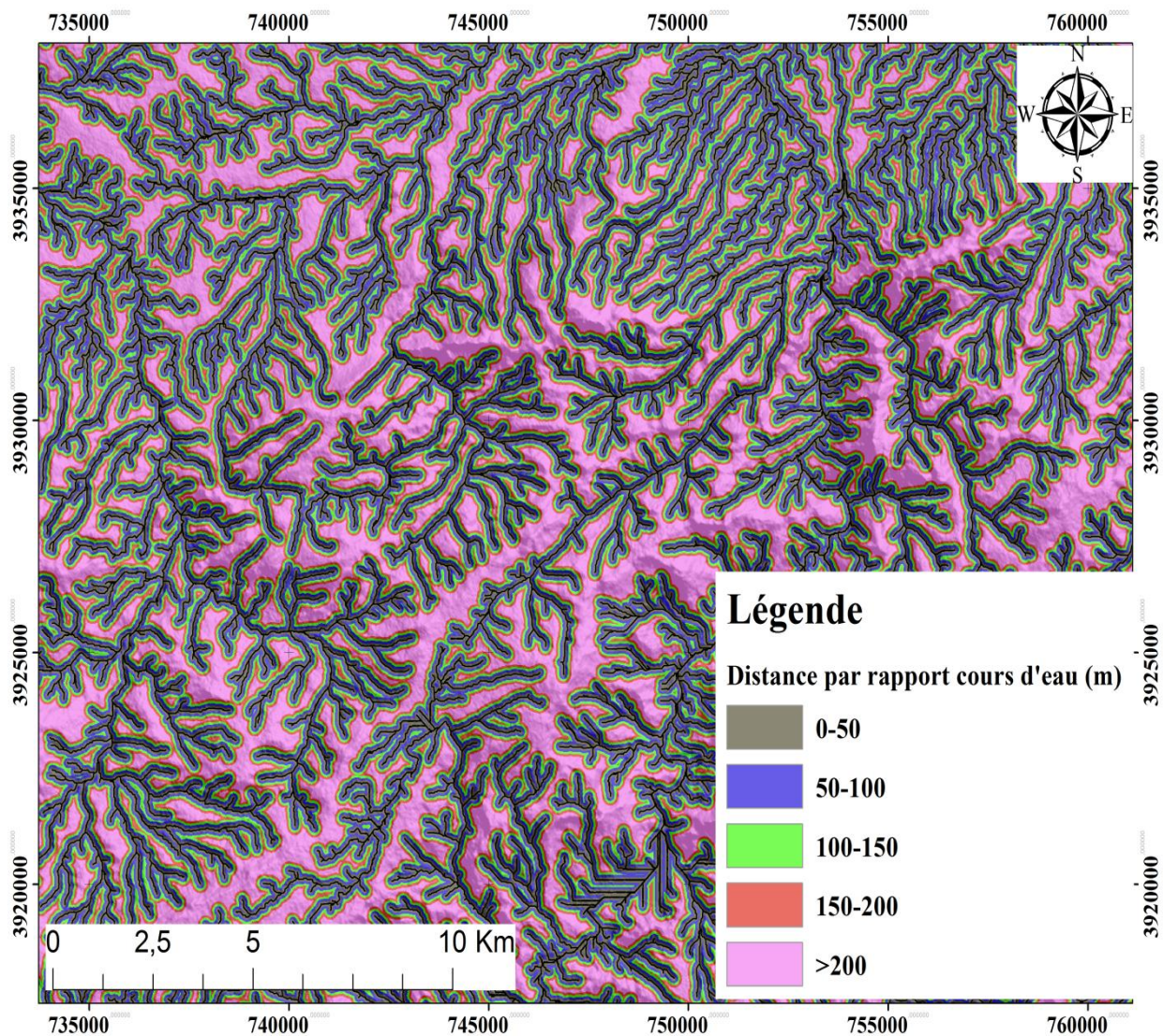


Figure 32: Carte de distance par rapport aux cours d'eau.

V.2.5 Occupation des sols

La nature d'occupation des sols joue un rôle très important dans la stabilité des versants ou les zones reboisées sont les moins sujettes aux glissements de terrains par rapport ou zone de faible densité du couvert végétale et les sols nus présentent les zones les plus susceptibles. Dans ce contexte, la carte d'occupation du sol est établie par la digitalisation des trois cartes d'occupation du sol à l'échelle de 1/25000 (BENEDER), six classes ont été déterminées (culture, forêt, terre de parcours, cours d'eau, sol nu, zone urbaine) (figure 33).

