

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA

RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université de Larbi Tebessi- Tébessa-



Faculté des Sciences Exactes et Sciences de la Nature et de la Vie

Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat

Analyse de l'activité de glissement de terrain et relation avec les conditions climatiques Exemple : région de Souk Ahras Nord-est Algérien.

Option

Hydrogéologie appliquée

Par

Abdelouahed El Mekki

DIRECTEURS DE THÈSE

Hadji Riheb Maître de Conférences –A- U. Sétif 1- Algérie

Fehdi Chams-Eddine Professeur. U. Tébessa-Algérie

DEVANT LE JURY

- | | | |
|-------------------------|--------------------|----------------------------|
| - Fethi Baali | Professeur. | U. Tébessa- Algérie |
| - Karim Zighmi | M.C.A | U. Sétif 1- Algérie |
| - Lassaad Ghrieb | M.C.A | U. Guelma- Algérie |
| - Nadil Defaifia | M.C.A | U. Tébessa- Algérie |

Travaux effectués au sein du laboratoire eau et Environnement, (U. Tébessa-Algérie)

A/U : 2018-2019



RESUME:

Basée sur la modélisation probabiliste par SIG, le traitement statistique et le calcul Raster; notre approche propose une zonation de la susceptibilité, de la vulnérabilité et du risque glissement de terrain le long des communes de Souk Ahras et Zaarouria, wilaya de Souk Ahras. L'inventaire des glissements de terrain a été fait par l'interprétation des photos satellitaires; confirmé par des reconnaissances de terrain. Les facteurs jugés comme responsables de l'occurrence des glissements de terrain et introduits dans la modélisation sont l'inclinaison du talus, l'aspect des pentes, l'hypsométrie, la lithologie, les linéaments, les routes, les forêts, les champs agricoles, le réseau hydrographique, et les précipitations. Des pondérations reflétant leur rôle présumé dans le phénomène ont été attribuées à chaque facteur. Une hiérarchisation des classes de susceptibilité a été évaluée par l'application d'une approche à régression logistique, et validée par des courbes ROC. La vulnérabilité et le risque ont été également cotés et cartographiés. Les cartes résultantes peuvent être utilisées pour la mitigation de tels phénomènes et pour l'organisation des plans d'occupation des sols.

Mots clés : Glissements, SIG, cartographie, susceptibilité, vulnérabilité, risque.

ABSTRACT

Based on probabilistic modeling by GIS, statistical processing and Raster calculation; our approach proposes a zonation of the susceptibility, the vulnerability and the risk landslide along the municipalities of Souk Ahras and Zaarouria, district of Souk Ahras. The landslides inventory was done by the interpretation of satellite photos; confirmed by field reconnaissances. Factors considered to be responsible for the occurrence of landslides and introduced into the modeling include slope slope, slope aspect, hypsometry, lithology, lineaments, roads, forests, agricultural fields, the hydrographic network, and precipitation. Weightings reflecting their assumed role in the phenomenon were assigned to each factor. A hierarchy of susceptibility classes was evaluated by the application of a logistic regression approach, and validated by ROC curves. Vulnerability and risk were also rated and mapped. The resulting maps can be used for the mitigation of such phenomena and for the organization of land use plans.

Key words: Landslides, GIS, mapping, susceptibility, vulnerability, risk.

ملخص

استناداً إلى النمذجة الاحتمالية حسب نظام المعلومات الجغرافية، المعالجة الإحصائية وحساب البيانات النقطية؛ يقترح منهجنا تحديد مدى القابلية للتأثر، الضعف و الخطر للانزلاقات الأرضية على طول بلديتي سوق أهراس والزعرورية بولاية سوق أهراس. تم جرد الانهيارات الأرضية عن طريق تفسير صور الأقمار الصناعية؛ تؤكد الخرجات الميدانية. تشمل العوامل التي تعتبر مسؤولة عن حدوث الانهيارات الأرضية والمقدمة في النمذجة، المنحدر، اتجاه المنحدرات، الارتفاعات، السحنة، الفوالق، الطرق، الغابات، الحقول الزراعية، الشبكة الهيدروغرافية، تساقطات الأمطار. تم تعيين وزن لكل عامل مما يعكس دوره المفترض في هذه الظاهرة. تم تقييم التسلسل الهرمي لفئات القابلية من خلال تطبيق نهج التراجع اللوجستي، والتحقق من صحتها من قبل منحنيات ROC. تم أيضاً تحقيق خرائط الضعف والخطور رسمهما. تسمح الخرائط الناتجة بالتخفيف من آثار الظاهرة وبالتنظيم الجيد لمخططات استخدام الأراضي.

الكلمات المفتاحية: الانزلاقات الأرضية، نظم المعلومات الجغرافية، رسم الخرائط، القابلية، الضعف، المخاطر.

Remerciements

Au nom de Dieu clément et miséricordieux

Avant tout, je remercie **Dieu le tout puissant** de m'avoir donné le courage, la patience et la force pour achever ma thèse. Cette thèse est le fruit d'un travail de longue haleine dont le manuscrit final ne représente que la partie émergée de quatre années de lutte. La réussite de cette expérience est liée, en partie, à des efforts "personnels" mais surtout à la présence, soutien et sympathie de plusieurs personnes et institutions.

Je tiens à remercier tout d'abord tous mes enseignants de graduation et de post graduation au département des Sciences de la Terre, Université de Larbi Tébessi, Tébessa. J'exprime mes profonds remerciements à mes deux directeurs de thèse, Mr. Hadji Riheb MCA à l'Université de Sétif 1, et Mr. Fehdi Chemsedine professeur à l'Université de Tébessa, de m'avoir proposé ce projet de thèse et m'avoir aidé à le réaliser. Je leur suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'ils m'ont accordé, leur qualité pédagogique et scientifique, leur franchise et sympathie. J'ai beaucoup appris d'eux et je leur adresse ma gratitude pour tout cela. à Mr. Hamed Younes Maître de Conférences, à l'université de Gafsa, Tunisie, pour son soutien, pour sa gentillesse et ses conseils judicieux. Il n'a pas ménagé son aide, je lui en suis profondément reconnaissant.

Je teins également à remercier Mr. Baali Fethi professeur à l'Université de Tébessa de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de thèse.

Mes plus sincères remerciements vont aux examinateurs, à savoir:

Dr. Lassaad Ghoreib Maître de Conférences «A» à l'université de Guelma qui m'a fait un grand honneur en acceptant de lire et examiner ce travail.

Dr. Defaflia Nabil Maître de Conférences «A» à l'Université de Tébessa, mon enseignant de graduation qui après m'avoir fait profiter de son enseignement, a accepté d'examiner mon travail.

Mr. Zighmi Karim Maître de Conférences «A» à l'université de Sétif 1 qui m'a fait un grand honneur en acceptant de lire et examiner ce travail.

Je tiens à remercier, tous les acteurs du climat, de l'eau, de la géologie et des mines de la wilaya de Souk Ahras, de la Direction des Ressources en Eau de la Wilaya de Souk Ahras, de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques de Constantine, de la direction de l'A.N.B.T du barrage de Ain Dalia, de la Direction des Services Agricole de la Wilaya de Souk Ahras, l'Office Nationale de la Météorologie de Souk Ahras, de l'A.D.E de l'unité Souk Ahras, du laboratoire des travaux publics de l'Est LTPE, etc. qui m'ont aidé à acquérir des données. Récupérer des données n'est pas une tâche facile mais ça fait vraiment plaisir de voir que la majorité des personnes que j'ai contacté m'ont répondu avec gentillesse.

Mes sincères remerciements s'adressent également à tous mes collègues Dr. Hamad Amor, Mr. Brahmi Serhane et Smail, Dr. Bouhlassa Sadek... toute ma famille, et à tous ceux qui je n'ai pas cité leurs noms et qui savent ce que je leur dois.

El Mekki Abdelouahad

Dédicace

Je dédie mon travail.

A toute ma famille, surtout a mes parents, mon épouse et mes chères filles pour leur sacrifices, leurs aides durant mes années d'études.

A tous mes chers frères et soeurs.

A Mrs. Ezzehi, Hamad, et Brahmi

A tous mes collègues (promotions 2015 - 2019)

A tous mes amis, collègues et camaredes.

A tous ceux qui m'aime.

El Mekki


TABLE DES MATIERES


INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I CADRE GEOLOGIQUE ET ENVIRONNEMENT PHISIQUE	
1. Présentation de la zone d'étude	5
1.1. La topographie	7
1.2. La végétation et couvert forestier de la région	8
1.3. Le réseau hydrographique	10
1.4. Le contexte socio-économique	12
1.5. La sismicité de la région	13
2. Cadre géologique régionale	15
2.1. Le domaine interne	16
2.1.1. Socle Kabylie	16
2..2 Dorsale kabyle	17
2.3. Le domaine des Flyschs (domaine médian)	17
2.4. Le domaine externe	17
3. Caractéristiques litho-stratigraphiques	17
3.1 Répartition des affleurements de Trias	18
3.2 Répartition des affleurements du Jurassique	20
3.3 Répartition des affleurements de Crétacé	20
4. Caractéristiques structurales	21
4.1. La phase finie lutécienne ou phase atlasique	22
4.2. Les phases Miocènes	23
5. Aperçu tectonique	24
5.1. La première phase majeur	25
5.2. La deuxième phase majeure	25
5.3. La dernière phase	25
5.4. Description tectonique Régional	26
5.4.1. Les nappes de glissement	26
5.5. Les Bassins D'Effondrement	27
5.6. Les Structures transversales	27
5.7. La Tectonique du Trias	28
5.7.1 Le Trias des Anticlinaux	28

5.7.2 Le Trias des Ecailles	28
5.7.3 Le Trias des Grandes Fractures	29
5.7.4. Le Trias Diapir	29
5.7.5. Le Trias des Grands massifs	29
6. Contexte géologique de la zone d'étude	30
6.1. Environnement géologique de la région d'étude	31
6.2. Litho-stratigraphie des formations autochtones	32
7. Conclusion	36
CHAPITRE II CLIMATOLOGIE, HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	
1. Introduction	37
2. Analyse des paramètres climatiques	38
2.1. La pluviométrie	38
2.2. Températures	40
2.3. Le diagramme ombrothermique	43
2.4. L'humidité du sol	43
2.5. Humidité de l'air	46
2.6. Détermination des indices climatiques	46
2.7. Etude de l'évapotranspiration	49
2.8. Calcul du ruissellement et de l'infiltration	50
2.9 Estimation de la recharge par la méthode de Thornthwaite	51
3. Le bassin versant Medjerda amont (12-01)	53
4. Caractéristiques morphométriques du bassin versant	53
4.1 forme du bassin	54
4.2 périmètre du bassin (P)	54
4.3 Superficie (S)	54
4.3.1 Indice de compacité de Gravelius (K_c)	54
4.3.2 Rapport de circularité (RC)	55
4.3.3 facteur de forme	55
4.4 Lrectangle équivalent (L)	55
4.5. Le relief	55
4.5.1. Altitudes caractéristiques du bassin	56
4.5.2. Les pentes	57
4.5.3. Indices de Pentas	58

5. Le réseau hydrographique	60
5.1. La densité de drainage (Dd) :	61
5.3. Profil en long	62
6. Système Aquifère du Bassin Versant Medjerda	64
6.1. Synclinal de Taoura	64
6.1.1. La nappe libre du Mio-Plio-Quaternaire	64
6.1.2 La nappe captive du calcaire Maestrichtiens	64
6.1.3 L'aquifère campanien	65
6.1.4. Les sources thermo-minérales	66
6.2. La nappe alluvionnaire	66
6.2.1. Les Sources	66
6.3. aquifère Sid Fredj-Aïn Zerga	67
7. Conclusion	68
CHAPITRE III GENERALITE SUR LES GLISEMENTS DE TERRAIN	
1. Introduction	69
2. Classification des mouvements de terrain	70
2.1. Pentes naturelles	70
2.2. Talus artificiels	70
3. Mécanismes et typologies des rupture des pentes	71
3.1. Les glissements de terrain	71
3.2. La morphologie d'un glissement de terrain	71
3.4. Vitesse moyenne de mouvement des glissements	75
3.4. Profondeur de la surface de glissement	75
3.5. Les écroulements	75
3.6. Fluages et solifluxions	77
3.7. Les coulées boueuses	78
3.8. Talus en déblais et en remblais sur sols non compressibles	79
3.9. Talus en remblais sur sols compressibles	79
3.10. Dignes et barrages en terre	79
3.11. Ouvrage de soutènement	80
4. Causes d'instabilités	81
4.1. Les facteurs conditionnant	81
4.2. Les facteurs déclenchant	82

5. Méthodes de calcul de la stabilité des pentes	83
5.1. Notion sur le coefficient de sécurité	84
5.2. Méthodes classiques de calcul en équilibre limite	85
5.3. Méthodes des blocs	86
5.3.1. Méthodes des tranches	87
6. Risque glissement de terrain	92
6.1. Le concept de risque	93
6.2. Analyse spatiale du risque glissement de terrain	95
6.3. Approche pour l'analyse du risque glissement de terrain	97
6.3.1. Le concept de la vulnérabilité	98
6.3.2. Types de vulnérabilités	98
6.3.3. Les éléments de la vulnérabilité :	99
7. Conclusion	100
CHAPITRE IV CARTOGRAPHIE DE RISQUE GLISSEMENT DE TERRAIN	
1. Introduction	101
2. Notions de risque, d'Aléa et de vulnérabilité	102
3. Caractéristiques de la zone d'étude	103
4. Acquisition des données	104
4.1. Model numérique de terrain	104
4.2. Cartes de base	107
4.3. Cartes des pentes d'élévations et d'exposition	110
4.4. La carte pluviométrique	114
4.5. L'occupation de sol	115
4.6. Caractéristiques des glissements de terrain étudiés	117
5. Méthode d'estimation de l'aléa, vulnérabilité et risque glissement de terrain	119
5.1. Cartographie de l'aléa	119
5.2. Cartographie de la vulnérabilité	122
5.2.1. Le thème urbanisme	123
5.2.2. Le thème réseau routier et ferré	125
5.2.3. Le thème champs agricoles et forêts	126
5.3. Cartographie de risque total	130
6. Résultats et discussion	130
7. Conclusions	133

CHAPITRE V METHODES DE CONFORTEMENT

1. Introduction	134
2. Le site pilote de l'étude	135
2.1. Interprétation des données géotechniques	138
2.2. La solution de renfort suggérée	138
3. Concepts de base de la MEF	139
3.1. Le code éléments finis PLAXIS	140
3.2. Le système d'options du code Plaxis	141
4. Méthodes d'équilibre limite	141
5 Evaluation de la stabilité du profil (PK 144+880, RN81)	142
5.1. Méthodologie de l'approche	144
5.1.1. Reconnaissance géotechnique	144
5.1.2. Analyse de la stabilité au glissement du talus	145
5.2. Amélioration de la stabilité par renforcement	147
5.3. Résultats et discussion	148
6. Conclusion	159
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	161
<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	
<u>ANNEXES</u>	

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	page
Chapitre I		
I-1	Situation géographique de la wilaya de Souk Ahras.	5
I-2	Morphologie des confins Algérotunisiens	5
I-3	Situation géographique de la zone d'étude	7
I-4	Model numérique de terrain de la zone d'étude	8
I-5	Occupation du sol de la zone d'étude	10
I-6	Principaux Oueds de la zone d'étude	11
I-7	carte hypsométrique de la zone d'étude	12
I-8	Activité sismique au Nord Algérien (2005, 2010)	13
I-9	La carte du zonage sismique de l'Algérie.	14
I-10	Mécanisme au foyer des séismes du Nord Algérien (1900-2010);	15
I-11	Schéma structural des principaux domaines structuraux de l'Algérie	16
I-12	Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue	22
I-13	Carte stratigraphique simplifiée des monts de la haute Medjerda	24
I-14	Schema et coupes structurales simplifiés de la region de Souk Ahras	26
I-15	Principaux éléments structuraux du Nord de l'Algérie	29
I-16	Carte structurale des monts de la haute Medjerda	45
I-17	Coupe géologique à Djebe Madjen	46
I-18	Carte et log stratigraphique simplifié de la zone d'étude	47
I-19	Coupes géologiques en série du domaine autochtone de la Haute Medjerda	48
Chapitre II		
II-1	Variation des moyennes annuelles des précipitations (2000-2018).	54
II-2	Variation des précipitations mensuelles moyenne de la zone d'étude	54
II-3	Variation des précipitations saisonnières de la zone d'étude durant	55
II-4	Variation de température annuelle (2000-2018)	56
II-5	Variation des moyennes mensuelles des températures (2000-2018).	57
II-6	Variation des moyennes saisonnières des températures (2000-2018).	57
II-7	Diagramme embro-thermique de la zone d'étude.	58
II-8	Variation des moyennes mensuelles de l'humidité (2000-2018) en (mm).	59
II-9	Variation des moyennes annuelles de l'humidité (2000-2018).	60

II-10	Variation des moyennes saisonnières de l'humidité (2000-2018).	60
II-11	Représentation graphique du climat de la zone d'étude sur le climagramme	62
II-12	Représentation de la zone d'étude sur l'abaque de l'Indice d'aridité	63
II-13	Situation géographique du bassin versant de Medjerda amont.	68
II-14	Model numérique d'altitude de la zone d'étude.	72
II-15	carte des pentes du bassin versant Medjerda amont.	74
II-16	Longeurs des du talweg principal et de ses affluents dans la Medjerda.	75
II-17	Profil en long de l'oued Medjerda.	77
II-18	Réseau hydrographique du bassin versant de Medjerda.	78
Chapitre III		
III-1	Quelques éléments descriptifs d'un glissement de terrain	87
III-2:	a Morphologie d'un glissement plan. b- d'un glissement rotationnel	88
III-3	a- glissement rotationnel simple. b-Glissement rotationnel complexe.	89
III-4	Ecroulement et chutes e blocs	91
III-5	a: Fluage; b: Solifluxion	92
III-6	Les coulées boueuses	92
III-7	Différents types de rupture circulaire	93
III-8	Remblai sur sol compressible.	93
III-9	Soutènement par clouage, ancrage et murs d'un glissement de terrain	94
III-10	Schéma de rupture plane	100
III-11	Les forces d'une méthode des tranches	101
III-12	Les forces appliqués sur la tranche	102
III-13	Abaque de Junbu simplifié	104
III-14	Forces sur une tranche selon la méthode Morgenstern et Price	106
III-15	Différentes composantes entrant dans la définition analytique de risque	108
III-16	Combinaison de Risque Aléa et Vulnérabilité	109
III-17	Organigramme méthodologique de la cartographie de risque glissement	110
III-18	Les composants de la vulnérabilité	114
Chapitre IV		
IV-1	Situation géographique de la zone d'étude	117
IV-2	Triangulated Irregular Network (TIN) de la zone d'étude	118
IV-3	Modèle numérique de terrain (MNT) de la zone d'étude	119
VI-4	Assemblage des cartes géologiques de la zone d'étude	120

VI-5 a	Carte géologique simplifiée de la zone d'étude	121
VI-5b	Carte des tampons des failles de la zone d'étude	122
VI-6	Carte des classes de pente de la zone d'étude	124
VI-7	Carte des classes d'élévation de la zone d'étude	125
VI-8	Carte de l'exposition des pentes de la zone d'étude	126
VI-9	Carte des précipitations annuelles de la zone d'étude	128
VI-10	Carte de l'occupation de sol de la zone d'étude	129
VI-11	Quelques glissements de terrain dans la zone d'étude.	130
VI-12	Carte d'inventaire des glissements de terrain dans la zone d'étude	131
VI-13	Courbe ROC du modèle retenu, avec le plus grand AUC=0,79	134
VI-15	Carte d'urbanisme de la zone d'étude	135
VI-16	Carte du réseau routier de la zone d'étude	137
VI-17	Carte des champs agricoles de la zone d'étude	139
VI-18	Carte du patrimoine forestier de la zone d'étude	141
VI-19	Carte de vulnérabilité de la zone d'étude.	142
VI-20	Carte de risque aux glissements de terrain de la zone d'étude	145

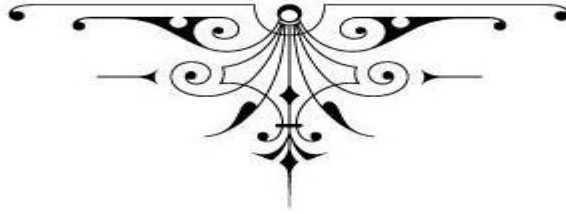
Chapitre V

V-1	Classification des sols suivant l'abaque de Casagrande du site de l'étude	149
V-2	Caractéristiques géotechniques en fonction de la profondeur du site	150
V-3	Manifestation de différentes instabilités de terrain sur le site d'étude	157
V-4 a:	Evaluation de la stabilité du profil en travers au PK 144+880 RN81	159
V-4 b	Déplacements totaux (MEF) du talus du talus au PK 144+880, RN81	160
V-5	Déplacements totaux pour différentes configurations	162
V-6	Déplacements incrémentaux pour différentes configurations	164
V-7	Déformation tangentielle pour différentes configurations	166
V-8	Contrainte tangentielle pour différentes configurations	167
V-9	Points plastiques pour talus renforcé par des différentes configurations	169
V-10	Coefficient de sécurité en fonction des espacements des géotextiles	172


LISTE DES TABLEAUX


N°	Titre	page
Chapitre I		
I-1	Répartition des superficies agricoles (S.A.) dans la zone d'étude	9
Chapitre II		
II-1	Les précipitations totales annuelles (2000-2018).	53
II-2	Les précipitations moyennes mensuelles (2000-2018).	54
II-3	Valeur des précipitations saisonnières (2000-2018).	55
II-4	Les températures moyennes annuelles (2000-2018).	55
II-5	Moyenne mensuelle de température (2000-2018).	56
II-6	Moyenne saisonnière de température (2000-2018).	57
II-8	Humidité annuelle du sol (2000u-2018) en (mm).	59
II-9	Humidité moyenne mensuelle du sol (2000-2018) en (mm).	59
II-10	Humidité saisonnière du sol (2000-2018) en (mm).	60
II-11	Classification d'Euverte	61
II-12	Résultatde calcul d'après la classification d'Euverte (2000-2018).	61
II-13	Classification de Martonne de type de climat, suivant les valeurs de «I»	63
II-14	Résultats de calcul de (ETP) Selon la méthode de Thornthwaite	65
II-15	Bilan hydrique de la zone d'étude	67
II-16	Position, débit et conditions d'émergence des sources	82
Chapitre III		
III-1	Classification selon l'activité en fonction de l'évaluation de la vitesse	90
III-2	Classification selon la profondeur de la surface de glissement	90
Chapitre IV		
VI-1	Répartition des superficies forestières par commune et par type en (Ha)	130
VI-2	Matrice de qualification des classes de risque cartographique	144
Chapitre V		
V-1	Classification des sols du secteur Hammam Tassa	149
V-2	Paramètres issue des essais au pénétromètre dynamique	151
V-3	Caractéristiques géotechniques des sondages SC1, SC2, SC3	158
V-4	Valeurs de coefficient de sécurité des difeerentes méthodes	159
V-5	Récapitulatif des résultats par l'analyse en MEF	171

INTRODUCTION GENERALE



Depuis plusieurs décennies les géologues, les géomorphologues, et les géotechniciens ont essayé par divers moyens, de comprendre les mécanismes et les processus qui génèrent les mouvements de terrain et plus particulièrement les glissements de pentes. Ces mouvements gravitaires initialement naturels sont devenus au fil des dernières années de plus en plus liés aux activités anthropiques. Chaque site potentiellement instable pose des problèmes spécifiques ce qui rend la généralisation et la classification des mouvements de terrain difficiles. Ainsi, on trouve de nombreux ouvrages et articles qui traitent de l'analyse des mouvements de terrain, avec des outils et des méthodes de recherche de plus en plus évolués allant de déterministes à expertes passant par les méthodes probabilistes. On se trouve alors confronté à des problèmes variables ou, soit l'étude que l'on entreprend va permettre d'approfondir la connaissance des phénomènes d'instabilités dans le tell Algérien.

Les mouvements de terrains sont des phénomènes naturels d'origines très diverses. Annuellement, ils provoquent le décès d'environ 1000 personnes, dans le monde. Ils ont aussi un impact économique en causant parfois des dégâts très importants. Mieux comprendre les mécanismes d'apparition de tels phénomènes est essentiel pour réussir les plans d'action et de développement et mettre en place des stratégies de mitigation adaptés.

Les environnements accidentés et jalonnés du Nord Algérien souffrent sérieusement de cet aléa. Notre thèse a pour objectif de fournir une étude valide assistant les décideurs et les aménageurs de territoire, dans la planification, les choix d'aménagement et la prise de décision dans ces environnements montagneux, dont est connu le Nord-est Algérien. Par conséquent, il s'agit aussi de documents

cartographiques; qui exigent l'adoption d'une approche multifactorielle et pluridisciplinaire. Le cadre de ce travail se situe essentiellement en géologie, Géotechnique et Géomatique. Le choix d'une recherche sur les risques naturels s'explique par le fait qu'ils sont peut appréhendés dans les régions montagneuses de l'extrême Nord-est Algérien. La méthodologie de recherche est une interaction entre trois approches complémentaires, interprétant l'aléa, la vulnérabilité, et le risque glissement de terrain, chacun s'inscrivant à l'intérieur du même espace.

Notre étude portant sur Analyse de l'activité de glissement de terrain et relation avec les conditions climatiques. Ainsi que le risque glissement de terrain dans les territoires du chef-lieu de wilaya de Souk Ahras et la commune limitrophe de Zaarouria. L'analyse s'est limitée volontairement à ces deux types de territoire afin de comparer entre deux environnements physiques semblables de point de vue géologique, climatique et environnemental, mais très dissemblable de point de vue démographique et tissu urbain. Certaines études concernent actuellement les villes et leur périphérie du voisinage de notre zone d'étude, notamment dans le contexte de changement climatique. On peut évoquer celles de Hadji et al. 2017; Mahdadi et al. 2018 et Mebrouk et al. 2019. Cependant, nous pensons que les territoires ruraux, majoritaires en surface en Nord-est Algérien, doivent avoir plus d'intérêt dans l'étude des différents risques majeurs en Algérie. Les territoires situés au centre de la wilaya de Souk Ahras, se caractérisent par des lithologies kaotiques du Trias, des formations marneuses et argileuses du Crétacé, et des dépôts lâches du Mio-plio-quadernaire, couplés à un relief en pente; sont le siège d'importants mouvements de pente. Différents types mouvements de terrains ont pu être décrits sur presque tous les versants de la wilaya de Souk Ahras tel que: les glissements de terrain par rupture de versant instable; les chutes de pierres et de blocs, les écroulements en masse, les coulées boueuses, le retrait-gonflement des argiles du trias, etc. L'action des agents météorologiques tel que la pluie, la neige et le gel, etc. sur les falaises et les versants argilo-marneux peuvent engendrer des glissements rotationnels, plans, complexes, des solifluxions et des coulées. Ces phénomènes sont difficiles à prévoir mais reviennent chaque saison pluvieuse sous ces mêmes conditions.

Il est connu que n'importe le quel de ces glissements peut se transformer en risque potentiel sur le territoire au cours du temps. La présence d'enjeux sur son parcours représente un problème majeur, car par son intensité, fréquence et énergie, il

peut couper les réseaux de communication et détruire le bâti et les propriétés des populations vivant dans ces territoires escarpés.

La présente thèse s'insère dans le cadre d'un projet de l'étude des risques naturel notamment les glissements de terrain dans le nord-est Algérien. Il s'appuie sur plusieurs travaux de recherche, qui ont fait en partie l'objet de publications scientifiques, et dont les références sont signalées dans le corps du manuscrit de thèse et dans la section références bibliographique.

Notre travail est le fruit d'une conception tant théorique que pratique du phénomène, où la nature des mouvements de pentes et leur variation dans l'espace et dans le temps a été abordée en prenant en compte l'action simultanée des facteurs topographiques, géologiques, anthropiques et environnementales. Pour mieux coordonner l'effet de ces différents facteurs, nous avons fait appel à l'usage d'outils de la géomatique notamment l'imagerie satellitaire et le système d'information géographique. Dans ce dernier, le stockage, l'analyse, le traitement, le calcul, et la cartographie des différents types de données ont été géré. Ce travail est abordé suivant deux types d'analyses:

- Une analyse spatiale d'estimation de risque basée sur le traitement statistique des informations.
- Une analyse classique de calcul de stabilité des versants d'un site pilote (Hammam Tassa) dans la zone d'étude.

Après une introduction générale exposant la problématique de la recherche et annonçant l'objectif de la thèse; notre manuscrit de thèse se compose de cinq chapitres:

Le premier chapitre expose la situation géographique, le contexte général, les conditions géologiques, sismo-tectoniques et morfo-structurales de la région d'étude ;

Le deuxième chapitre analyse la climatologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie de la région. D'où un traitement statistique des données climatiques a été fait afin d'établir le bilan hydrologique de la zone d'étude. Cette analyse est fondamentale pour approcher l'évaluation de la susceptibilité et du risque glissement de terrain sur des fondements raisonnables;

Le troisième chapitre, passe en revue différent types de mouvements de terrain. Ainsi qu'un état d'art sur les diverses approches employées pour l'évaluation et de

cartographie de la susceptibilité, aléa, enjeux, vulnérabilité et risque glissement de terrain;

Le quatrième chapitre utilise une approche SIG pour évaluer le risque glissement de terrain à travers les étendus de la zone d'étude à savoir la commune de Souk Ahras et Zaarouria. Un model probabiliste a été méthodologiquement employé pour l'analyse de l'activité de glissement de terrain et relation avec les conditions climatiques;

Le cinquième et dernier chapitre, présente une caractérisation géotechnique de la stabilité de versant du site Hammam Tassa, commune de Zaarouria, wilaya de Souk Ahras. Ce chapitre identifie des intervalles de stabilités et sur seuil de ruptures pour les différents variables.

Enfin une conclusion générale synthétise les différents aspects des processus des mouvements gravitaires en résumant les résultats distinctifs issus des cinq chapitres précédents. Des recommandations et des perspectives de recherche clôturent cette conclusion et la thèse.



CHAPITRE I

CADRE GEOLOGIQUE ET ENVIRONNEMENT PHYSIQUE

1. Présentation de la zone d'étude

La wilaya de Souk-Ahras se situe au Nord-est de l'Algérie. Limitrophe de la wilaya: d'El-Taref, et Annaba au Nord, Guelma à l'ouest, Tébessa au sud et la Tunisie à l'est (Fig.I-1). Elle occupe une position stratégique entre le Nord, les hauts plateaux et le sud du pays. Cette wilaya se caractérise par un relief montagneux occupant environ 60 % de sa superficie totale (Fig. I-2).

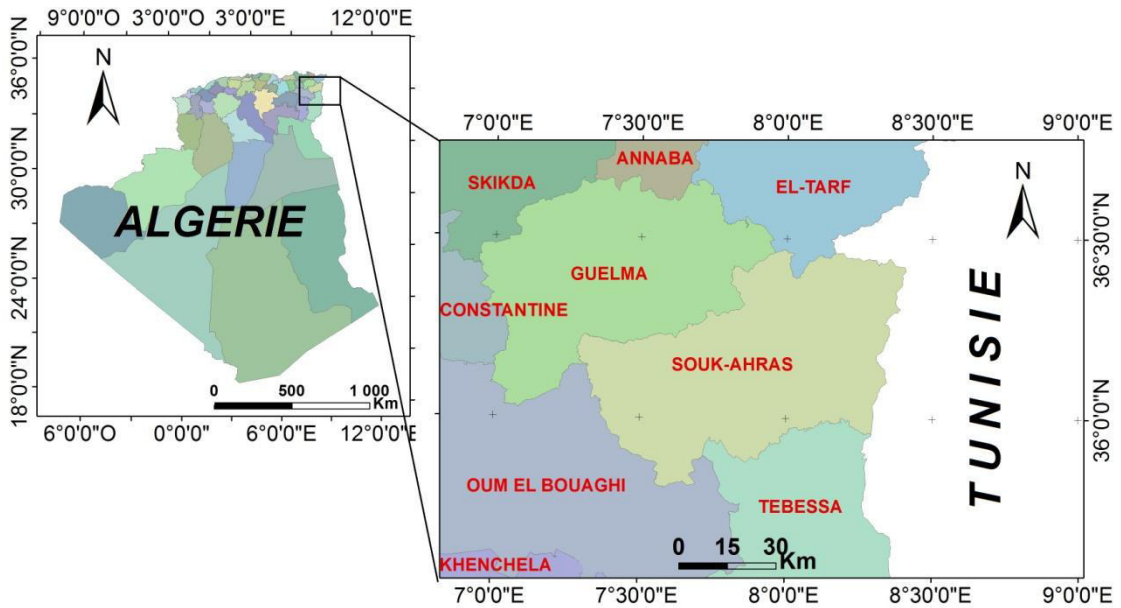


Figure I-1: Situation géographique de la wilaya de Souk Ahras.