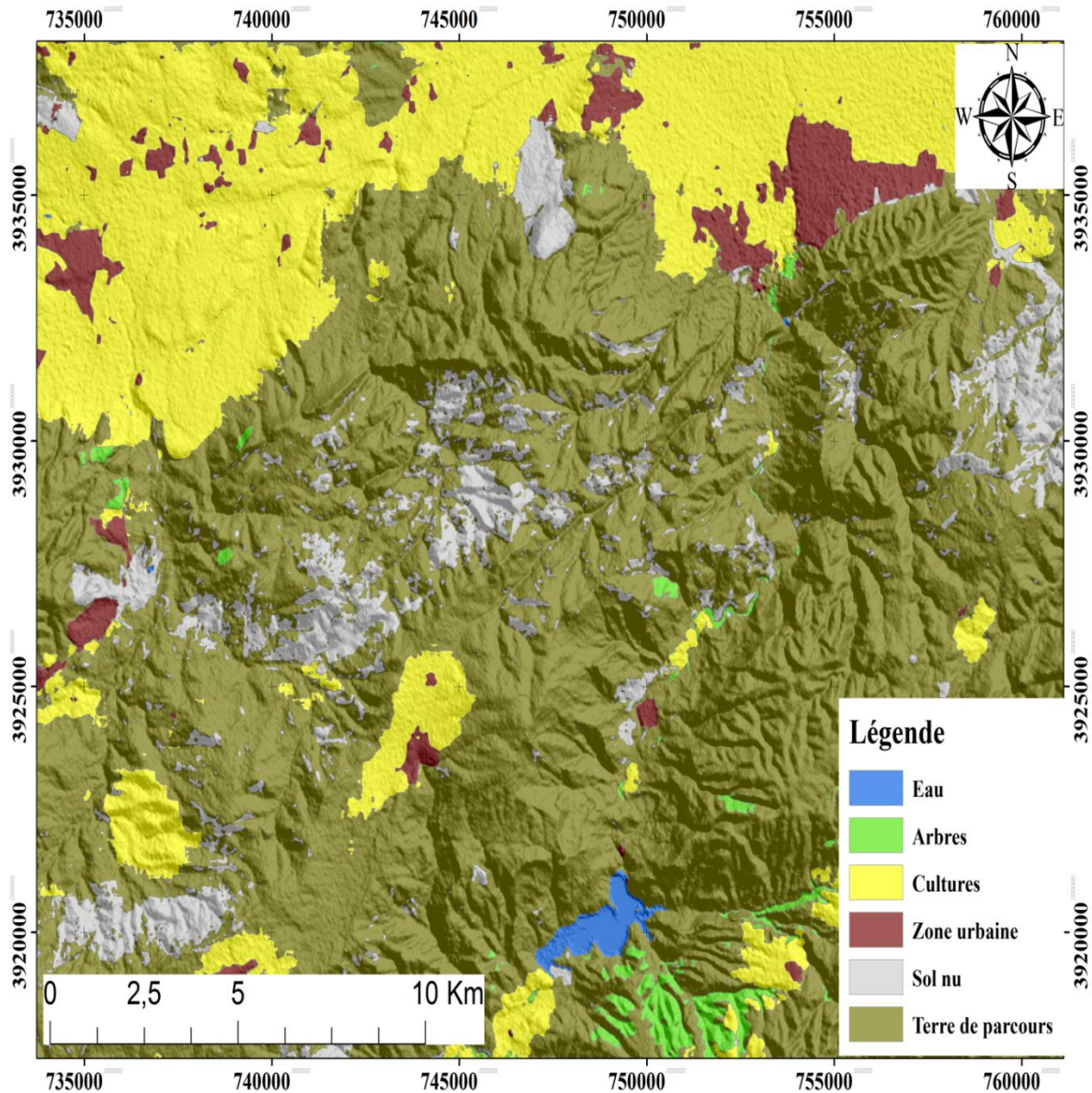


Figure 26: Carte d'occupation de sol de secteur d'étude.

V.2.6 L'altitude

L'altitude c'est l'élévation verticale d'un lieu par rapport à un niveau de base qui est le plus souvent le niveau de la mer, c'est un facteur très important qui influe sur les glissements de terrain du fait que la différence de plusieurs paramètres entre les différents niveaux d'altitude comme température, précipitation l'intensité de la pesanteur qui varie en fonction de l'altitude et climat ont un impact directe sur l'activité et déclanchements des glissements de terrain la carte des altitude de la zone d'étude est générer à partir d'un MNT et recalifiée en six classes (<100), (100-200), (200-300), (300,400), (>400) (figure 34).

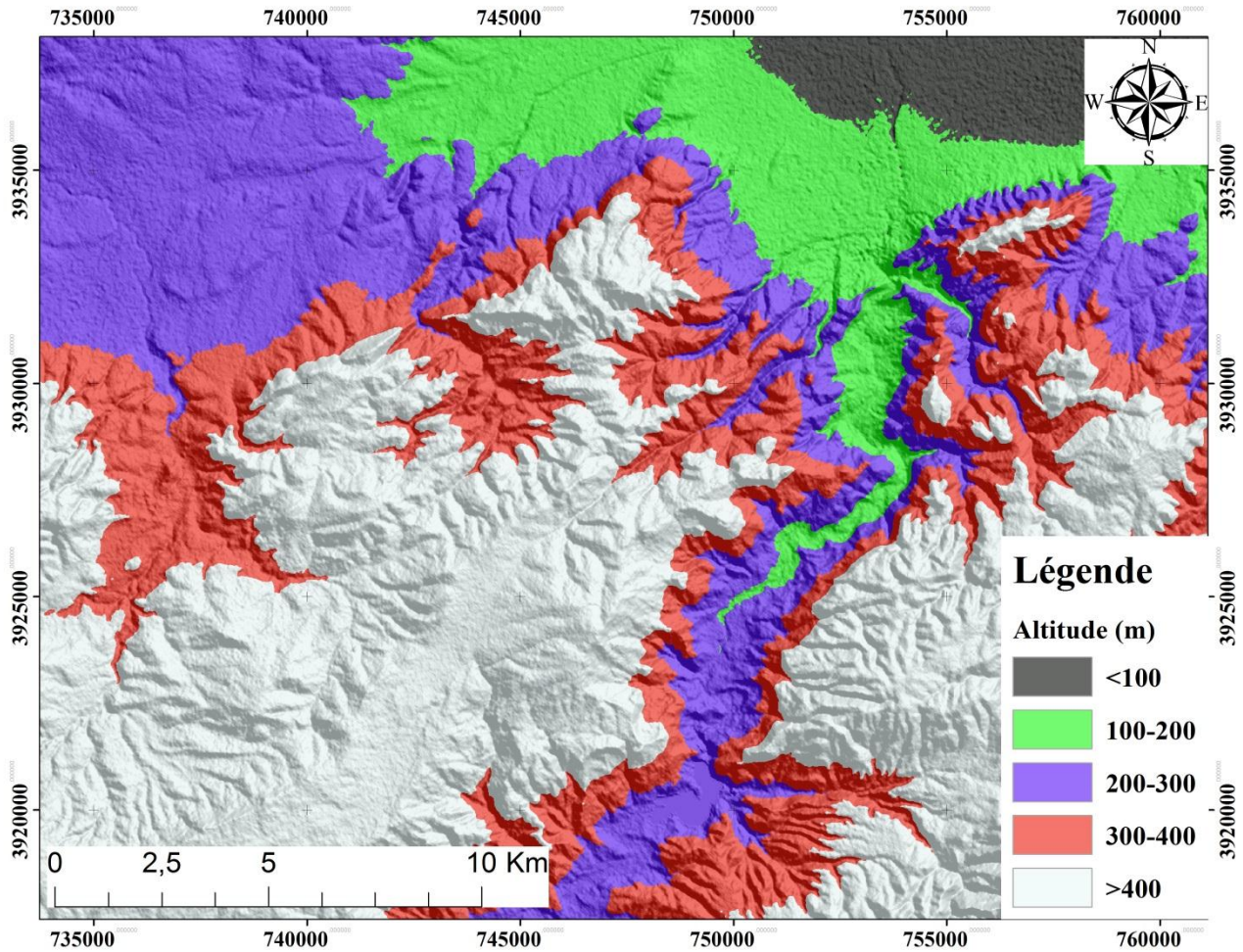


Figure 27: carte hypsométrique de la zone d'étude.

V.3 Données paramétriques de la zone d'étude :

Paramètres	Dérivé	Source de donnée
MNT	La pente L'Aspect L'altitude Réseaux hydrographique	https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/alos-palsar/
Occupation du sol	Eau Arbres Végétation inondée Cultures Zone bâtie Sol nu	Esri, microsoft, impact observatory (mars 2022) https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/collection/lulc

	Nuage Parcours	
Rainfall	Précipitation moyenne mensuelle Précipitation saisonnière Précipitation moyenne annuelle	https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/
Géologie	Formation lithologique	Carte géologique de l'Algérie Echelle : 1/500000 Deuxième édition Editée en 1951-1952

Tableau 12: Source des données du secteur d'étude.

V.4 Cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain et interprétations des résultats

Dans ce travail une méthodologie est établie à fin de cartographie des zones sujettes aux glissements de terrain. Cette démarche consiste premièrement à établir une carte d'inventaire des glissements de terrain (voir inventaire des glissements de terrain).