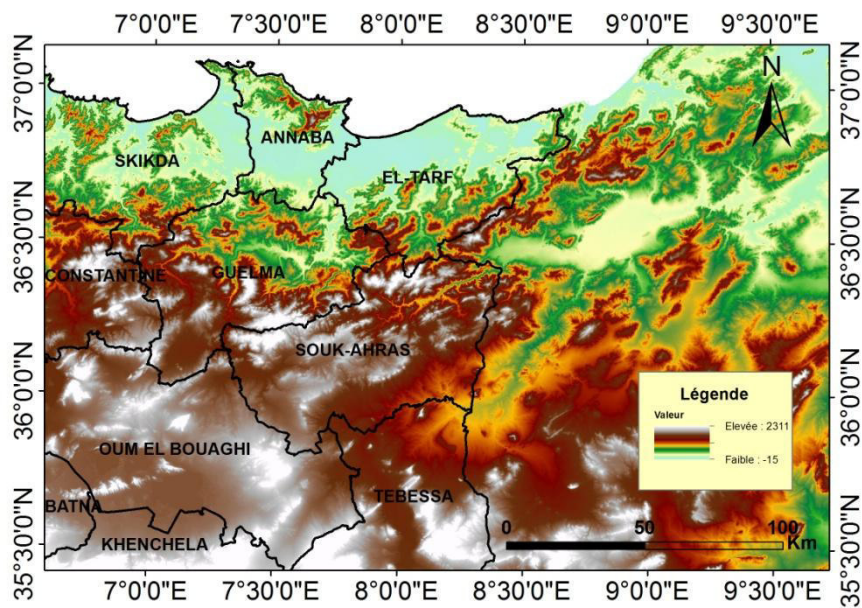


Figure I-2: Morphologie des confins Algéro-tunisiens

La wilaya de Souk Ahras s'étale sur une superficie totale d'environ 4359,65 km², sa surface représente presque 0,18% de l'ensemble du territoire national. Répartie administrativement sur 28 communes et 10 daïras. Son couvert forestier, composé de pins, d'Alep, de cyprès et d'eucalyptus, est estimée à plus de 97280 ha. La wilaya se caractérise par une population résidente de plus de 438127 habits, donnant une densité de 101 habitants/ Km², avec un taux d'accroissement annuel moyen égal à 1,8% (ONS 2008). Son climat est semi aride avec une dominance méditerranéenne au Nord, et continentale au Sud (Fehdi, 2008). Traversée par d'importants oueds maghrébins, le Seybouse, la Medjerda, et le Mellègue; la wilaya dispose de deux grands barrages (Aïn Dalia et Oued Djedra, dont la capacité totale dépasse les 200 millions de m³) et de plusieurs retenues collinaires satisfaisant les besoins de la wilaya en AOP et l'irrigation. Ses principales montagnes sont Dj. Meida (1423m), Dj. Kelaia (1286m), Dj. Zouara (1292m) et Dj. Dekma (1120m). La wilaya de Souk Ahras dispose d'un réseau routier dense et bien entretenu de plus de 1200 km linéaire, d'une électrification très dense, touchant plus de 90% de son territoire. La configuration géomorphologique de la wilaya laisse apparaître deux grands ensembles :

Un nord montagneux et forestier composé de 12 communes d'une superficie totale de 1879.58 km², caractérisé par une altitude moyenne de (1000 m), une pluviométrie importante et la dominance en élevage bovin et arboriculture fruitière;

Un sud en hautes plaines et pâturages englobant 16 communes avec une superficie de 2480.07 km², la pluviométrie moyenne est de 350 mm/an. Cette zone est caractérisée par une altitude moyenne de (650m) et une forte dominance d'élevage ovin et de production céréalière.

La zone concernée par l'étude de risque glissement de terrain se situe dans la partie centrale de la wilaya de Souk Ahras, entre 36°06'04,97'' à 36°19'26,69'' N et les Longitudes 07°51'11,38'' à 8°04'19,52''E. Elle englobe les communes de Souk Ahras et Zaarouria et se répartie sur une surface totale de 206,146 km². Cette zone réunit une population résidentielle estimée à 186,760 (en 2011). Elle est caractérisée par une forte dynamique démographique et agricole et présentera un pôle de développement futur de la wilaya, (Fig. I-3).



Figure I-3 : Situation géographique de la zone d'étude (Abdelouahed et al. 2017).

Le site pilote de l'étude implique un tronçon de la route nationale RN81 (Pk 114 + 880) localisé dans la localité de Hammam Tassa, commune de Zaaouria, wilaya de Souk Ahras ayant pour positionnement GPS $8^{\circ}14'28''N$ de longitude et $36^{\circ}14'19''E$ de latitude et 1590m d'altitude. Le site d'étude se situe dans la zone de montagne, de pente naturelle entre 20° et 35° . L'altitude varie de 1530m à 1660m, et le dénivellement entre 20m et 60m. Le sol est recouvert de terre végétale et de cailloux limoneux. Les fissures des diaclases millimétriques à centimétriques de largeur et métrique à décimétrique de longueur sont bien visibles sur la couche de roulement de la chaussée; avec une intercalation entre 20mm et 100mm et des rejets d'ordre centimétrique à décimétrique. Le substratum est en mauvaise intégralité, avec des roches relativement molle, facilement altérable.

1.1. La topographie

La zone d'étude présente une allure d'une dépression ouverte vers l'Est. Ses altitudes varient entre 480 m (dans le lit de l'oued Medjerda) et 1090 m dans les montagnes au centre de la région étudiée (le sommet le plus haut de la zone d'étude est le Djebel Chouga à hammam Tassa, 1090m), (Fig. I-4). La partie centrale de la région est constituée d'un fossé tectonique enserré par des montagnes escarpées au Nord-ouest

et au Sud-est. Le relief se caractérise, par une altitude qui diminue régulièrement du SW vers le NE, une dissymétrie du relief apparaît transversalement avec une pente NW. Deux directions structurales majeurs caractérisent la région une direction atlasique NE-SW et la seconde d'orientation NW-SE à WNW-ESE, liée de la tectonique miocène.

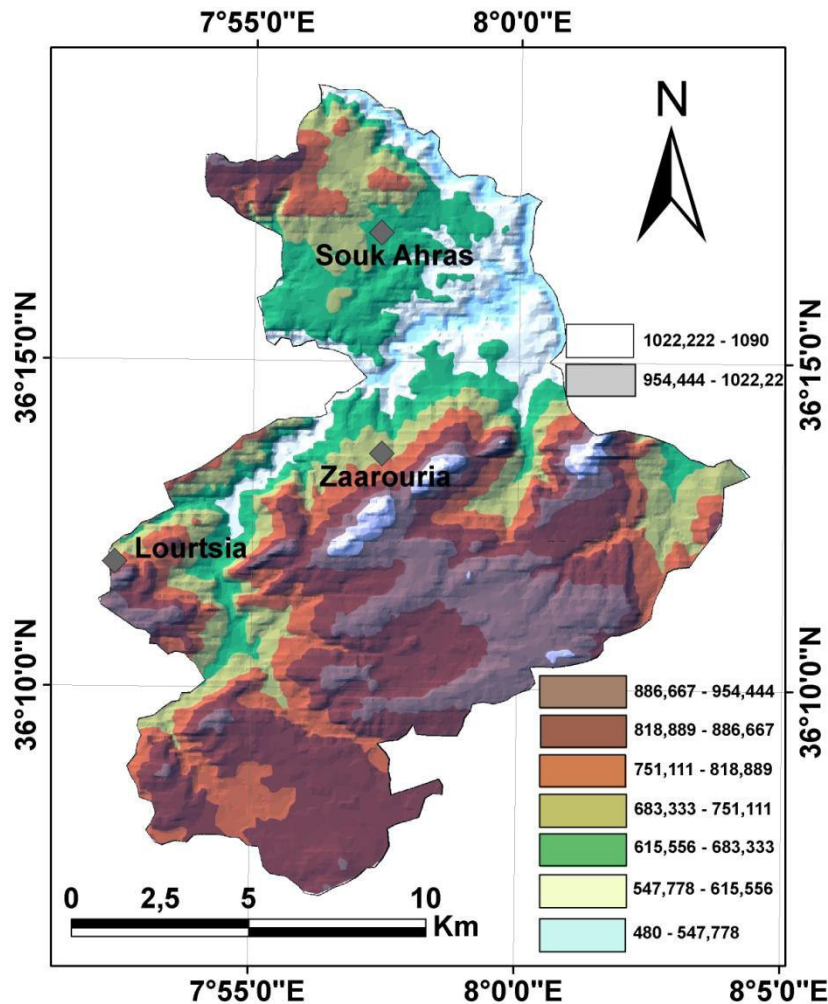


Figure I-4 : Model numérique de terrain de la zone d'étude (Abdelouahed et al. 2017).

1.2. La végétation et couvert forestier de la région

La configuration géographique de la zone d'étude laisse apparaître trois grands ensembles nettement distincts :

Nord-est : Zone montagneuse faisant partie de la chaîne Tellienne et qui constitue le patrimoine forestier de la région ;

Sud-est : Zone constituée de plaines agricoles et de pâturages ;

Sud : Zone des hauts plateaux.

Les forêts cumulent 114341 H (44,41 %) de la superficie totale de la wilaya de Souk Ahras; Ils sont essentiellement concentrés au niveau des communes de Mechroha (75,48 %), Ouled Moumen (50,01 %), Ain Zana (52,98 %) et Zaarouria (49,53 %).

On constate dans le tableau I-1 et la figure I-5 que les céréales représentent 87 % des cultures herbacées et que ces derniers représentent 62 % de la superficie agricole utile. Par contre la (S.A.U) représente 86 % de la superficie agricole totale et 55 % de la superficie totale de la région, tandis que la (S.A.T) représente environ de 65 % de la superficie totale.

Tableau I-1 : Répartition des superficies agricoles (S.A.) dans la zone d'étude.

Commune	Superficie	S.A.T. (Ha)	S.A.U. (Ha)	Terres nues(Ha)
Souk Ahras	4307	1495	1315	641
Zaarouria	10100	8560	7552	300

La végétation n'est pas considérée dans ce travail sous son aspect botanique ou phytogéographique, mais plutôt sous son aspect de couverture du sol, plus ou moins altéré par les actions anthropiques. Nous en adaptons donc la présentation afin de distinguer les différents types de végétation.

La partie Nord ou dominant les élévations et les crêtes est marquée par une pluviométrie importante et des forêts denses de chêne liège, chêne Zeen et chêne afférés constituant de véritables maquis surtout à Dj. Regoune, Dj. Kelia et Djebel Zaarouria (Fig. I-5). Le climat devient moins humide en se déplaçant vers le sud, moins élevés où le couvert végétal est principalement à base de pin d'Alep et les cultures méditerranéennes; l'élevage ovins est plus abondant. Les cultures de céréales sont localisées sur les formations marneuses dans la partie septentrionale de la région d'étude. Sur les calcaires, les sous-bois, pinèdes, et maquis dominent. Les zones caillouteuses et les encroûtements calcaires sont couverts de végétation de type steppique. Un total de 96 765 Ha est destiné pour la production bois domestique, bois industriel et liège.

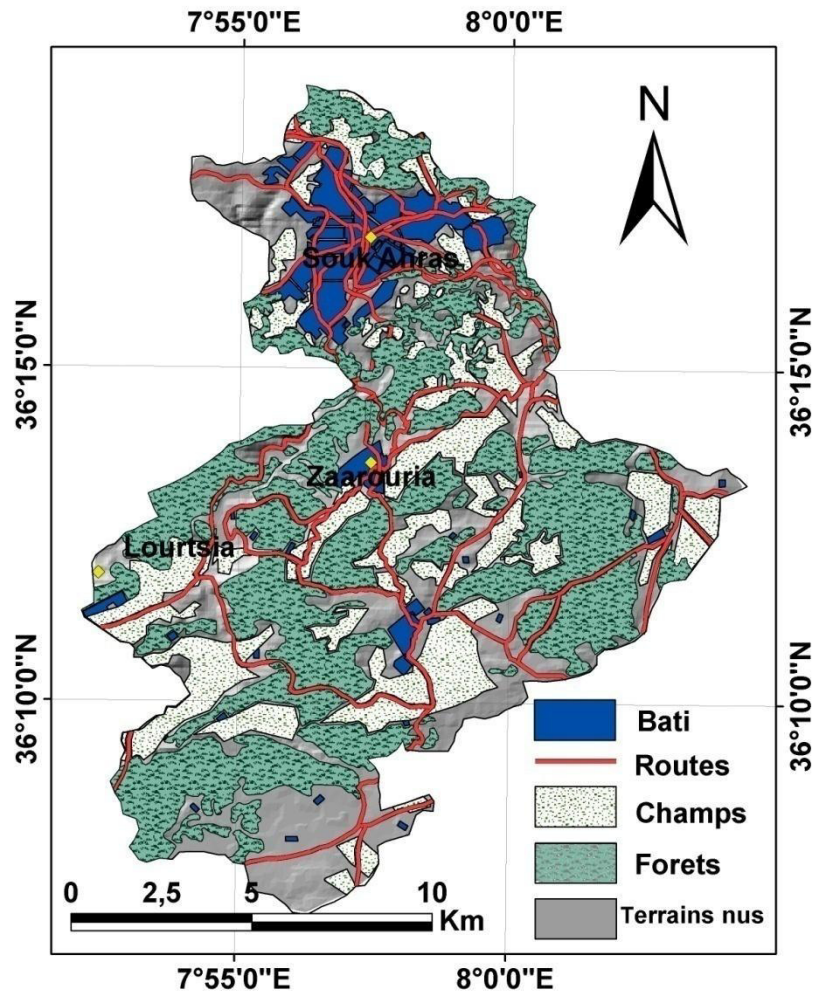


Figure I-5. Occupation du sol de la zone d'étude.

1.3. Le réseau hydrographique

La zone d'étude fait partie des Monts de la haute Medjerda au nord et du haut du synclinal de Dréa Taoura-Merahna au sud. Le réseau hydrographique est bien développé; il est représenté avec des petits cours d'eau temporaires bien élaborés aux flancs des talus, se déversant aux larges des vallées dans des grands oueds dont les plus importants sont oued Medjerda, oued Mellègue, oued Chouk, oued El Hammam oued Meiza, oued el Ouldja et Oued Baleum.

L'oued Medjerda coule le long de la zone d'étude, son écoulement pérenne est lié aux précipitations hivernales et du printemps, il est soutenu par le système aquifère existant. L'oued Mellègue draine le sud de la zone d'étude, ses cours d'eau sont moins chargés en eau que la Medjerda; et ses affluents sont à écoulement intermittent, (Fig. I-6).

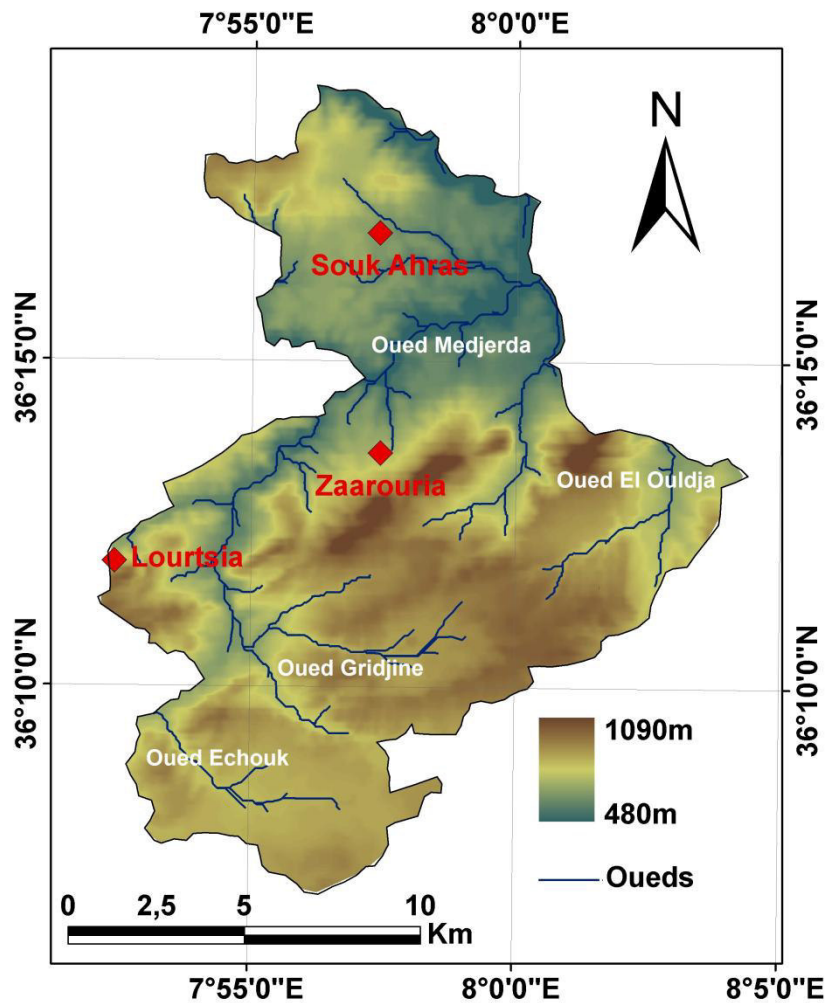


Figure I-6: Principaux Oueds de la zone d'étude.

Le model topographique montre une direction préférentielle d'écoulement du système hydrographique: une vers le Nord-ouest de la ligne de crête de Dj. Serrou, Dj. Zellez, Dj. Bousessou et Dj. Baba Mbarek, suivant la direction topographiques des flancs ouest des montagnes; et l'autre vers le Nord-est suivant le plongement géométrique, ce dernier caractère est typique de la majorité des oueds de la région (Fig. I-7).

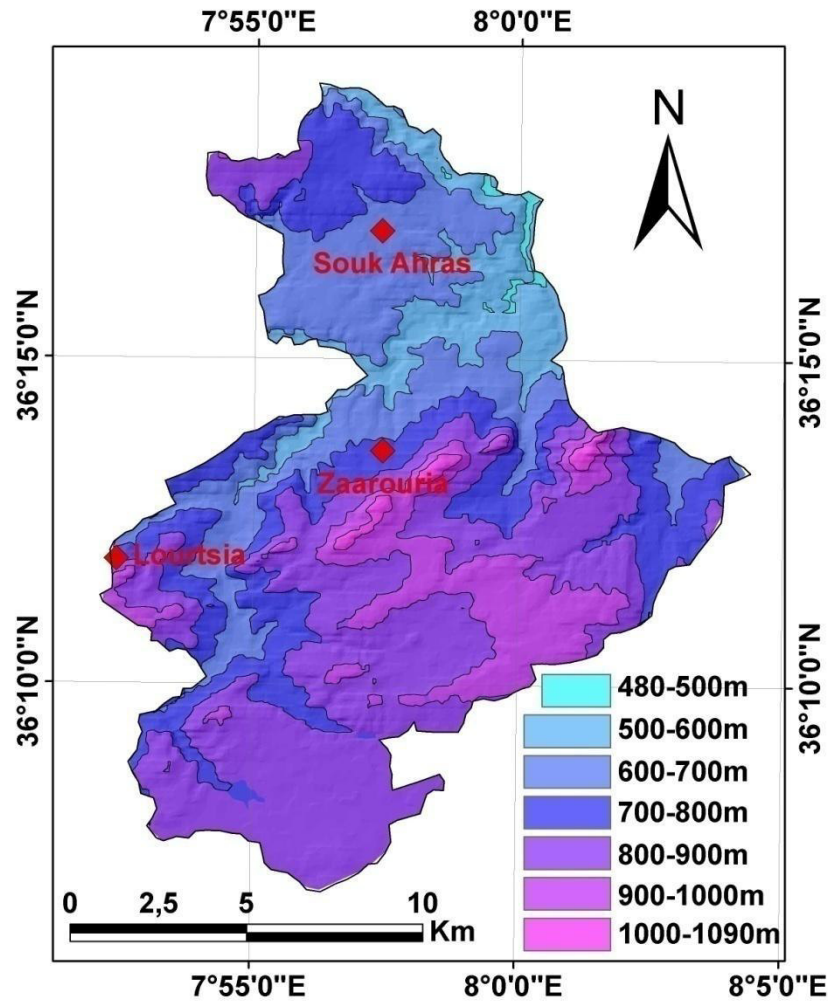


Figure I-7: carte hypsométrique de la zone d'étude

1.4. Le contexte socio-économique

La zone d'étude est située dans la zone intermédiaire entre la wilaya de Tébessa et Annaba. Elle est traversée par deux routes nationales et la principale ligne ferrée minière assurant le transport des minerais de fer et de phosphate (de Dj. Onk, Ouenza et Boukhadra). Elle se caractérise par une occupation de l'espace plutôt lâche dans le sud avec une dotation naturelle relativement modeste. Cette différence de potentiel entre cette zone et le nord explique les mouvements de populations agricoles et pastorales en direction du chef-lieu, par un comblement progressif des espaces sous occupés.

L'économie de la région repose principalement sur les activités agricoles situées en amont et en aval de l'agriculture et urbaines principalement de service. Elle est en effet à forte vocation pastorale et a d'ailleurs constitué une zone de parcours et de transhumance des troupeaux ovins. La région connaît une activité agricole importante, avec une très grande variété de cultures, céréalières, maraîchères et arboricoles.

1.5. La sismicité de la région

Les études sismologiques ont démontré que l'activité sismique est essentiellement concentrée dans le Nord du pays. Les régions intérieures sont caractérisées par une sismicité diffuse. Le réseau de surveillance enregistre près de 50 secousses par mois. La plus grande partie de cette activité est guère ressentie car de faible magnitude et se produit loin des centres urbains.

Les travaux sur le zonage sismique du Nord Algérien (2005, 2010) proposés par le CRAAG en 2011, montrent que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise à un degré d'aléa sismique le plus élevé (Fig. I-8).

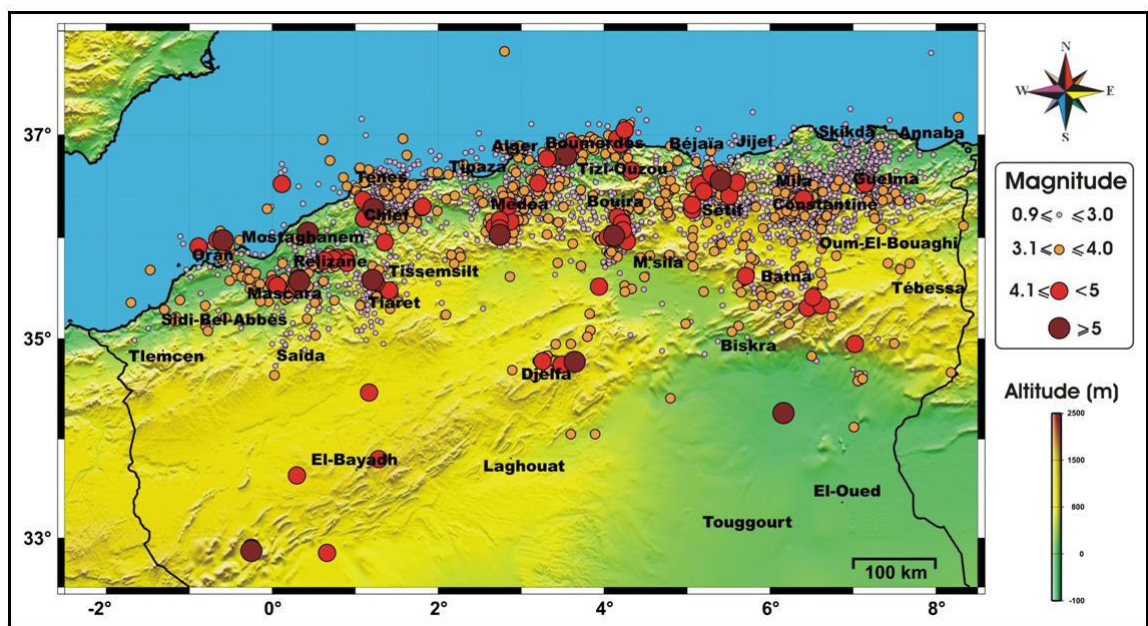


Figure I-8: Activité sismique nu Nord Algérien (2005, 2010), (CRAAG 2011)

Le règlement parasismique Algérien (version 2003), partage le territoire national en cinq zones de sismicité croissante définies comme suit: zone 0 : sismicité négligeable; zone I : sismicité faible; zone (II a) : sismicité moyenne (tend vers faible a); zone (II b) : sismicité moyenne (tend vers élevée b); zone III : sismicité élevée. La zone d'étude se trouve dans la zone (I), (Fig. I-9).

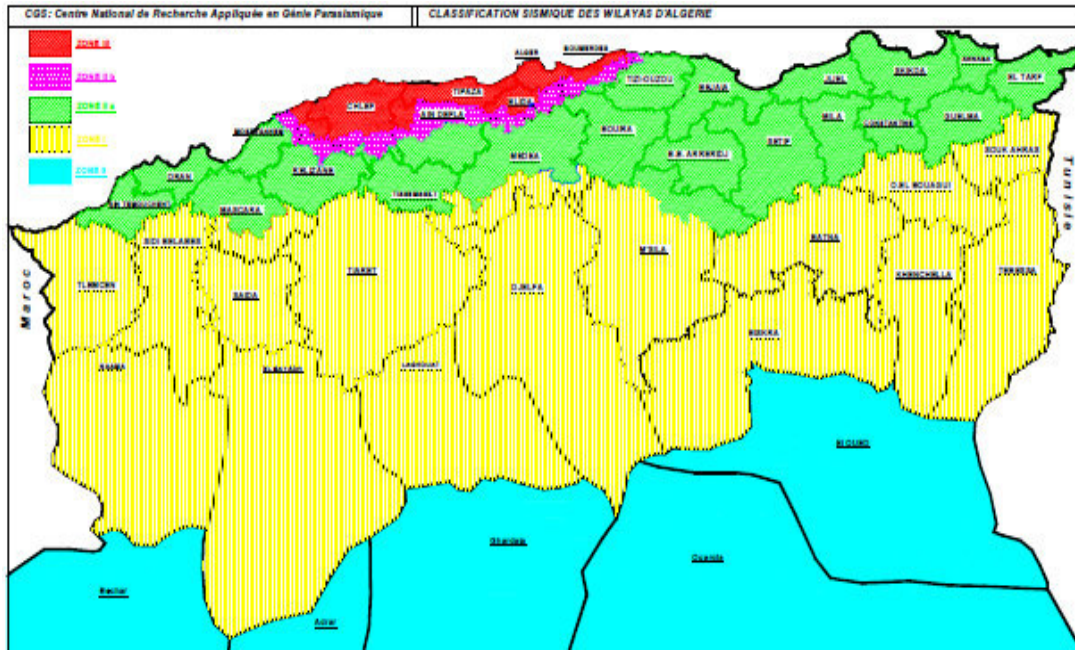


Figure I-9 : La carte du zonage sismique de l'Algérie.

L'examen des rapports, des documents et des cartes sismo-tectonique de la région de Souk Ahras montre que les épicentres des secousses enregistrées, sont situés à proximité des discordances tectoniques majeures, au voisinage des fronts de nappes, et près des failles et des affleurements triasiques. La majorité des secousses enregistrées dans cette région ne dépassent guère une magnitude de cinq sur l'échelle de Richter (Fig. I-10), ce qui cadre la zone d'étude dans une marge d'accélération sismique entre $0,4$ et $1,6 \text{ m/s}^2$ (GSHAP, 1999).

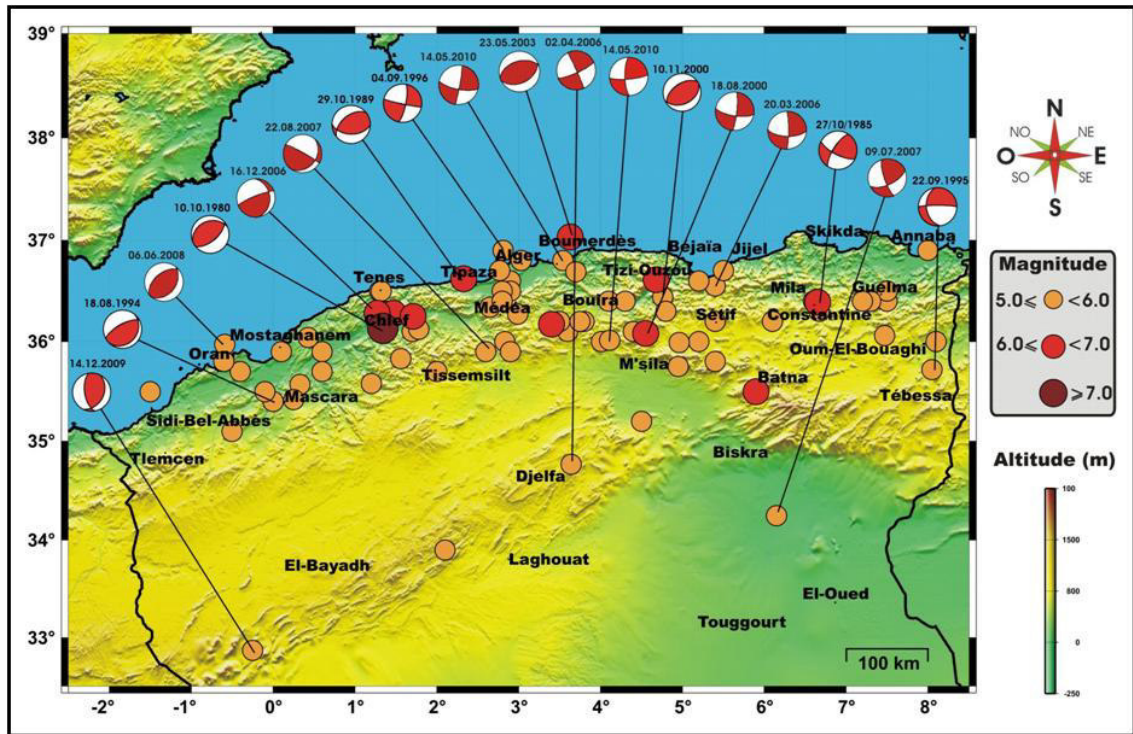


Figure I-10: Mécanisme au foyer des plus important séismes du Nord Algérien (1900-2010);

2 -Cadre géologique régionale

La région de la haute Medjerda dont fait partie la zone d'étude constitue avec l'atlas Tunisien la terminaison Est de la chaîne des Maghrébides qui s'étend sur plus de 2000 Km, du Détroit de Gibraltar jusqu'au Nord de la Calabre (Italie), en passant par le Rif marocain, l'Atlas littoral d'Algérie (Kabylie et Tell), de Tunisie (Kroumirie-Nefza), la Sicile et enfin la Calabre (Fig. I-11), (Aubouin et Durand Delga,1971). Elle représente la zone de contact entre deux des plus grandes unités de la Berbérie; l'atlas tellien et l'atlas Saharien. Le Tell s'est essentiellement structuré lors des mouvements tertiaires, notamment Miocènes.

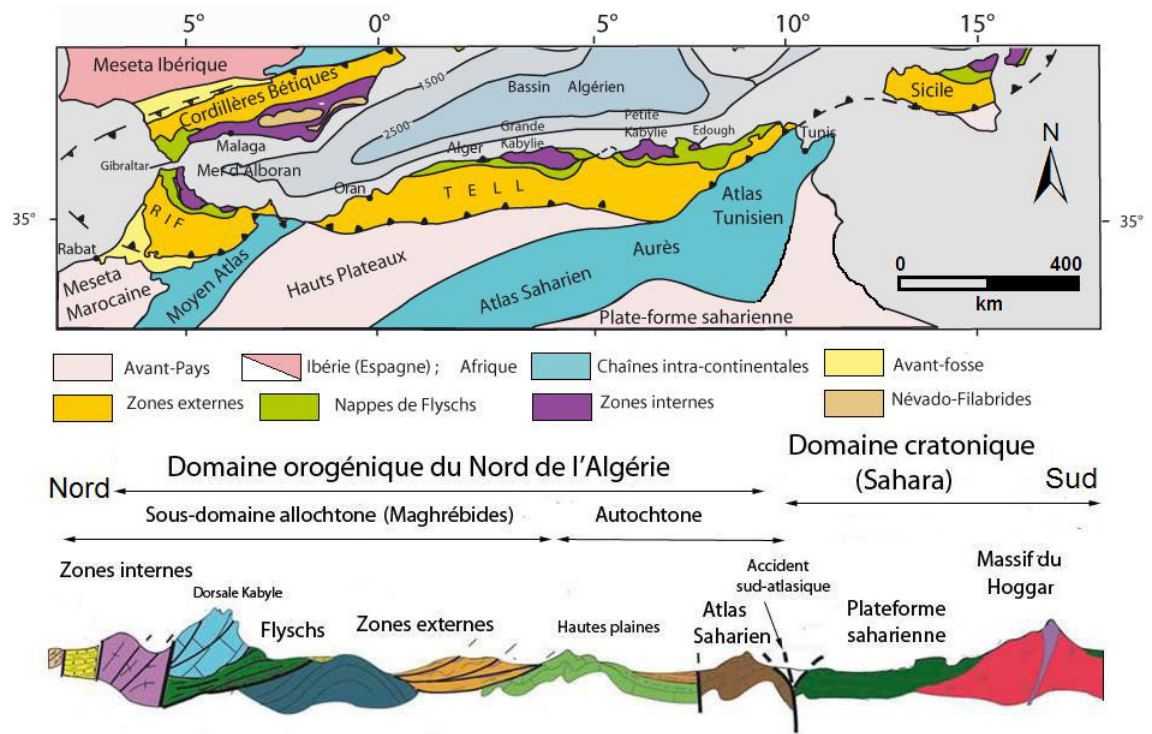


Figure I-11 : En haut: Schéma structural des principaux domaines structuraux de l'Algérie du Nord (Chalouan 1986), En bas une coupe Nord-Sud des principales unités structurales de l'Algérie du Nord (Haddoum, 2001)

Du Nord vers le Sud trois domaines paléogéographiques (interne, médian et externe) peuvent être distingués.