Deuxièmement, une évaluation d'indice de la susceptibilité par l'application de trois méthodes statistiques dites Ratio de Fréquence (Fr), Théorie de l'évidence (Weight Of Evidence-WOE) et Analyse multicritère (AHP).

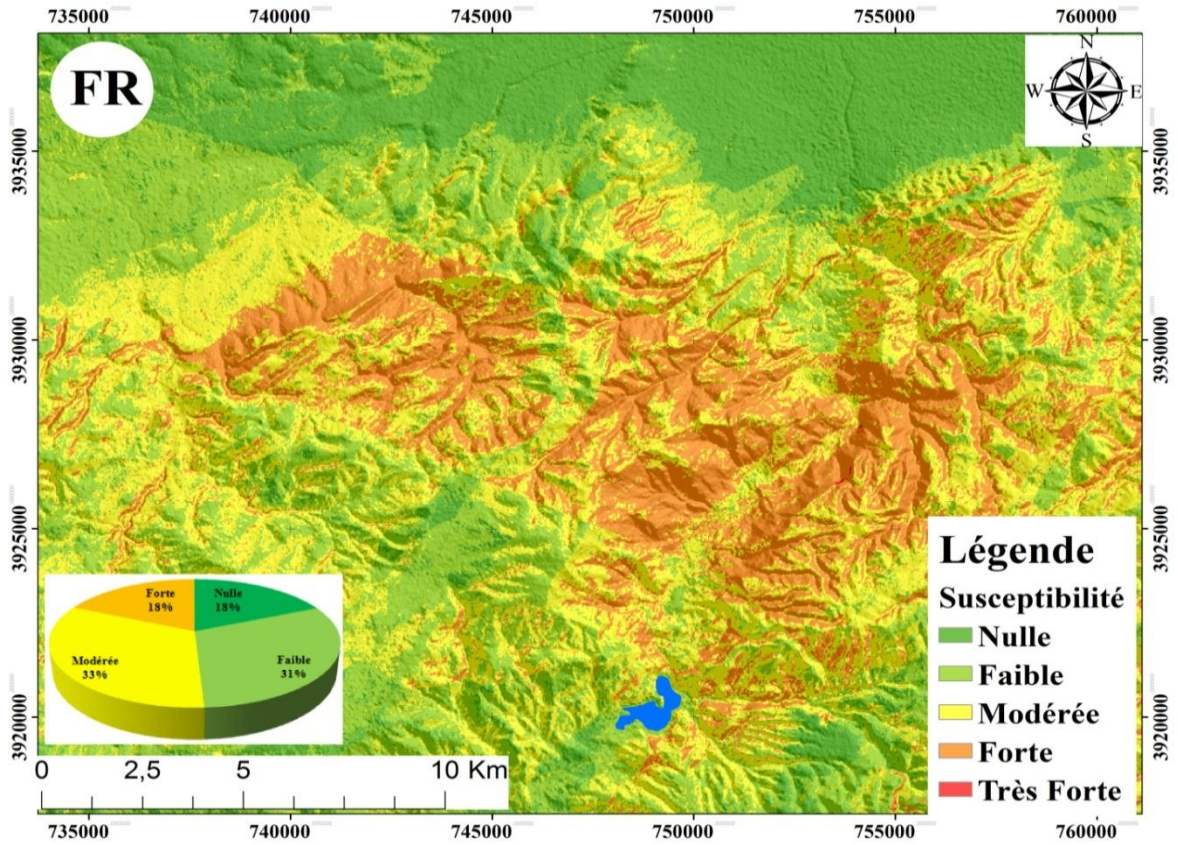


Figure 28: Carte de susceptibilité réalisée par la méthode rapport de fréquence.

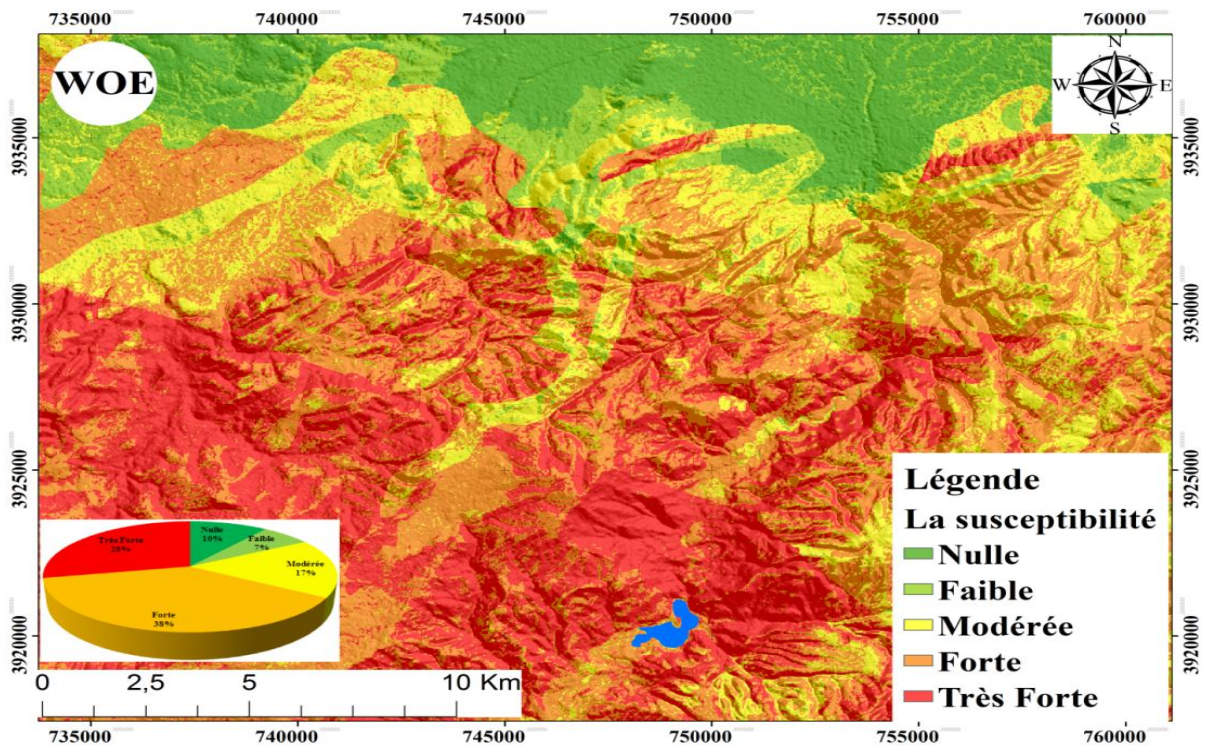


Figure 29: Carte de susceptibilité réalisée par la méthode Weight of evidence.

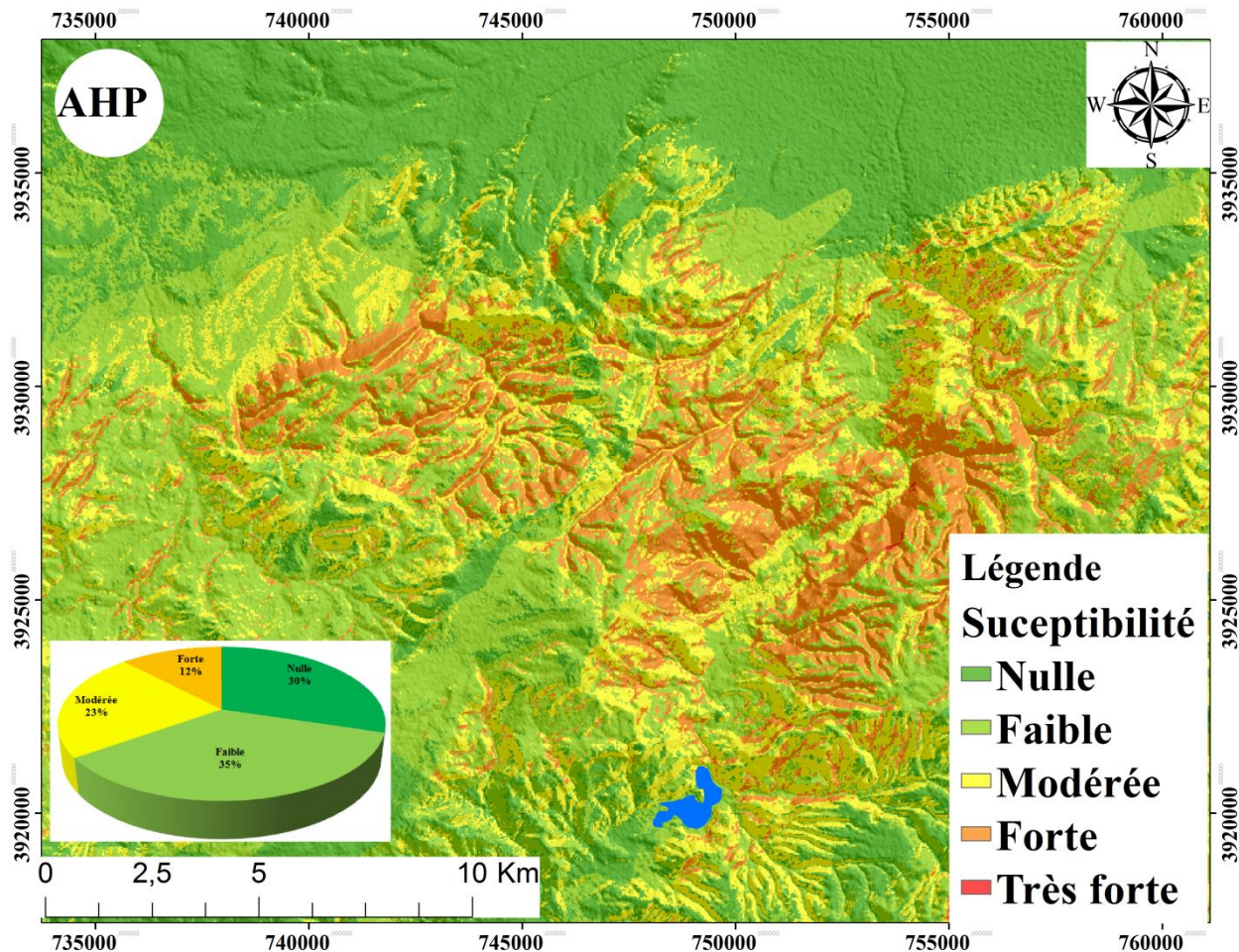


Figure 30: Carte susceptibilité réalisé par la méthode d'Analyse hiérarchique.

La carte de la susceptibilité (ISH) est obtenue vers la fin d'un processus d'analyse cartographique semi-automatique qui nécessite tout un travail préparatif des facteurs intrinsèques (la pente, l'altitude, la lithologie, l'aspect, la distance par rapport aux cours d'eau, l'occupation des sols, précipitations) qui ont contribué à la réalisation des cartes thématiques au sens constructif de l'aptitude des terrains d'être exposés au glissement.

La carte (ISH) réalisée constitue la pièce maîtresse de la prévention au risque de glissement (PPRG) de l'état d'art en domaine de la gestion de territoire.

Les recommandations potentielles sont les suivantes :

Les zones à risque moyen les plus vulnérables sont placées en position méridionale, les zones à risque moyen occupent le centre du secteur d'étude quant au reste sont généralement localisés dans la partie Nord.

V.5 Les méthodes statistiques

V.5.1 La méthode statistique de rapport de fréquence (RF)

La méthode statistique connue par ratio de fréquence est une méthode simple et facile à appliquer. Cette méthode statistique repose sur le calcul du ratio entre le pourcentage du phénomène dans une classe donnée et le pourcentage de la même classe dans la zone d'étude (Lee and Min 2001). La valeur moyenne du RF égale à 1, dans le cas où la valeur est supérieure à 1, indique que la corrélation entre le phénomène et le facteur de prédisposition est forte, dans le cas contraire ; cette corrélation est faible.

L'évaluation de l'indice de la susceptibilité aux glissements de terrain (ISG) se calcule sur l'équation cumulative suivante :

$$\text{ISG} = \text{RF1} + \text{RF2} + \text{RF3} + \dots + \text{RFn} \quad \text{SG} = \text{RF1} + \text{RF2} + \text{RF3} + \dots + \text{RFn} \quad \text{.(01)}$$

Dont RF exprime le ratio de fréquence pour chaque classe.

V.5.2 La méthode statistique AHP (Analytical hierarchy process)

La méthode AHP est une approche de prise de décision multicritère. Elle est basée sur des calculs complexes utilisant l'algèbre matricielle. Cette approche a été développée par (Saaty 1980). Cette méthode a été utilisée dans plusieurs domaines, tels que: la planification des transports combinés, le rationnement de l'énergie, la gestion des risques, l'analyse comparative des opérations logistiques, le risque d'inondation, la susceptibilité aux glissements de terrain. La popularité de l'AHP est due à sa simplicité, sa flexibilité, sa facilité d'utilisation et d'interprétation (Yalcin and Bulut 2007).

Le modèle AHP consiste à appliquer les étapes suivantes: i) hiérarchiser le problème de la prise de décision, ii) établir un jugement comparatif, iii) synthétiser les propriétés et mieux évaluer la cohérence du système.

Dans la littérature, plusieurs travaux ont été utilisés le modèle AHP pour évaluer la pondération des facteurs causatifs des glissements de terrain, mais pas pour les différentes classes des facteurs tels que le travail de (Barredo et al. 2000, Akgun and Türk 2010, Mondal and Maiti 2012). D'autres chercheurs ont utilisé le modèle AHP pour calculer le poids des facteurs causatifs des glissements de terrain et de leurs différentes classes (Phukon et al. 2012, Chen et al 2016a, Chen et al. 2016b, Yalcin et al. 2011, Intarawichian and Dasananda 2010).