2.1. Le domaine interne

Ce domaine est constitué d'un matériel continental d'origine nord-méditerranéenne et est représenté par des massifs qui se localisent dans deux zones d'affleurements (Durant Delga ,1969; Bouillin et al., 1984)

-Au Nord, par les massifs de la grande et la petites kabyles qui constituent le socle Kabyle.

-Au Sud, par le substratum de la chaine calcaire appelé communément la dorsale Kabyle.

2.1.1. Socle Kabylie

Ces massifs sont constitués par des terrains cristallophylliens anciens de nature variée, surmontés par un ensemble Paléozoïque peu métamorphique. Du Trias à l'Oligocène supérieur, les massifs internes des Maghrébides ont constitué une zone haute, souvent émergée, ce socle est généralement subdivisé en deux grands ensembles.

2.2 Dorsale kabyle

Cet ensemble Kabyle constitue un chapelet de massifs littoraux, bordés au Sud par leur couverture sédimentaire formée surtout de roches carbonatées, d'âge secondaire-tertiaire, appelé Dorsale Kabyle. Cette chaîne calcaire forme la couverture méridionale du socle kabyle (Raoult 1974). La dorsale calcaire intensément écaillée, s'étend de la Sicile à l'Est jusqu'aux cordillères bétiques à l'Ouest en passant par le l'atlas Nord africain ou chaîne des Maghrébides.

2.3. Le domaine des Flyschs (domaine médian)

Le domaine des flyschs forme la zone de transition entre le domaine interne et celui externe. Elle est caractérisée par des formations sédimentaires détritiques terrigènes souvent épaisses ; allant du Crétacé inférieur jusqu'à l'Oligo-Miocène. Ce sont des dépôts de mer profonde, mis en place, généralement sous la Lysocline, par des courants de turbidité. Il semble s'agir surtout de formations de plaines abyssales (Bouillin, 1986).

On distingue du Nord au Sud du bassin des flyschs : les flyschs Mauritanien et les flyschs Massyliens, différant les uns des autres par leur position primitive et par leur alimentation. L'ensemble est surmonté par un dépôt Numidien d'âge Oligocène à Burdigalien basal. Ce dernier a rempli une dépression qui était l'héritière du bassin des flyschs Cétacé-paléogènes.

2.4. Le domaine externe

Les unités telliennes forment un empilement complexe de nappes surmontant au sud l'avant-pays para-autochtone, autrefois connu sous le nom le domaine "présaharien" des hautes plaines (zone haute et rigide qui sépare les chaînes littorales de l'Atlas saharien).

L'allochtone tellien résulte du décollement et du clivage de la couverture sédimentaire Méso-Cénozoïque déposée sur la marge nord de la plaque africaine. En Algérie orientale, on distingue du Nord vers le Sud :

3. Caractéristiques litho-stratigraphiques

Dans les structures géologiques de l'Atlas oriental des confins Algéro-Tunisiens, les formations affleurantes sont caractérisées par des terrains allant du Crétacé inférieur au Néogène et auxquelles s'ajoutent les formations évaporitiques du Trias, (Fig . I-12).

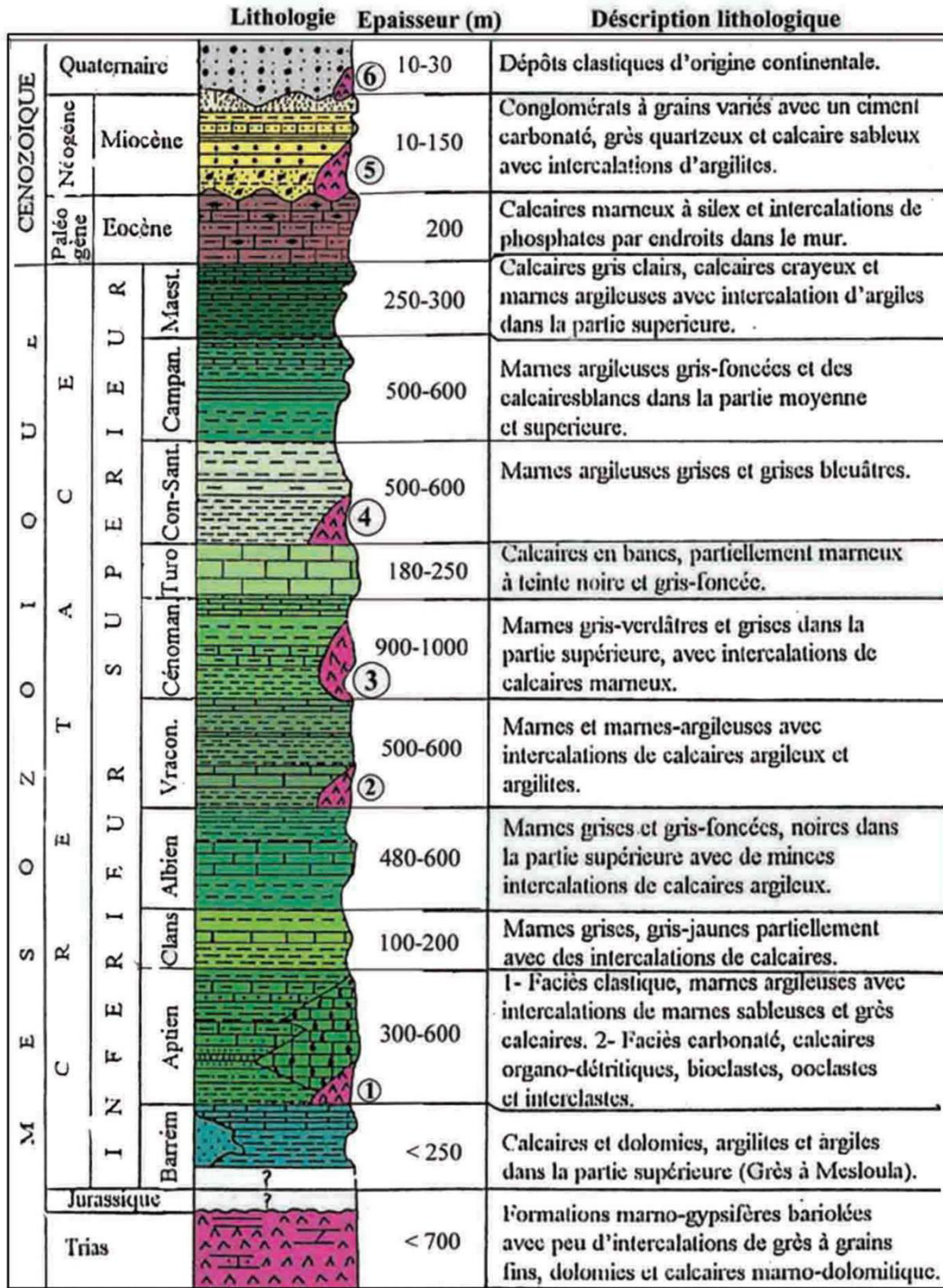


Figure I-12. Colonne stratigraphique synthétique des monts du Mellègue. (D'après : Dubourdiou 1956, 1959; David 1956; Madre 1969; Fleury 1969; Thiéberoz et Madre 1976; Chikhi 1980; Otmanine 1987; Bouzenoune 1993 et Vila et al., 2000.

3.1 Répartition des affleurements de Trias

Parmi les travaux les plus remarquables sur la région de la haute Medjerda, on cite celui de David (1956), qui subdivise la série triasique de Souk Ahras en quatre parties:

- une série détritique;
- une série carbonatée à bancs métriques à faune Ladinienne;
- une série carbonatée à bancs métriques à pluri-métriques de dolomie bleu noir;
- une série détritique et gypsifère.

Cette succession lithologique est comparable avec celle décrite en Tunisie septentrionale. Rouvier, (1977) lui aussi a fait le rapprochement et a attribué les dolomies de Souk Ahras au Muschelklak, (Salaj et Stranik, 1970 et Soussi, 2000). En 1994 Vila et al. ont distingué trois domaines du Nord au Sud:

- Le domaine du Trias allochtone en grandes accumulations tectoniques « au front des nappes » repéré surtout aux environs de Sédrata, Tifech et Ir chef-lieux Souk-Ahras où des recouvrements pelliculaires sur des grandes surfaces sont nettement observables en plusieurs affleurement sur le terrain (Fig. I-13);
- Le domaine à «glaciers de sel», où le matériel triasique re-sédimenté est d'abord analysé au sud de la zone d'étude à Djebel Ladjebel. Une coupe de son flanc nord permet d'observer l'inter-stratification du matériel triasique dans des formations d'âge Albien. Les contacts inférieur et supérieur sont soulignés par des conglomérats polygéniques plus ou moins grossiers ou par des lentilles de carbonates récifaux;
- Le domaine de vrai diapir, localisé dans la région de Tébessa, où des séries carbonatées réduites déposées sur d'anciens dômes de sel et s'épaississant latéralement sur quelques kilomètres. L'abondance de matériel triasique dans la région d'étude explique la grande susceptibilité de ces territoires aux glissements de terrain.

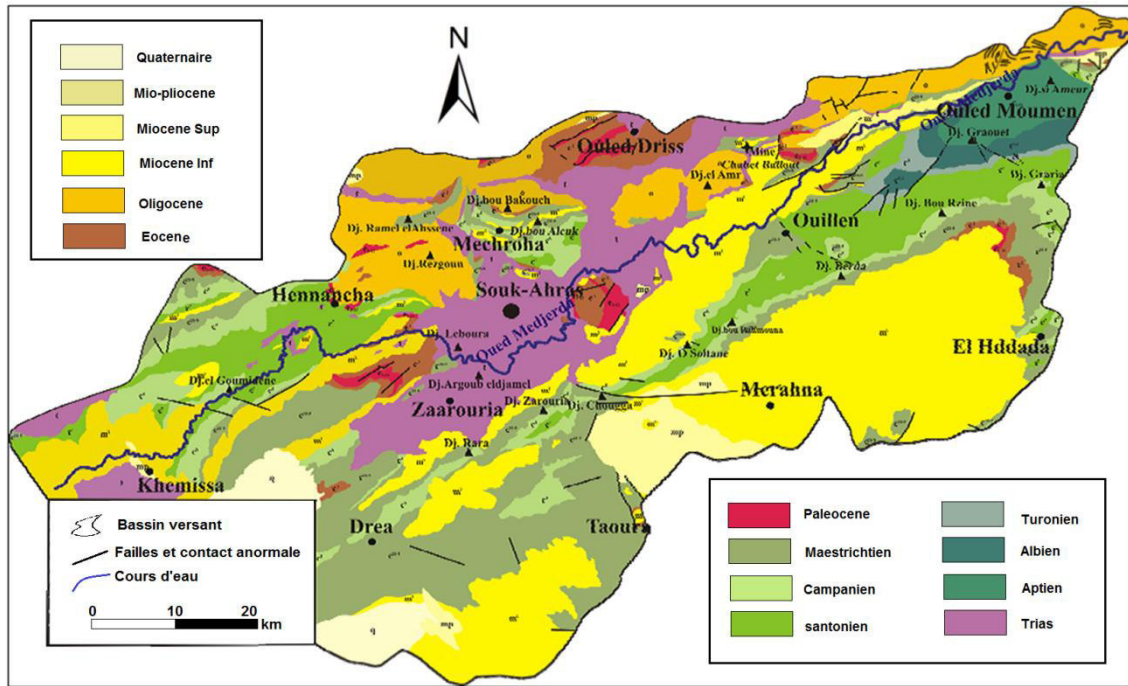


Figure I-13: Carte stratigraphique simplifiée des monts de la haute Medjerda (Guesmi et al. 2007).

3.2 Répartition des affleurements du Jurassique

On ne trouve pas d'affleurements jurassiques dans la zone d'étude. Néanmoins, il apparaît avec des épontements dolomitiques dans le bassin voisin de Hammam N'Bail. A Djebel Nador se localisent des épontements de Lias moyen, considérés comme, tectoniques (David, 1956), ces affleurement font partie d'un horizon sédimentaire (Vila, 1980). Au Nord de Guelma, le Jurassique apparaît à du Djebel Debar, continuité orientale du môle néritique du Constantinois, (Vila et Magne, 1969; Durand-Delga, 1969). Entre Skikda et Annaba, on cite la succession jurassique de la série de DJEBEL Safia-Filfila (Lemoy, 1969; Perrin, 1969), cette série est rangé dans la zone pré-kabyle.

3.3 Répartition des affleurements de Crétacé

Le Crétacé inférieur de l'Algérie orientale est confronté au front de la nappe numidienne, qualifié structurellement, de substratum relatif autochtone des unités sus-jacentes. Les alternances argileuses et gréseuses à la base cèdent la place à des récurrences plus calcaires et marneuses. Les terrains de Crétacé inférieur au nord de l'Algérie s'organisent suivant une bande de direction NE-SW jalonnant les injections de Trias. On reconnaît au sud-est de Taoura des affleurements de Crétacé inférieur sous la forme de blocs exotiques au sein des marnes Sénoniennes.

Les terrains Crétacés supérieurs sont éparpillés dans toute l'aire de la haute Medjerda. Ils sont rangés en deux familles, la première à caractère flyschs et la seconde argilo-carbonatée. La série Cénomano-turonienne est présente au niveau de la vallée de la haute Medjerda. Les séries Albo-vraconiennes démarrent par des marnes grises à petits bancs de calcaires noires, avec dans la partie médiane des niveaux argileux à Glauconie. Des calcaires en bancs séparées par des horizons marneux et argileux, constituent le Cénomaniens, (Rouvier, 1977). La série du Turonien inférieur démarre avec une dalle calcaire, faisant suite à une récurrence d'alternance de niveaux marneux. La série du Turonien supérieur reprend par une alternance de niveaux marneux avec des petits bancs de calcaires noires. Le Crétacé supérieur occupe de larges étendus dans la région de l'Est Algérien. Le Coniacien est marneux, à marno-calcaire, aux confins algéro-tunisiens; Le Sénonien est marno-calcaire; Le Campanien et le Maestrichtien sont essentiellement carbonatés.

4. Caractéristiques structurales

Dès la période pré-tectogénique, au Trias succèdent les phases tectoniques tertiaires au cours desquelles les Maghrébides ont été structurées (Fig. I-14).