V.5.3 La théorie de l'évidence (WOE)

La méthode WOE est l'une des méthodes statistiques de probabilité bayésienne la plus utilisée en sciences de la Terre. Elle a été appliquée dans plusieurs domaines tels que l'identification du potentiel minéral (Bonham-Carter 1989), la prédisposition aux glissements de terrain (Regmi et al. 2010) et la prédisposition aux inondations (Khosravi et al. 2016a, Tehrany et al. 2014b) Le poids de chacun des facteurs causatifs aux glissements de terrain peut être estimé en combinant chaque facteur de conditionnement avec l'inventaire des glissements de terrain (présence ou absence de glissements, selon l'équation 19 et 20 (Bonham-Carter 1994).

$$W+ = \ln\left(\frac{\frac{\text{l'aire de glissement de la classe total de la classe considérée}}{\text{l'aire totale des glissement de terrain}}}{\frac{\text{l'aire des zones stables de la calsse considérée}}{\text{l'aire total des zones stables}}}\right) \quad (02)$$

$$W- = \ln\left(\frac{\frac{\text{l'aire de glissement de la classe total de la classe considérée}}{\text{l'aire totale des glissement de terrain}}}{\frac{\text{l'aire des zones stables de la calsse considérée}}{\text{l'aire total des zones stables}}}\right) \quad (03)$$

$$WC = W^+ - W^- \dots \dots \dots (04)$$

Ou : $W +$ la pondération positive de la classe i , $W -$ la pondération négative de la classe i , WC et la pondération de classe i qui indiqué la corrélation entre les glissements de terrain et la paramètres de prédisposition.

Le calcul de $W +, W - , WC$ est entamé dans le tableau, des résultats positives et négatives du WC qui nos indique que les valeurs négative indiquées une mauvaise corrélation et vice versa.

V.5.4 Analyse Hiérarchique des procédés (AHP)

L'analyse hiérarchique multicritère, développée par le mathématicien Thomas Saaty (1977), c'est une méthode multicritère d'aide à la décision intégrant plusieurs critères et arrivant à un choix justifié, la décision est alors dite rationnelle, systématique et correctement prise.

L'AHP est utilisé comme une moyenne de résolution de plusieurs problèmes dans des différents domaines est spécialement dans la géoscience, (Stefanidis, S., and Stathis, D. 2013 ; Rahmati, O. et all 2016 ; Siddayao, G. P., 2014 ; Roukh, Z., And Nadjji, A. 2018) appliquant la

méthode statistique AHP pour cartographie de la susceptibilité aux inondations. D'autres chercheurs comme (Pourghasemi, H. R., et al 2012 ; Moradi, M., et al 2012) utilisant aussi cette méthode pour cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain. Cette méthode basée essentiellement sur structuration hiérarchique d'un problème, structuration des priorités et calcul de la cohérence. Dans cette étude, la méthode AHP a été utilisée pour calculer la pondération de chaque facteur. Pour atteindre ce but, une matrice de comparaison par paire a été établie à la faveur d'une échelle graduée de 1 à 9 qui indique le degré d'importance (tableau 13).

Echelle	Définitions	Explications
1	importance égale des deux éléments	Deux éléments contribuent autant à la propriété
3	un élément est un peu plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement un élément par rapport à un autre
5	un élément est plus important que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent fortement un élément par rapport à un autre
7	un élément est beaucoup plus important que l'autre	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique
9	un élément est absolument plus important que l'autre	Les preuves favorisant un élément par rapport à un autre sont aussi convaincantes que possible
2,4,6,8	Utilisés pour des jugements intermédiaires par rapport à ceux listés ci-dessus.	

Tableau 13: Echelle de comparaison.

Une fois les poids sont calculés, la cohérence des jugements doit être calculée afin de valider les priorités obtenues. Pour calculer la cohérence des jugements utilisés dans la matrice de comparaison en se basant sur l'équation suivante : $CR = \frac{IC}{IA}$

$$RC = \frac{CI}{IA} \quad C = CI/IA \dots \dots \dots (05)$$

Dans **RC** est le ratio de consistance, **CI** est l'indice de cohérence estimé selon l'équation (06) :

$$IC = \lambda_{max} - \frac{1}{n} - 1 \dots \dots \dots (06) \quad C = \frac{\lambda_{max} - 1}{n - 1} \dots \dots \dots (06)$$

λ : est la valeur propre, calculer à partir de la matrice de comparaison et n : le nombre de comparaison

IA A Présente l'indice aléatoire définis par Saaty selon le suivant tableau :

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Tableau 14: Indice Aléatoire (IA).

Dans cette étude l'utilisation du module AHP intégré dans le logiciel Arc GIS nos permis de calculer la pondération de chaque paramètres (figure 31).