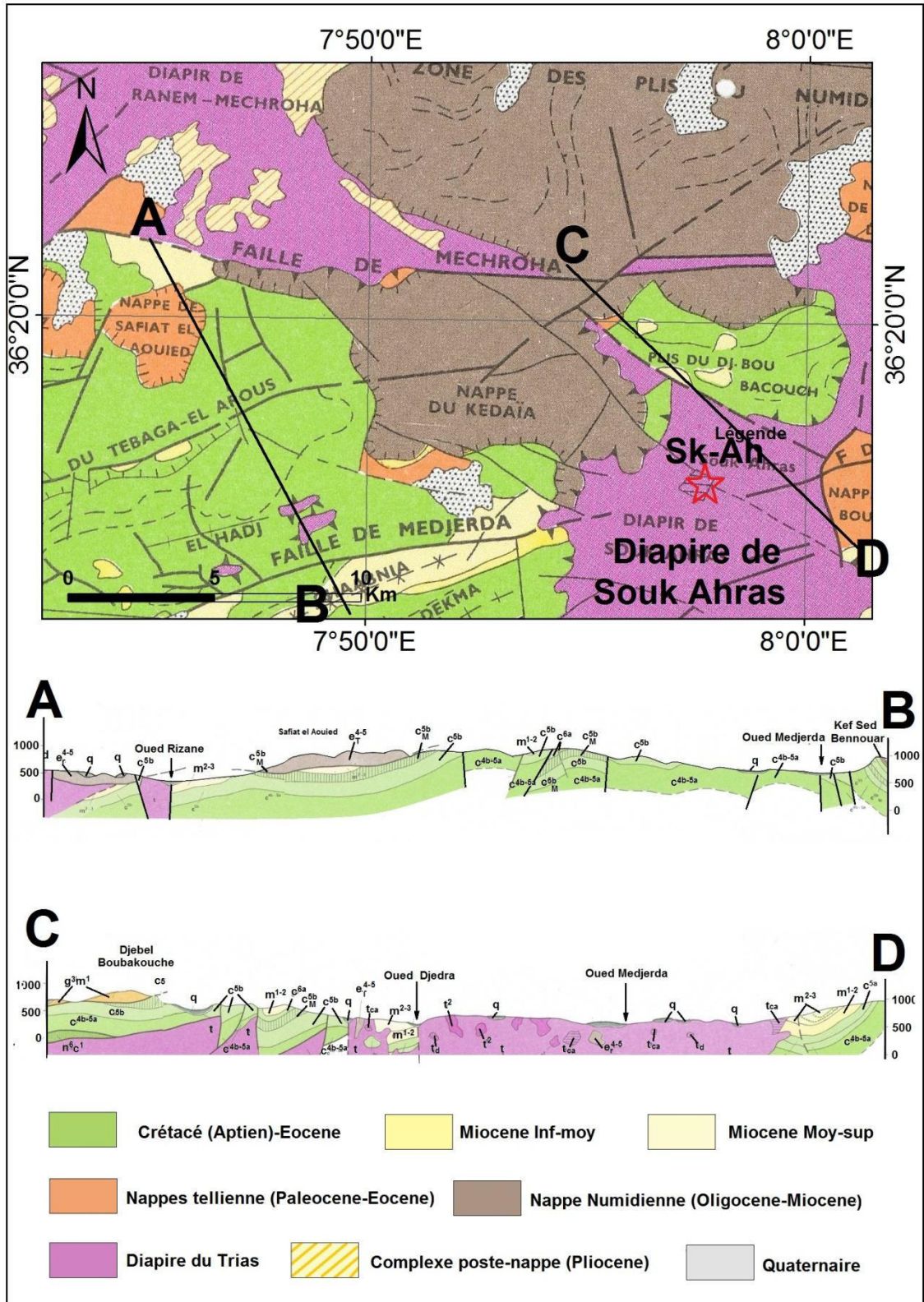


Figure I-14 : Schema et coupes structurales simplifiés de la région de Souk Ahras.

4.1. La phase finie lutécienne ou phase atlasique

Marque la fin du cycle sédimentaire. Cette phase a débuté dès le trias supérieur par des manifestations tectoniques locales de faible incidence sur la sédimentation

(Chadi, 2004). Cette phase à caractère compressif est expliquée par la fermeture de la Téthys occidentale lors de la rotation de l'Afrique autour d'un pôle situé à l'ouest de Tanger, conduisant à la collision entre la partie orientale de l'Alboran et la marge Africaine tellienne. Cette phase est associée à des accidents verticaux de direction Nord-est Sud-ouest.

4.2. Les phases Miocènes

Les phases Miocènes marquent la fin de l'édifice du tell par une compression généralisée des structures

* *La phase burdigalienne*

Elle caractérise le début du raccourcissement Nord-Sud. La partie occidentale de la plaque d'Alboran continue sa migration vers l'ouest, pour entrer en collision avec la marge rifaine de l'Afrique. Cette migration contribue à l'ouverture du bassin Nord algérien. Les effets tectoniques étant :

- l'avancée de la nappe Numidienne vers le sud et la formation d'Olistostomes kabyles dans une dépression septentrionale;
- un bombement à l'aplomb du bord kabyle méridional où s'étaient antérieurement empilées les unités de flyschs sur les nappes telliennes au Priabonien;
- des structures plissées au Sud du domaine kabyle.

* *la phase Tortonienne*

À la fin Miocène inférieur et au début Miocène moyen, des bras de mer envahissent des golfes de la partie septentrionale des chaînes algérienne. Dans les Babors, les premiers sédiments marins post nappes se déposent. Outre cette transgression, il y eut une phase volcanique calco-alcaline et un plutonisme ayant mis en place les intrusions granitiques en grande Kabylie, dans les Babors et en petite Kabylie. Les datations radiométriques y indiquent des âges 12 à 16 millions d'années, correspondant au Langhien-Tortonien basal (Benabbes, 2006).

Au Miocène supérieur basal, la phase tortonienne se poursuit par un vaste raccourcissement nord-sud et l'écrasement des structures par rapprochement des bordures, cette tectonique a eu pour effets des chevauchements vers le sud des unités méridionales, sud-sétifiennes et des écaillés des sellaoua, impliquant les formations postérieures au Burdigalien supérieur. En Algérie extrême orientale, cette phase à caractère tangentiel, a provoqué des écaillages et des structures à tête plongeante.

- La période post- tectogénique Plio- Quaternaire

La période post tectonique s'étend en fait du Miocène supérieur au Plio-Quaternaire et fait l'objet de l'histoire néotectonique référant à échelle globale aux mouvements des plaques (Ibérie, Afrique) et de l'ouverture de la mer d'Alboran.

Dans le cadre de ce travail on se limitera, à échelle ponctuelle, aux effets, tels que les mouvements compressifs et distensifs et le rejet des grandes structures occasionnant des effondrements.

5. Aperçu tectonique

La région d'étude constitue une zone charnière entre deux domaines structuraux distincts à savoir: l'Atlas Tellien au Nord et l'Atlas Saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Cette structure dite Aurassienne est composée d'une série de plis synclinaux larges et d'anticlinaux plus étroits datant du Crétacé. Leur couverture est généralement mince, elle présente une épaisseur de quelques milliers de mètres au maximum. Au nord, vers le Tell et compte tenu des poussées tangentielles venues du Nord, les plis adoptent une orientation Ouest. Cette orientation dite Numidienne est très visible, surtout dans la zone Nord-ouest. Cette compression latérale a réduit la taille de l'ensemble des plis en donnant des synclinaux couchés, dans la plupart des cas failles. Il est donc, remarque un passage progressif de la structure Atlasique à la structure Tellienne sans différence fondamentale. La nuance réside dans les efforts tangentiels générateurs des décollements de la couverture se produisant à la base du système Numidien entre le Crétacé et le Tertiaire, qu'a connu la zone Tellienne. Aussi, la présence des fractures transversales responsables des bassins d'effondrement à fin que les plis Telliens ont subit une légère torsion vers le Nord du côté de la frontière Tunisienne. Le Trias quant à lui réagit pour son propre compte, il est toujours responsable de certaines complication qui comme la zone, il se trouve en position stratigraphique anormale (discordante). Sa grande plasticité lui permet de monter à travers les terrains sous-jacents. Il est remarqué dans les anticlinaux, dans les grandes fractures ou dans les massifs (le massif de Souk-Ahras). La mise en place de cette structure s'est faite comme pour toute la chaîne montagneuse Nord orientale au cours de nombreuses phases orogéniques (Fig. I-15).

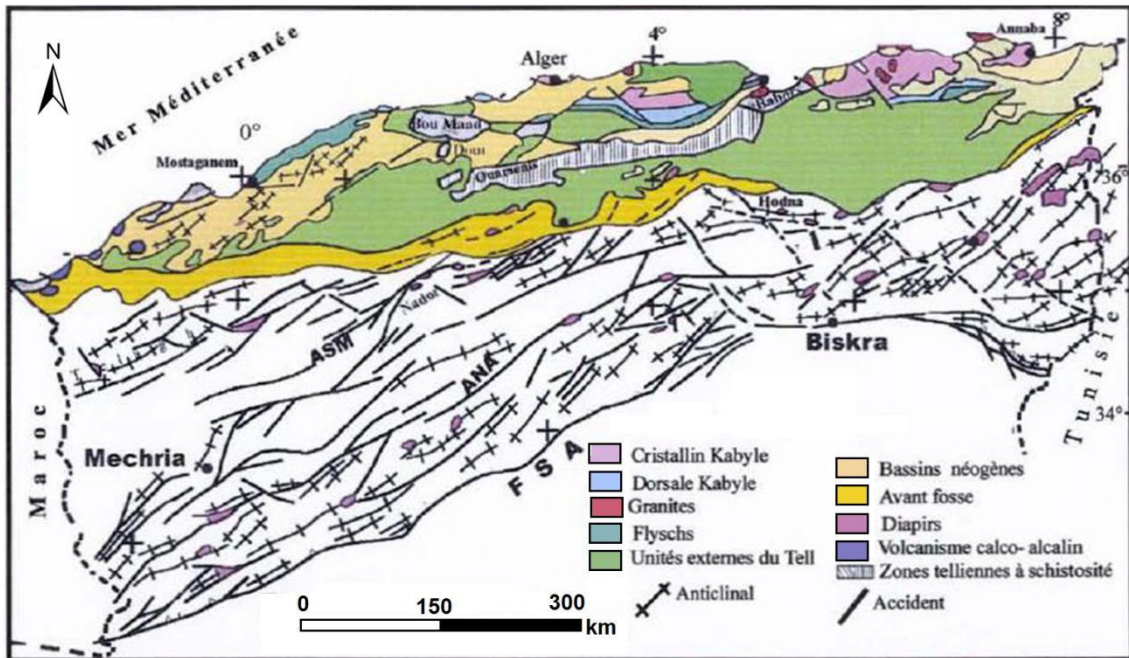


Figure I-15 : Principaux éléments structuraux du Nord de l'Algérie (Djeddi 2000)

5.1. La première phase majeure

Correspond aux périodes post-Oligocène et Ante-Miocène avait mis fin au dépôt Oligocène a facies Numidien. Pendant cette phase, les poussées venues du Nord-ouest étaient très intenses. Elles étaient responsables de la modification de la structure de la zone Nord par la mise en place de la chaîne montagneuse Nord a structure fortement plissée. La zone Sud avait déjà sa constitution définitive et la structure plissée était en place.

5.2. La deuxième phase majeure

Etait Post-Miocène inférieur et Anté-Miocène supérieur pendant laquelle la chaîne Tellienne acquiert sa constitution définitive. C'est la phase a compression maximum ou il y'avait des plis failles et des écailles jusqu'à de véritables nappes de charriage. Cette phase est suivie par autre Post-Miocène et Anté-Pliocène qui correspond à une période de distension ou une partie du socle fracture, s'enfonce lentement. L'entraînement de la couverture vers le bas donne naissance aux bassins d'enfoncement de Taoura et Nador. Vers la fin du Miocène, un autre jeu marque la dernière manifestation. Des plissements autour du bassin du Nador et dans la vallée de la Medjerda.

5.3. La dernière phase

C'est la phase Post-Pliocène qui correspond à la dernière pulsation sensible qui a mis fin à la subsidence des bassins d'effondrement, est plus récente que le Miocène supérieur de Taoura

5.4. Description tectonique Régional

La région présente un intérêt majeur du point de vue structural : les deux grandes unités fondamentales (David 1956): Chaines telliennes et atlas saharienne. y viennent directement en contact, la zone des hautes plaines ayant disparu plus à l'ouest. On peut distinguer plusieurs édifices dans les deux unités précédentes.

5.5. Les nappes de glissement : à l'inverse des dispositifs structuraux communs de la région, il est plus commode de considérer les unités de glissement de l'Est vers l'Ouest on rencontre la nappe de glissement du *Guern djeddi et djebel el Hamra* : elle est complètement isolée de ses racines avec un déplacement important au NE de Souk-Ahras, dans la partie NW de la feuille d'Oued Mougras le long de la bande triasique du Jelmana. Cette unité est constituée essentiellement par des grès et des argiles numidiens et sur son front quelques lambeaux disloqués de calcaires et de marnes Sénoniens ou éocène, ces formations sénoniens existe près du kef Zebbes ainsi que l'Eocène au kef el krarouba .La masse charriée atteint plus de cent mètres d'épaisseur elle s'étend sur une vaste surface de plusieurs kilomètres carrés ,Oued el Mellaha sépare l'ensemble en deux moitiés de Guern Djeddi à l'Ouest et djebel El Hamra à l'Est, la nappe repose à l'Ouest et au NO sur le Trias du massif de Souk-Ahras et du Jelmana au côté Sud-est sur le synclinal de l'oued el Berich d'âge Miocène et à l'Est sur les plis du Chaabet Ballout avec des formations Sénoniens et de Miocène, l'âge de la mise en place de cette unité est nettement post-miocène inférieur.

Les faciès du Crétacé et de l'Eocène son différenciés à ceux des terrains de même âge des plis sahariens ou telliens sur lesquels

Ils reposent .la limite méridionale des affleurements « Numidiens » est presque rectiligne entre djebel bou Bakouch et la frontière avec le substratum originel c'est l'Eocène de la chaine de djebel El Hammam. Vers l'Ouest l'écaille supérieure du djebel bou bakouch est constituée par le « numidien » mais enracinée sur place avec un pendage supérieur à 45°, sauf son extrémité orientale chevauche le djebel bou Aleuk.

Une autre nappe de glissement du *Ras el Kelaia-djebel Kelaia* : elle est fortement chevauchante vers le Sud. C'est là aussi une plus grande plasticité des assises « Numidiennes » qui a permis un glissement d'amplitude très important tel que les

couches sont bouleversées que celle de Guern djeddi, l'écaille s'enfonce sous le Trias de Laverdure et le « Numidien » du djebel Ramel el ahssene ; l'érosion tendent à isoler une grande klippe comprenant le djebel Kelaia et djebel Rezgoun.

5.6. Les Bassins D'Effondrement

On a abordés presque tous les structures décrites jusqu'à présent et essentiellement de type plissé, la où se superposent quelques bassins d'effondrement ; dans notre région étudiée il existe deux seulement l'un est situé dans la zone saharienne près de Gambetta et l'autre est intra-tellien, près du Nador n'Bails aux caractères partiellement différents.

5.6. Les Structures Transversales

Les accidents transversaux majeurs sont en réalités, plus complexes et plus étendues, affectant à la fois les chainons telliens et sahariens ainsi dans les monts de la haute Medjerda existent deux structures transversales majeures .Elles sont marquées avant tout, par de grandes fractures tantôt jalonnées par d'importantes montées triasiques limitant des zones subsidentes effondrées

Du point de vue tectonique est qu'il s'agit de la trace de structures profondes : ce sont des rejets récents du socle ancien affectant toute la couverture sédimentaire superposée .Ces accidents hercyniens et méridiens ont d'abord joué le rôle de rides entraînant la montée d'une grosse masses triasiques, puis ensuite se sont effondrés par panneaux subsidentes. Ce sont également cette direction méridienne qui a provoqué par intervention avec la direction eurasienne, une déviation vers le NNE de la chaîne tellienne, enfin ces accidents ont gêné considérablement la tendance au décollement que présentait la couverture tellienne en divers point.

L'existence de tels alignements qui les expliquaient par la théorie des plis orthogonaux (M. Bertrand) la réalité des ces axes n'était prouvée que par la torsion générale des plis vers le N. Parmi certaines de ces structures transversaux la mieux définie est celle dite du Nador N'Bails sa manifestation la plus visible est le bassin d'effondrement décrit ci-dessus avec ces grandes fractures NNW-SSE vers le Nord, elle se poursuit dans la partie occidentale du massif triasique de Laverdure, vers le Sud les grandes failles du djebel Safiet el Aoueid –djebel Zouara.

Un autre accident transversal est celui de Souk-Ahras ,qui est marqué par deux importantes montées triasiques recoupant les plis telliens :celle de Souk-Ahras à l'Ouest du djebel bou Bakouch ,et celle du Hammam Zaid ,à l'Est du même massif .Cette

structure est jalonnée vers le Nord par djebel Djoua et les failles qui l'accompagnent ,puis par l'alignement S-N des grés Numidiens du djebel Mehabouba et vers le Sud ,le bassin d'effondrement de Gambetta lui appartient manifestement .Son alignement général est S-N et NNW-SSE.

A l'extrême limite de la zone d'étude et le long de la frontière Tunisienne une autre structure transversale semble à l'origine du bassin effondré de la Medjerda et des réseaux de failles NW-SE qui le prolongent au SE.

5.7. La Tectonique du Trias

Dans le tell, le Trias en position normale dans l'axe de certains anticlinaux ainsi celui du Nador n'Bails qu'il voyait reposer sur les roches dites anciennes de la station du Nador et être surmonté par le Rhétien, le Lias et le Crétacé .Nous avons vue que là encore il ne s'agit que de Trias diapir, en contact anormal avec les terrains crétacés et tertiaires (Dareste 1932).