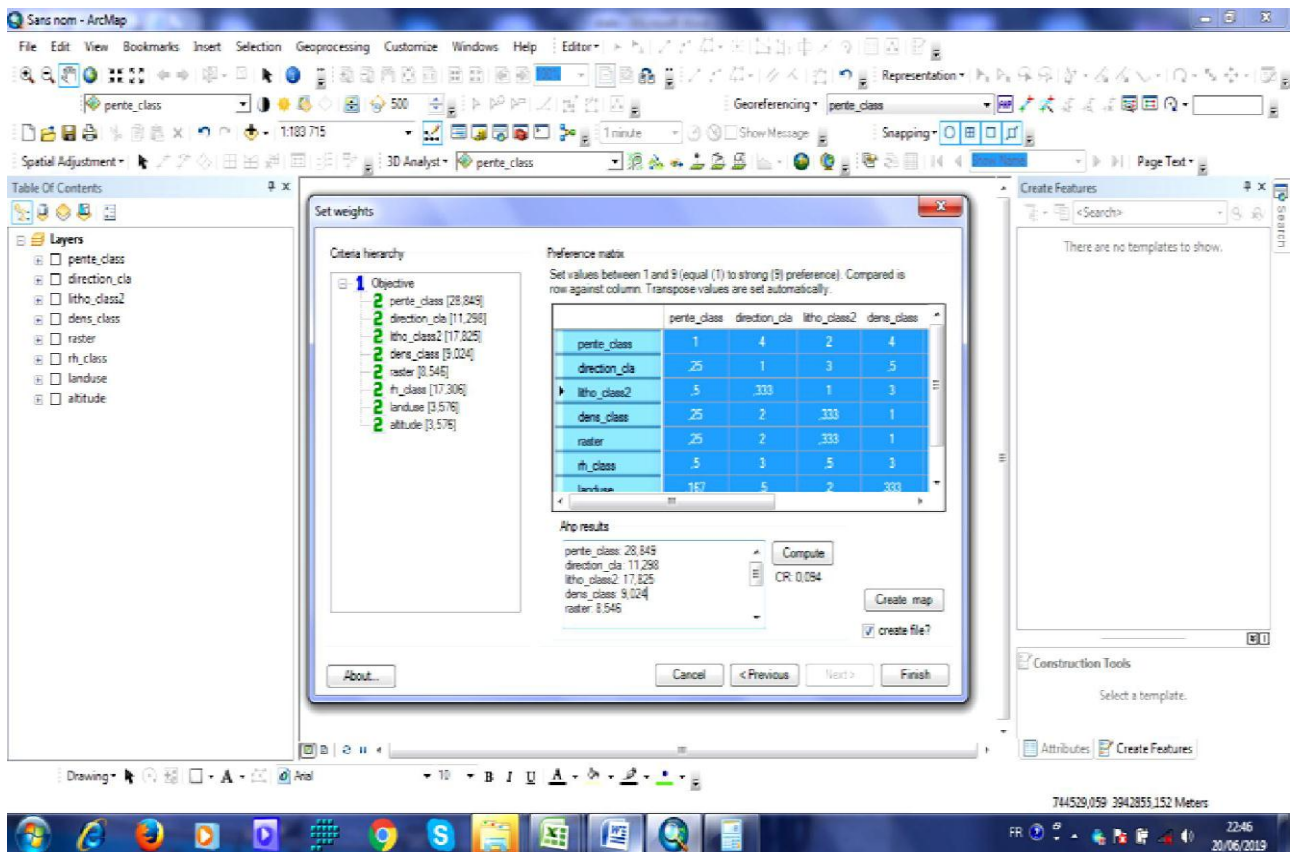


Figure 31 : utilisation du module AHP sur Arc GIS.

La matrice de comparaison par pair obtenue (tabl.12) montre que le paramètre le plus influencé aux glissements de terrain est la pente avec une pondération de 0.228 ainsi que la lithologie et la distance par rapport aux cours d'eau. Les paramètres les moins influencés sur l'occurrence des glissements de terrain sont l'occupation du sol et l'altitude.

V.6 Interprétation des résultats

L'exploitation des données dérivées suite à la combinaison des différents facteurs avec l'inventaire des glissements de terrain et par l'utilisation des équations spécifique à chaque méthode, la pondération de chaque calasse est calculée dans le tableau suivant :

Paramètre	Classe	Nombre depixel	Pourcentage de la classe	Pourcentage des glissements	Fr	W+	W-	C	Poids AHP
Pente	0 - 10	2384890	0,64271108	0,23582766	0,3669264	-1,00391421	0,76262787	-1,766542	0,01225343
	10 - 20	1083135	0,29189726	0,59145881	2,0262568	0,70832758	-0,55087622	1,2592038	0,0288
	20 - 30	219195	0,05907151	0,13630637	2,3074808	0,8388982	-0,08582092	0,9247191	0,00651351
	30 - 40	22583	0,00608596	0,0308642	5,0713773	1,63231397	-0,02529902	1,657613	0,00144679
	> 40	869	0,00023419	0,00554296	23,668698	3,21390655	-0,00533553	3,2192421	0,0002244
Aspect	Plat	74293	0,02002144	0,00088183	0,0440445	-3,124088	0,0193737	-3,143462	0,00034711
	N	563099	0,15175122	0,17724868	1,1680214	0,15562067	-0,03057532	0,186196	0,08492562
	NE	493052	0,13287405	0,08969514	0,6750388	-0,39370192	0,0487052	-0,442407	0,04703306
	E	443658	0,11956271	0,13932981	1,1653283	0,15341426	-0,02276318	0,1761774	0,06670248
	SE	457406	0,1232677	0,21579743	1,7506405	0,56159302	-0,11176067	0,6733537	0,09985124
	S	371040	0,09999267	0,08112875	0,811347	-0,20946416	0,02078808	-0,230252	0,03968595
	SW	333708	0,08993196	0,01473923	0,1638931	-1,81034877	0,07956582	-1,889915	0,00821488
	W	366519	0,09877429	0,04484757	0,4540409	-0,79073183	0,05824285	-0,848975	0,02360331
	NW	607897	0,16382397	0,23633157	1,4425946	0,36735722	-0,09088441	0,4582416	0,112
	Classe 1	675028	0,02343159	0,18191525	0,12880501	-2,11206399	0,19155018	-2,30361417	0

	Classe 2	132614	0	0,03573853	0	0	0	0	0
Lithologie	Classe 3	218735	0	0,05894753	0	0	0	0	0
	Classe 4	57801	0	0,01557696	0	0	0	0	0
	Classe 5	3045	0	0,00082061	0	0	0	0	0
	Classe 6	27660	0	0,00745417	0	0	0	0	0
	Classe 7	1719057	0,86722096	0,46327364	1,87194108	0,56791923	-1,34286328	1,91078251	0.0090347
	Classe 8	239185	0	0,06445866	0	4,76696127	0	4,76696127	0.178
	Classe 9	64072	0	0,01726695	0	0	0	0	0
	Classe 10	1222	0,00113379	0,01110904	0,10205988	-2,34504649	0,01076575	-2,35581224	0.03880569
	Altitude	< 100	132236	0,03563667	0	0	-0,11328912	0,01466298	-0,1279521
100 - 200		416370	0,11220879	0,05820106	0,5186854	0	0	0	0.006351
200 - 300		789824	0,21285201	0,25233056	1,1854742	0,17057954	-0,05157337	0,2221529	0.026718
300 - 400		670951	0,18081657	0,33056185	1,8281612	0,6050226	-0,20224672	0,8072693	0.006351
>400		1701291	0,45848596	0,35890653	0,7828081	-0,24539828	0,16925574	-0,414654	0.035

L'utilisation des terres	L'eau	16245	0,00436454	0	0	0	0	0	0
	Arbres	51184	0,0137516	0,00075643	0,0550067	-2,90542677	0,01315195	-2,918579	0.00708686
	Récoltes	826572	0,22207499	0	0	0	0	0	0
	Zone construite	119070	0,03199052	0	0	0	0	0	0
	Sol nu	285855	0,07680063	0,04535147	0,5905092	2,40800868	0,03362029	2,3743884	0.06556144
	parcours	2423114	0,65101772	0,95389267	1,465233	0,38269357	-2,02531511	2,4080087	0.09
Précipitation (Mm/an)	250	200124	0,30888338	0,09728183	0,3149468	-1,12150917	0,2523391	-1,373848	0.004529
	260	225963	0,34876485	0,76752504	2,200695	0,77478209	-1,02251413	1,7972962	0.055583
	270	221808	0,34235177	0,13519313	0,3948954	-0,94468259	-5,83704536	4,8923628	0.085
Distance par rapport aux cours d'eau (m)	0 – 50	938631	0,25295438	0,37994457	1,502028	0,407881718	-0,18667791	0,5945596	0.173
	50 – 100	772275	0,20812262	0,256739733	1,2335984	0,210418374	0,46174269	-0,251324	0.07384225
	100 – 150	644692	0,17373991	0,174099269	1,0020684	0,002084012	-0,00043875	0,0025228	0.0168662
	150 - 200	538647	0,14516154	0,107331822	0,7393957	-0,302491205	0,0433991	-0,34589	0.0061184
	>200	816428	0,22002154	0,081884606	0,3721663	-0,989733061	0,16342906	-1,153162	0.000097

Tableau 15: Pondération de chaque classe des paramètres utilisés dans cette étude basée sur la méthode statistique ratio de fréquence, la théorie de l'évidence et AHP.

L'intersection entre les glissements de terrain et la pente montre que La classe la plus susceptible est la classe $>40^\circ$ suite au l'application de deux méthodes statistique Rapport de fréquence et la théorie de l'évidence avec les valeurs maximale successive par ordre (23. 66) et (3.21), par contre par la méthode AHP on n'observe que la valeur maximale 0.02 pour la classe [10- 20], ainsi que La classe la moins susceptible est [0- 10°] de valeurs successive (0,36) et (-1.76) pour les même méthodes (FR et WOE) par contre la méthode AHP la valeur minimale 0.00022° est situé à la classe [$>40^\circ$].

Pour la lithologie les résultats obtenus par les trois méthodes montre que Les terrains les plus susceptibles aux glissements de terrain sont les formations lithologiques de la classe 08 avec des valeurs maximale (0,17), (4.76) et 1.78 (classe 07) par l'utilisation des méthodes AHP, WOE et RF successivement. Ainsi les formations lithologiques les moins susceptibles sont (classe 1) jusqu'à (classe 6) et (classe 9) avec une valeur minimale de 0 suite à l'utilisation de la méthode rapport de fréquence, théorie de l'évidence et la méthode AHP.

Les résultats de l'application des quatre méthodes montrent que les zones situe à la proximité du cours d'eau sont les plus susceptibles au glissement de terrain ou l'érosion hydrique est très importante favorise le déclenchement des glissements de terrain.

Les deux méthodes théorie de l'évidence et AHP ont donnée même résultats pour le têt de précipitation influant sur la susceptibilité aux glissements de terrain avec des valeurs maximales successive d'ordre (4,89) et (0.085) pour un moyen de 270 mm/an, par contre l'application de la méthode rapport de fréquence est donnée une valeur de (2,20) pour un moyen de 260 mm/an. Les zones caractérisées par un faible moyen de précipitation sont les moins susceptibles aux glissements de terrain.

L'application des trois méthodes montre que les zones caractérisées par une forte altimétrie (les reliefs) sont les plus susceptibles aux glissements de terrain ainsi que les zones abruptes aux phénomènes des glissements de terrain ceux qui caractérisées par une altitude faible (les plaines).

D'après l'analyse des résultats de l'application des trois méthodes rapport de fréquence, théorie de l'évidence et la méthode AHP on observe que les sols les plus susceptibles aux glissements de terrains sont les zones de parcours avec des valeurs maximales successive d'ordre (1,46), (2,40), (0.09) ainsi que les valeurs minimales est de 0 obtenu par la méthode rapport de fréquence les sols les moins susceptible sont cours d'eau, les récoltes, et les Bâtis.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les glissements de terrain présentent l'un des aléas les plus répandus dans le monde, ils provoquent annuellement des dégâts et des pertes considérables. En Algérie, et spécialement dans l'Est du pays, des contributions et des publications portent des études de zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain mais restent toujours insuffisantes vu la superficie importante du pays.

Ce travail montre aussi que le Nord-ouest de l'Algérie est influencé par les mouvements de terrain et surtout dans les zones montagneuses en raison de la caractéristique géologique, géomorphologique, hydrologique, hydrogéologique, climatique et sismique.

Quatre cartes de susceptibilité sont réalisées en faveur de l'utilisation des méthodes statistiques couplées avec le Système d'Information Géographique (SIG). Deux méthodes statistiques bi variées (Ratio de fréquence, la théorie de l'évidence) et une quatrième semi quantitative basée sur la prise de décision sont utilisées pour estimer le degré de la susceptibilité de la zone d'Elchorfa (Nord-ouest de l'Algérie).

La validation des cartes de susceptibilité montre l'habileté des trois méthodes statistiques VI, WOE et à la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain.

La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain de la région d'étude peut être établie par l'emploi des autres méthodes statistiques ainsi que les données collectées dans cette étude peuvent être utilisées dans d'autres études liées aux risques naturels.

L'utilisation des méthodes et techniques de suivi des glissements de terrain telles que l'interférométrie Radar, les images de haute résolution et le GPS pour une période de temps permettant d'aboutir des cartes d'aléas, leur combinaison avec celle de cartes de susceptibilité réalisées dans cette étude et la carte de vulnérabilité permettant résoudre la question des risques liés aux phénomènes des glissements de terrain dans cette zone.

L'exploitation des résultats obtenus dans cette étude par les décideurs, les collectivités locales et régionales, la direction des travaux publics et la direction de l'urbanisme permettant de minimiser les dégâts et pertes avec des choix des terrains rationnels des futurs projets ainsi que pour la révision du Plan Directeur d'Aménagement Urbain (PDAU).

Bibliographie

(s.d.).

Achour .Y, B. .. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine,. *Arabian Journal of Geosciences*,10(8), 194.

Arabameri .A, P. .. (2019). Assessment of Landslide Susceptibility Using Statistical-and Artificial Intelligence-Based FR–RF Integrated Model and Multiresolution DEMs. *Remote Sensing*, 11(9), 999.

Ardau, F. B. (2007). *Assessment of cover-collapse sinkholes in SW Sardinia (Italy)*. Parise: Natural and Anthropogenic Hazards in Karst Areas: Recognition, Analysis and Mitigation. Geological Society, London, Special Publication. 279.

Argialas .D.P, T. .. (May 1-5, 2006). Automatic extraction of physiographic features and alluvial fans in Nevada, USA, from digital elevation models and satellite imagery through multiresolution segmentation and object-oriented classification. *Proceedings of*, (p. 10). Reno, Nevada.

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

Bălteanu, D. C. (2010.). country-wide spatial assessment of landslide susceptibility in Romania. Dans G. 124.

Bonham-Carter, G. (1989). Weights of evidence modeling: a new approach to mapping mineral potential. *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.

Bonham-Carter, G. (1994). *Geographic Information System for Geoscientists: modelling with GIS*, Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994. In *Statistical applications in the earth sciences*, 171-183.

Bouhadad .Y, B. .. (2010). The Laalam (Algeria) damaging landslide triggered by a moderate earthquake (M w= 5.2). Dans *Natural hazards*, 54(2), 261-272.