Le Trias des Anticlinaux :

C'est le cas le plus simple, celui où le Trias est le moins dérangé par rapport à sa position initiale. Lors des plissements successifs et sous les voutes des anticlinales et en raison des pressions horizontales subies, il lamine puis perce les strates superposés a lui ; et a laide d'érosion il affleure en leur centre « anticlinaux à noyau de percement » on le trouve dans les plis sahariens d'El Ouenza –djebel Ladjbel et d'El Ouesta –Sakiet dont la structure générale n'est pas modifiée malgré les phénomènes d'étirement ou de torsion des strates.

Le Trias des Ecailles :

Au niveau de la zone tellienne les plis sont plus accentués tel que les plis –failles et écailles sont fréquentes. Le Trias qui se trouve normalement dans les charnières des anticlinaux, se glisse à la base des plis –failles c'est ainsi qu'on le trouve jalonnant les contacts anormaux .Une conséquence de telles montés Triasiques est leur rôle de « lubrifiant » étalé selon le plan de fracture des écailles, ce terrain marno-gypseux et plastique facilite leur chevauchement les unes sur les autres

On note aussi que la présence du Trias à la base de la petite nappe de glissement du Guern Djedi-djebel el Hamra il à facilite son déplacement et se présente comme un « coussinet » sous la partie charriée.

Le Trias à même origine profonde que dans la zone saharienne grâce à la disparition du flanc inverse des anticlinaux et à la discontinuité ainsi créée, il s'est glissé encore plus facilement.

Le Trias des Grandes Fractures :

Il a pu profiter simplement des zones faibles créées par de grandes fractures verticales il faut évidemment que les failles intéressent toute la couverture sédimentaire post-triasique. C'est ce qui se passe pour les grandes accidents transversaux dus au jeu même du socle ancien et à l'origine des bassins effondrés, le Trias insinué alors dans ces zones broyées, les suit vers le haut il s'agit encore d'extravasation sous la pression exercée par la descente du fond post-triasique du bassin, le cas est typique dans le bassin d'effondrement du Nador N'Bails. C'est également le cas au niveau de la faille transverse entre le djebel Bou Bakouch et le djebel Djoua.

Le Trias Diapir :

C'est le cas du Trias des formations gypso-salin qui monte, tel un « piston » à travers les couches superposées et par le fait de sa plasticité. On ne cite que le époinement gypseux situé à l'Est de Zaarouria qui perce seulement les strates du Miocène inférieur et au Nord du djebel Dekma, trois époinement traversent aussi les assises Miocènes au centre d'un petit synclinal.

Le Trias des Grands massifs :

Deux immenses massifs triasiques de La verdure et de Souk-Ahras bien qu'ils puissent participer à la fois de tous les modes envisagés selon les endroits (Fig. I-16).

Sur la partie SW du massif de Souk-Ahras qui appartient encore à la zone saharienne, ils doivent être originellement des montées anticlinales du type de celle du djebel Ladjebel par conséquent, ils correspondent à une zone anticlinal c'est-à-dire à un bombement du socle (celui-ci doit se trouver proche de la surface du sol et le Trias n'apparaît pas au travers d'une importante série sédimentaires, ainsi sa partie orientale du massif, des attaches extravasées au niveau des contacts anormaux des écailles et dans sa partie Nord des montées suivent les failles transversales.

Le massif de Laverdure paraît, pour une large part dû aux fractures profondes de la zone effondrée du Nador N'Bails.

Depuis les premières phases orogéniques du cycle pyrénéo-alpin, le Trias fort épais et plastic, a eu tendance, sous le poids des sédiments et sous l'action des pressions

orogéniques latérales à monter verticalement. Selon les dispositions locales, anticlinaux simples, plis-failles ou zones faibles, il a gagné plus ou moins tôt la surface. Alors il participe activement aux diverses orogènes successives grâce à sa plasticité remarquable, certaines masses triasiques allant jusqu'à se détacher de leur base profonde.

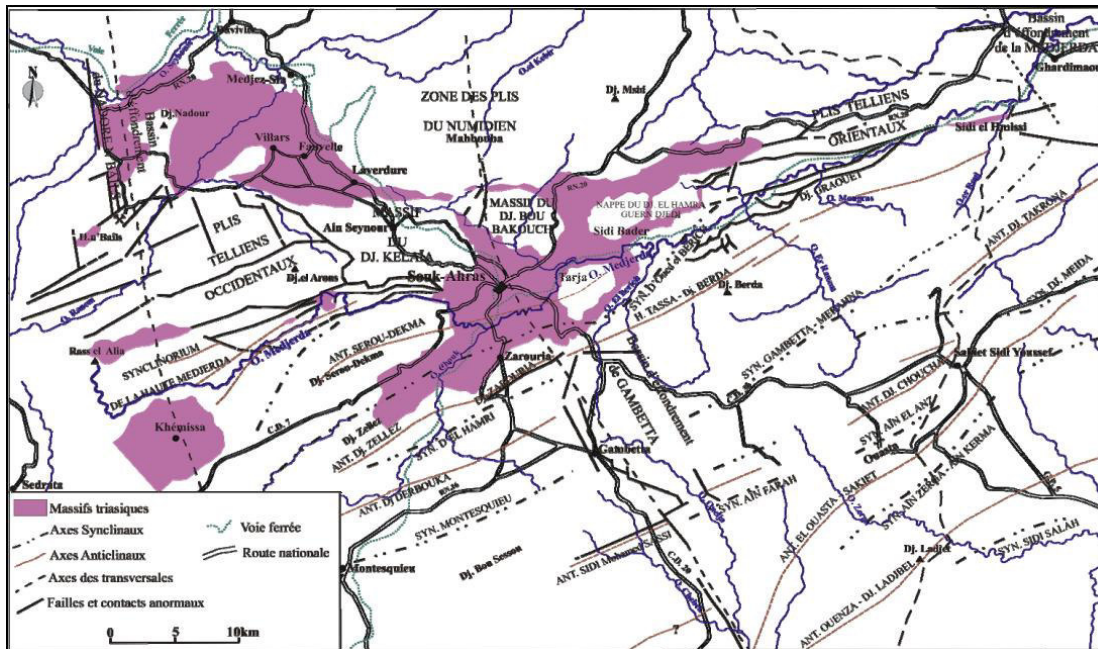


Figure I-16: Carte structurale des monts de la haute Medjerda (Guesmi 2008)

6. Contexte géologique de la zone d'étude

Nombreuses études portant sur l'âge et la lithologie des formations géologiques en affleurement ont été réalisées dans cette région. Elle a fait l'objet d'une étude géologique détaillée par L. David (1956) consacrée aux Monts de la haute Medjerda, en basant sur la lecture de sa carte géologique au 1/200000 complétée par les travaux de J.M. Villa (1980, 1996) notre zone d'étude contient deux ensembles structuraux majeurs : un ensemble autochtone nord Aurèsien caractérisé par une tectonique cassante et de larges plis, et un ensemble allochtone caractérisé par une tectonique tangentielle favorisée par la phase alpine. Le secteur d'étude peut être partagé alors en deux domaines paléogéographiques:

Au Nord: on rencontre le domaine externe de la chaîne des Maghrébides avec les nappes Numidiennes et Telliennes, et un substratum de Sellaoua. Cette chaîne se situe au Nord de l'axe Sédrata, Tiffech et Souk Ahras. C'est la tectonique compressive qui fut responsable de la mise en place des nappes telliennes et les écaillages de Sellaoua;

Au Sud: on rencontre le domaine nord-aurésien, (le synclinal Dréa Taoura-Merahna, la région de Bir Bouhouche et d'Oum El Adaim).

La tectonique de la région est caractérisée par la dominance d'une famille de failles NE-SW, et une deuxième de direction perpendiculaire NW-SE. La présence de ces deux réseaux de failles a facilité la remontée des matériaux triasiques abondants dans la région.

6.1. Environnement géologique de la région d'étude

La région d'étude fait partie du Tell Algérien traversant du Nord au Sud (les nappes numidiennes, telliennes, des unités parautochtones et un complexe salifère triasique) caractérisant comme suite (Fig. I-17):

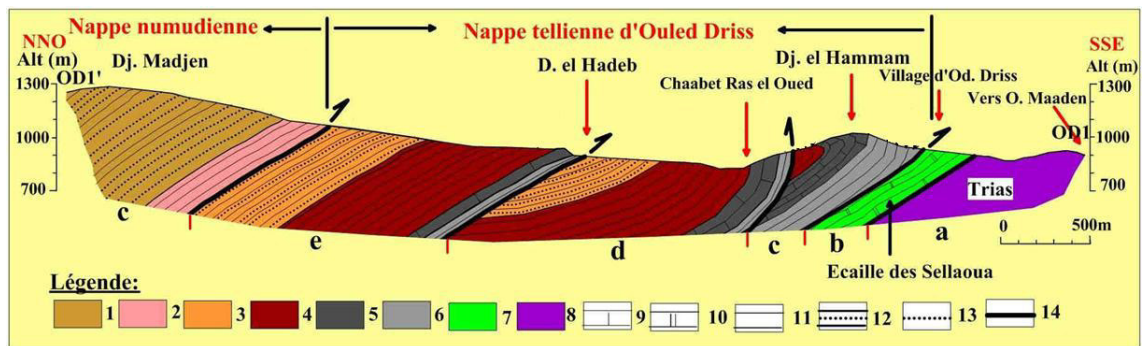


Figure I-17: Coupe géologique à Djebe Madjen (Chabbi 2017).

- *Nappe numidienne* : 1. Aquitanien, 2. Oligocène- *Nappe tellienne* : 3. Lutétien – Priabonien, 4. Lutétien, 5. Yprésien, 6. Paléocène- *Sellaoua* : 7. Maastrichtien et paléocène- *Trias allochtone* : *Trias* -Lithologique 9. Calcaires noirs à silex et Globigérines, 10. Calcaires blancs crayeux, 11. Marnes et argiles, 12. Grès glauconieux, 13. Grès siliceux, 14. Contact anormal.

La nappe numidienne : Qui borde le secteur d'étude à sa partie septentrionale avec des formations à l'Oligocène moyen à supérieur, des argiles sous-numidiennes; à l'Aquitanien une série gréseuse et au Burdigalien des argiles supra-numidiennes.

La nappe tellienne

La nappe tellienne ; se trouve à l'Est de Souk Ahras et au Sud de l'oued Medjerda, constituant le Djebel Boukebch. Elle comprend :

Au Lutétien des marnes noires à boules jaunes carbonatées; d'épaisseur dépassant les 400m;

À l'Yprésien des calcaires bitumineux noirs et bruns à Globigérines, et des marno-calcaires noirs; d'épaisseur dépassant les 200m.

Au Paléocène, des marnes argileuses et des marno-calcaires noirs à patine grise claire, qui apparait au nord de l'oued Medjerda.

6.2. Litho-stratigraphie des formations autochtones

L'étendu de la zone d'étude est couvert par l'assemblage de trois cartes géologiques en 1/50000 (Souk Ahras, Mdaourouche et Bouchegouf). A partir de cet assemblage, la carte lithologique de cette zone a été digitalisée (Fig. I-18) Les formations occupant les terrains de la région d'étude peuvent être décrit comme suit (Fig. I-19):

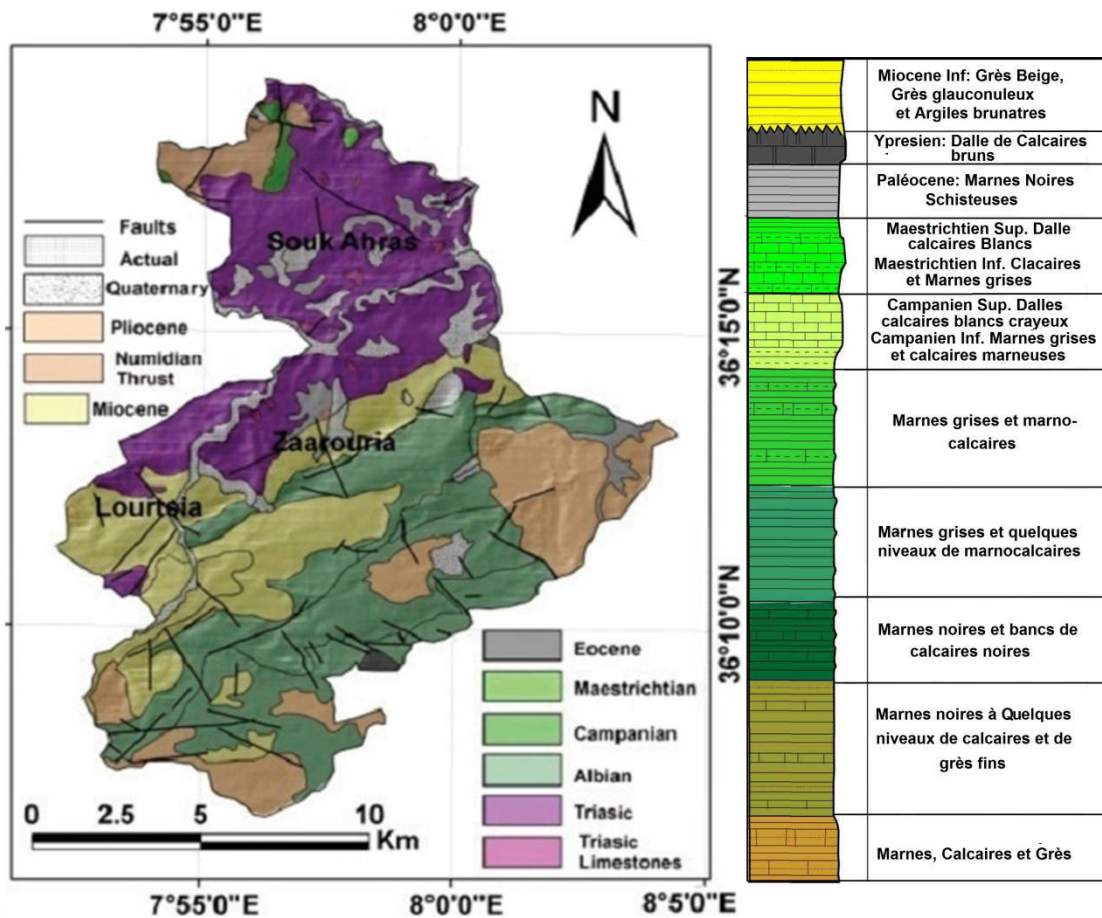


Figure I-18: Carte et log stratigraphique simplifié de la zone d'étude (Abdelouahad et al. 2017).

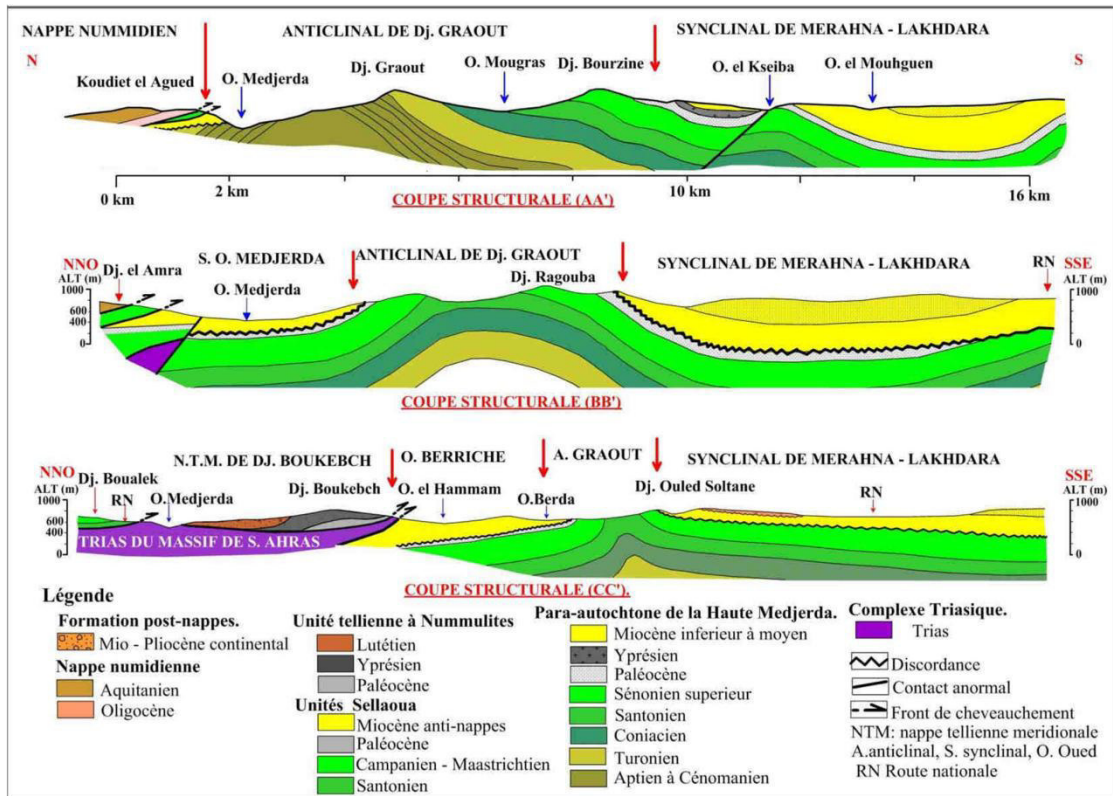


Figure I-19: Coupes géologiques en série du domaine autochtone de la Haute Medjerda (Chabbi 2017).