- Boulaassal.H. (2008). Classification orientée objets des images satellites. Approche adoptée par le logiciel e Cognition. Strasbourg, Faculté de Géographie et d'Aménagement, Université Louis Pasteur.
- Carrara, A. C. (1995). *GIS technology in mapping landslide hazard*. (A. C. Guzzetti, Éd.) Kluwer Academic Publishers, Dordrecht,: Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazard. Advances in Natural and Technological Hazards Research.
- Chacón, J. I. (2006). *landslides and Geographical Information Systems (GIS)*. Engineering geology maps.
- Chen .W, L. .. (2014). Landslide susceptibility mapping based on GIS and information value model for the Chencang District of Baoji. Dans *Arabian Journal of Geosciences*, 7(11), (pp. 4499-4511.). China.
- Chung, C. &. (s.d.). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Dans *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 65 (12), 1389–1399. 1999.
- CRUDEN .D.M & VARNES D.J. (1996). Landslide types and processes. Turner AK and Schuster RL (Eds.) Landslides: investigation and mitigation. *National Academey Press*.247; 36.
- Das .I, S. .. (2010). Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalaya (India). Dans 1. Geomorphology.
- Delfaud J. & al. (1973). Un modèle paléogéographique de la bordure méditerranéenne : évolution de la région oranaise (Algérie) au Miocène supérieur. Dans *Conséquences stratigraphiques*. Alger 64 (1-2), Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. N.
- Dewitte, O. (2006). Cinématique De glissements de terrain et prédiction de leur réactivation : Approche probabiliste dans la région d'Oudenaarde. Université de Liège, Faculté des Sciences, Département de Géographie.
- Djeral, L. (2009-2010). Dynamique d'évolution du glissement de terrain d'Ain El Hammam. Univ Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- Foucault A. (2009). Climatologie et paléoclimatologie. Dans *Livre cours de Master, CAPES,Agrégation* (p. 308). Paris: DUNOD.
- Glade .T, A. M. (2003). Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester,.

- Glade, T. &. (s.d.). A review of scale dependency in landslide hazard and risk analysis. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. Dans (Eds.), *Landslide Hazard and Risk*. Wiley, Chichester (pp. 75–138).
- Guemache M.A, C. J. (2011). Failure of landslide stabilization measures: The Sidi Rached viaduct case (Constantine, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 59(4-5), 349-358.
- Gutiérrez, É. G. (2008). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain, *Environmental Geology* 53:993–1006, DOI 10.1007/s00254-007-0727-5.
- Guzzetti, F. C. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Dans *Geomorphology* 31:181–216.
- Hallal .N, C. .. (2019). spatiotemporal evolution of the El Biar landslide (Algiers): new field observation data constrained by ground-penetrating radar investigations. Dans *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, (pp. 1-18).
- Jiménez-Perálvarez, J. I. (2009). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. Dans *Nat Hazards* (2009) 50:571–590. DOI 10.1007/s11069-008-9305-8.
- Jiménez-Perálvarez, J. I. (2009). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS.
- Jiménez-Perálvarez, J. I. (s.d.). Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. Dans *Nat Hazards* (2009) 50:571–590. DOI 10.1007/s11069-008-9305-8.
- Kabou Y, M. L. (2013). *Etude de stabilité et de confortement de glissement de terrain de targua ouzumure*. Bejaia, Univ Abderrahmane Mira de Bejaia.
- Kaufmann, O. &. (s.d.). Geohazard map of cover-collapse sinkholes in the ‘Tournaisis’ area, southern Belgium. Dans *Engineering Geology* 65, (pp. 117-124).
- Lee .S & Choi, J. (s.d.). Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight_of evidence model. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8),.

- Nachbaur, A. &. (2011). Managing expert-information uncertainties for assessing collapse susceptibility of abandoned underground structures. Dans *Engineering Geology 123*, (pp. 66–178).
- Ohlmaher G.C & Davis J, C. (2003). Using multiple logistic regression and GIS technology to predict landslide hazard in northeast Kansas. Dans *Engineering geology*, 69(3-4) (pp. 331-343). USA.
- Papadopoulou-Vrynioti, K. B. (2013). Karst collapse susceptibility mapping considering peak ground acceleration in a rapidly growing urban area,. Dans *Engineering Geology*.
- Perrodon A. (1957). Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Dans *Publ. Serv. Carte Géol* (pp. 91-220). Algérie.
- Poiraud, A. (2014). Landslide susceptibility–certainty mapping by a multi-method approach: A case study in the Tertiary basin of Puy-en-Velay (Massif central, France),. Dans *Geomorphology 216*, (pp. 208–224).
- Pourghasemi .H, R. P., & .C, G. (2012). Application of fuzzylogic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed . Dans *Natural hazards* (pp. 965-996). Iran.
- Pueyo-Anchuela, Ó. C.-S.-L. (2011). Multidisciplinary approach for urban planning in alluvial karstic zones Case study from the Central Ebro Basin (Spain). Dans *Engineering Geology 122* (pp. 22-238).
- Regmi .N.R, G. .. (2010). Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach Western Colorado . Dans *Geomorphology*, 115(1-2) (pp. 172-187). USA.
- Roukh .Z.A & Nadji.A. (2019). Landslide susceptibility mapping using information value and frequency ratio for the Arzew sector (North-Western of Algeria). Dans *Maden Tetkik ve Arama Dergisi*, (159), 1-10.
- Smahi.A, Z. (2015). Etude et confortement du glissement de terrain au niveau de l'évitement de la ville de Kherrata wilaya de Béjaia Mém, master; univ. Bejaia.
- Soeters, R. &. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslide Investigation and Mitigation*, National Research Council. Dans *Transportation Research Board Special Report* (pp. 129–177).

- Thiery M.Y. (2007). susceptibilité du bassin de barcelonnette (alpes du sud ; France) aux mouvements de versant cartographie morphodynamique analyse spatiale et modelisation probabiliste. thèse, doct ; Univ. Caen, France.
- Thomas G. (1985). Géodynamique d'un Bassin intra-Montagneux. Le Bassin du Bas Chélif Occidental durant le Mio – Plio – Quaternaire. Th. Doct. Univ. Pau.
- van Westen, C. R. (1997). *Prediction of the occurrence of slope instability phenomena through GIS-based hazard zonation*. Geol Rundsch 86:.
- van Westen, C. R. (2003). *Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment*. (3. Natural Hazards, Éd.)
- Varne .D.J. (1978). slope movements, types and processes.
- Waltham, T. B. (2005). Sinkholes and Subsidence, Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction. Praxis Publishing, UK, ISBN 3-540-20725-2.

SOURCES:

- ✓ ANRH
- ✓ ONM
- ✓ DRE

CARTES:

- ✓ la carte géologique de Saint Denis de Sig à l'échelle **1/50000**.

Liste des sites web

- <https://www.researchgate.net/publication/331983733>.
- <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-57471-FR.pdf>.
- <http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-59065-FR.pdf>.
- <http://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/03/pr%C3%A9vention-mouvement-terrain-2012.pdf>.

- <http://observatoire-regional-risques-paca.fr/article/retrait-gonflement-sols-argileux>.
- <https://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net/document/pdf/5385b4b5b79cd.pdf>.
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011605/document>.
- <https://www.inc-conso.fr/content/la-realisation-detudes-geotechniques-sur-des-sols-argileux>.
- <https://iast.univ-setif.dz/documents/Cours/TD3-Bersi.pdf>.