Le Paléozoïque

Pour le paléozoïque, de très rares informations existent dans la zone d'étude. Les affleurements, les données de forages et de la sismique réflexion se limitent à la série mésozoïque.

Le Mésozoïque

Le Trias au point de vue répartition les affleurements Triasiques se répartissant en deux zones principales celle de tell où le Trias est de type extravasés en raison intenses et celle de l'Atlas saharienne où perce la voute de quelques anticlinaux crétaçés par simple diapirisme.

Le Trias affleure a la faveur des structures diapiriques du massif de S-Ahras nettement allongé en direction SW-NE entre Oued Chouk et le Jelmana , le Trias s'étend de part et d'autre de la ville de S-Ahras avec une bande qui entour complètement le massif Eocène de djebel Bou Kebch avec un plongement le long de la vallée de l'Oued Djedra elle est accompagnée d'un certain époinements au Sud ceux de l'Oued Bou Hachem et de djebel Argoub el Djamel a Zaarouria et au niveau du versant septentrional du djebel Dekma et au Nord de la Medjerda ainsi que djebel el Hammam Est de Hammam Zaid et Oued Mougras .

Les terrains Triasiques sont intensément déformés et broyés, leur hétérogénéité de contenu avec une dominance des marnes –bariolées gypso- salines leur coloration est vive et bigarrée (vert, le violet, et le rouge), calcaires en plaquettes de couleur gris ou beige qui renferment quelques fossiles, de grès et de dolomies le tout et a patine gypso-gréso-argileuse.

Le jurassique les affleurements jurassiques sont quasi-absents en affleurement dans cette zone.

Le Crétacé inférieur et moyen les affleurements du crétacé inférieur et moyen ne couvrent qu'une surface restreinte dans les monts de la haute Medjerda on les trouve que dans quelques régions L. David (1956). On distingue : la région de djebel Ledjbel qui fait la transition entre les monts de la haute Medjerda et ceux du Mellegue et la région de Sidi Hemissi à la bordure Nord de la zone Saharienne et sur le long de la vallée de Medjerda, Composé de marnes, calcaires et de grès;- l'Aptien affleure à l'anticlinal de djebel Ledjbel et en bordure du diapir triasique d'El Ouesta L. David (1956) marno-gréseux avec des micro- faunes d'Orbitoline.

-Albien-Cenomanien représenté par des barres de calcaires noirs à djebel ez.Zitoune, et djebel el Halalif au Sud de la feuille de Taoura.

Le Crétacé supérieur

Le Coniacien d'un point de vue lithologique les assises coniaciennes sont essentiellement marneuses, marno-calcaires il est relativement bien défini dans la partie centrale du revers sud des monts de la haute Medjerda dans notre zone d'étude des affleurements coniaciennes au SW de la ville de S-Ahras et dans la haute vallée de la Medjerda il est représentés sous forme de marnes grises et bleutés ,à l'autre côté de la vallée de Medjerda les ravins de la Mechta Berrache une série formé des marnes grises homogènes et au partie Est de la zone d'étude au environs de l'Oued Er Renem entre S-Ahras et Oued Mougras aux confins Algéro-tunisiens.

-Le Sénonien est marno-calcaire

-Le Campanien se représenté par des marnes grises bleutés et des calcaires blancheâtres à patine relativement fine un peu crayeux riche en foraminifères (Inocérames) avec un remplissage calcitique cryptocristallins affleure dans notre zone d'étude au sud de Zaarouria et au SE de Taoura et à l'Ouest au djebel Ain hallouf et à l'extrémité du djebel Derbouka ,vers le Nord de la zone d'étude à el Mechroha les calcaires surmonté

les marnes du campanien au massif de dj bou Aleuk ,au coté Ouest de la zone d'étude gagnant à djebel Ras el Alia et djebel el Arous le campanien dépasse de 200 à 300 m.

-Le Maestrichtien caractérisé par des calcaires crayeux à Inocérâmes et des marnes en quelques points isolés dans notre zone d'étude sur les lignes de crêtes des falaises, sur la route de S-Ahras - Taoura à l'extrémité du djebel Ain el Hallouf ,djebel Zellez ,djebel Zaarouria ,djebel Berda sud de Ouillen,et le synclinal de Merahna sur le flanc Nord du djebel Alahouma ;vers le Nord de notre zone d'étude sur le massif du djebel Bou Bakouche et djebel bou Aleuk ainsi oued Mougras à l'Est de la zone avec des bancs de calcaires dépassent 120m d'épaisseur.

Le Cénozoïque

Le Paléocène il affleure a djebel el hammam Nord –est de la zone d'étude et au Sud a Djebel Sessou ,Mehares,et Ogla.

L'Eocène au Nord de la zone d'étude l'Eocène autochtone affleure au niveau du Nappe tellienne ce niveau est visible juste au Douar Bou kebch et a l'anticlinal érode du djebel Serou-Dekma, comprend au priabonien une série marneuse avec des intercalations calcaires à débris, les lumachelles, les grés et glauconites tandis qu'à l'Yprésien – Lutétien affleure des calcaires à Numilites.

Le Miocène affleure au Sud de la zone d'étude dans le synclinal d'Ain el Kerma (sud de Sakiet sidi youcef), les affleurements

S'étendus vers le SW au synclinal de M'daourouche mais ses assises sont recouverts dans sa grande partie par les sédiments superficielles Plio-Quaternaire, la série est moins épaisse en particulier dans la vallée de la Medjerda à l'Est d'Oued Mougras, et dans le ravin du Cht Ballout et aux environs du Hammam Tassa ; les sédiments essentiellement se sont des marnes et des grés

Peu épais sur les synclinaux de l'oued el Berich et de Zaarouria.

Dans le massif du djebel Bou kebch le Miocène est directement transgressif sur l'Eocène L. David, la partie Ouest de la zone d'étude

Le Miocène affleurant sur le revers Sud de la chaine de djebel Serou-Dekma dans le même prolongement du djebel Bou kebch ,et loin de djebel Dekma vers l'Ouest suivant la vallée de la Medjerda jusqu'au le massif Triasique de Tiffech.

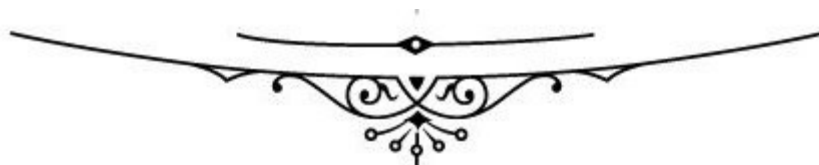
Le Pliocène dans notre zone d'étude le pliocène s'étend à l'Est de Hammam Tassa jusqu'au l'Ouest de Taoura et vers le Nord jusqu'à djebel Abiod constitué par des

calcaires principalement Lacustre et affleure au pied du djebel Chougga, et depuis Hammam Tassa au Nord jusqu'au environ de l'Ain Toudja au Sud.

Au Nord de la zone d'étude une série d'affleurement au long de la vallée d'Oued el Rirane, ainsi que Ain Tahamamine où les conglomérats dominent, les marnes à Ostracodes ainsi que djebel bou Aleuk avec des conglomérats, grés, sables lenticulaires et les marnes ocre, la limite de la feuille de S-Ahras avec Oued Mougras au sud du djebel M'sid les formations renferment des calcaires jaune compact, crème ou blanchâtre et des conglomérats à gros éléments cimenté par les argiles jaune ou rouge ; au SW de Zaarouria sur le Trias affleure des calcaires gris avec traces de végétaux.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dégagé les premières remarques sur le contexte géologique de la zone d'étude. Il s'agit d'un secteur appartenant aux zones externes de la chaîne des Maghrébides et de son avant-pays para-autochtone. Les terrains mésozoïques carbonatés à intercalations marneuses, d'épaisseurs variables, ont été fortement fracturés et profondément plissés. La partie sud de la zone d'étude est constituée de terrains Crétacés, avec une couverture argilo-gréseuse Miocène, formant le synclinal de Taoura. La série stratigraphique se présente sous la forme d'alternance de formations carbonatées de calcaires, de marno-calcaires et des marnes argileuses. Les terrains Plio-quaternaires occupent la partie centrale de la zone d'étude séparant ainsi les terrains triasiques au Nord de Zarouria et les terrains Crétacés au sud de Taoura. Ils sont constitués par des alluvions actuelles et récentes, des poudingues, des grés et des graviers. La tectonique est caractérisée par la dominance d'une série de failles d'orientation NE-SW, avec d'autres failles perpendiculaires selon une direction NW-SE. La présence de ces deux réseaux de failles a facilité le déplacement et la remontée du complexe salifère triasique de la région. Ce dernier à composition hétérogène constitue la majorité des affleurements dans le nord de la zone d'étude. Ce contexte géologique complexe, favorise le déclenchement des mouvements gravitaires de différents types. D'où on remarque que les glissements de terrain se sont développés comme un processus géomorphologique caractéristique de la région.



CHAPITRE II

CLIMATOLOGIE, HYDROLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

1. Introduction

L'analyse hydroclimatologique constitue une étape très importante dans toute étude géologique, hydrogéologie ou géotechnique. Cela permet d'évaluer les effets de la fluctuation des paramètres climatiques sur le balancement des réserves hydriques et sur l'évolution des aléas naturels, tel que les inondations et les mouvements de terrain. Les précipitations représentent le facteur le plus important du climat tant pour les populations que pour les écosystèmes. Autant de raisons qui font que la plupart des études et analyses portent sur les précipitations bien plus que sur d'autres paramètres du climat tel que les températures et l'humidité. Notre étude consiste à quantifier le cycle de l'eau hydroclimatologique en déterminant le rapport entre l'eau précipitée sous ses diverses formes à la quantité de l'eau ruisselée à la surface du sol ou infiltrée dans le sous-sol, et celle évaporée dans l'air dans la zone d'étude. Ainsi, on va établir dans ce chapitre un bilan synthétique pour comprendre les mécanismes d'alimentation et de circulation des eaux de surface et souterraines. Donc notre travail, va nous permettre, d'estimer les termes du bilan hydrique qui repose sur l'interprétation des données climatologiques (température, précipitations), durant la période (2000-2018).

Le réseau hydrographique, sa densité et son ordre constitue également un facteur très important dans l'étude des aléas naturels notamment les mouvements de terrain. Le bassin versant dont appartient la zone d'étude possède un chevelu hydrographique très dense avec des cours d'eau à écoulement intermittent et saisonnier. Il constitue une zone charnière entre l'Atlas Tellien au Nord et Saharien au Sud. C'est une zone à structure généralement simple au Sud et complexe au Nord. Au Nord, le bassin d'étude présente un relief accidenté et entouré d'une série de culminantes montagnes. Au Sud, il est considéré comme le prolongement naturel des hautes plaines sans pour autant en avoir les mêmes caractéristiques naturelles et physiques. Il présente une structure plissée d'une orientation dominante Sud-ouest, Nord-est.

La fluctuation du niveau piézométrique surtout près de la surface peut également déclencher des glissements de terrain spectaculaires s'il atteint la base du talus. De point de vue hydrogéologique, la région d'étude se caractérise par la présence de formations carbonatées fissurées, qui recèlent d'importantes potentialités aquifères. Les formations

dominantes sont en majeure partie des calcaires maestrichtiens, constituant ainsi des structures synclinales recouvertes par des formations Mio-Plio-quaternaires. Ces calcaires karstifiés, favorisent l'accumulation des eaux souterraines. La région, recèle d'importantes nappes souterraines. Principalement des aquifères superficiels à lithologie variable, Et des aquifères profonds karstifiés à lithologie plutôt carbonatée (Bousnoubra, 2002). Les nappes présentes dans le bassin versant Medjerda, sont captées par des forages dans le champs captant Taoura, champs captant Terguelt, champs captant Tiffech et champs captant Sedrata (Rouaibia, 2017). Ces systèmes aquifères constituent la principale ressource en eau pour l'alimentation en eau potable de la région.

Dans notre étude, une meilleure étude hydroclimatologique permet de bien analyser l'activité de glissement de terrain et comprendre sa relation avec les conditions climatiques. Surtout sachant que les glissements de terrain dans cette zone son majoritairement à contrôle hydrique et se déclenche suite aux grandes averses de pluie (Hadji et al. 2013).

2. Analyse des paramètres climatiques

Les facteurs hydroclimatiques qui ont été traités dans notre étude sont les précipitations, la température et l'humidité. Une série de 18 années de l'an 2000 à l'an 2018 (ONM/N°90 de Souk Ahras 36°17'49.44"N le latitude, 07°55'22.05"E de longitude et 1424m d'altitude) à été utilisée pour cette étude.

2.1. La pluviométrie

Les précipitations sont l'ensemble des eaux qui tombent sur la surface de la terre, tant se forme liquide (pluie, averse, brume) que sous forme solide (neige, grêle, grésil) et les précipitations déposées ou occultes. Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression.

Précipitations annuelles : La répartition annuelle (tableau II-1) montre une irrégularité interannuelle des précipitations, ou on a enregistré un maximum de précipitation à 2018 avec 825 mm et le minimum à 2001 avec 428 mm (Fig. II-1).

Tableau II-1: Les précipitations totales annuelles (2000-2018).

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	moy-an
445	428	563	774	773	484	513	570	523	692	648	721	88	691	623	88	569	522	825	607.25

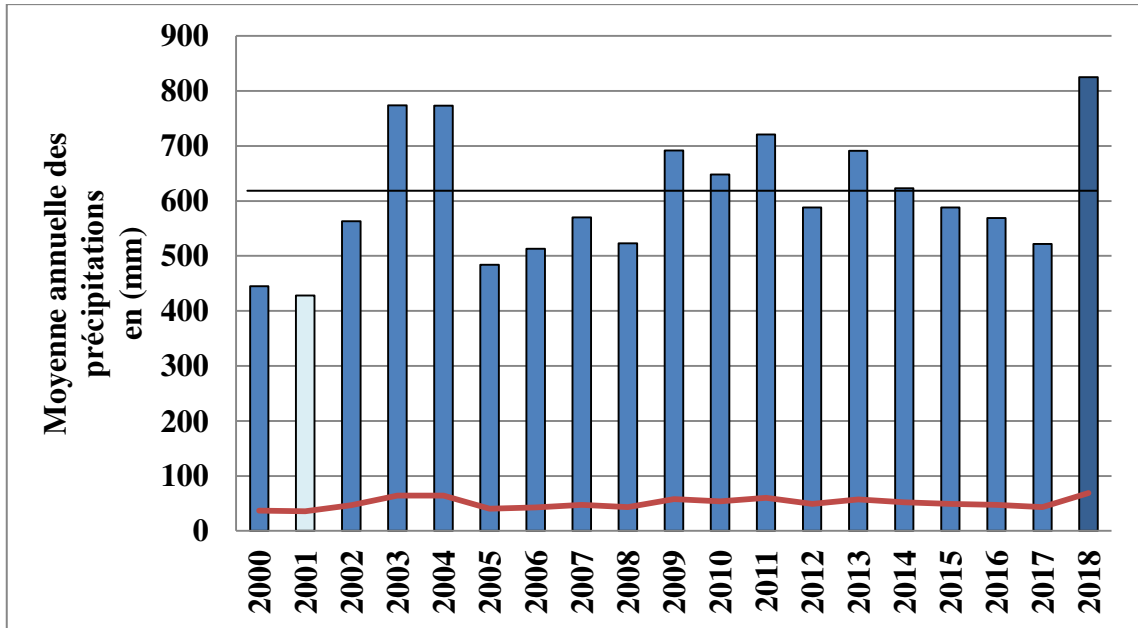


Figure II-1: Variation des moyennes annuelles des précipitations (2000-2018).

Précipitation mensuelle : Le tableau II-2 résume les valeurs moyennes mensuelles des précipitations mesurées à la station ONM de Souk Ahras dans la période (2000-2018), (Fig. II-2).

Tableau II-2: Les précipitations moyennes mensuelles (2000-2018).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Ann
Moy	49.20	63.31	68.04	<u>72.04</u>	65.36	54.68	58.62	57.31	53.57	24.20	11.88	29.04	607.25

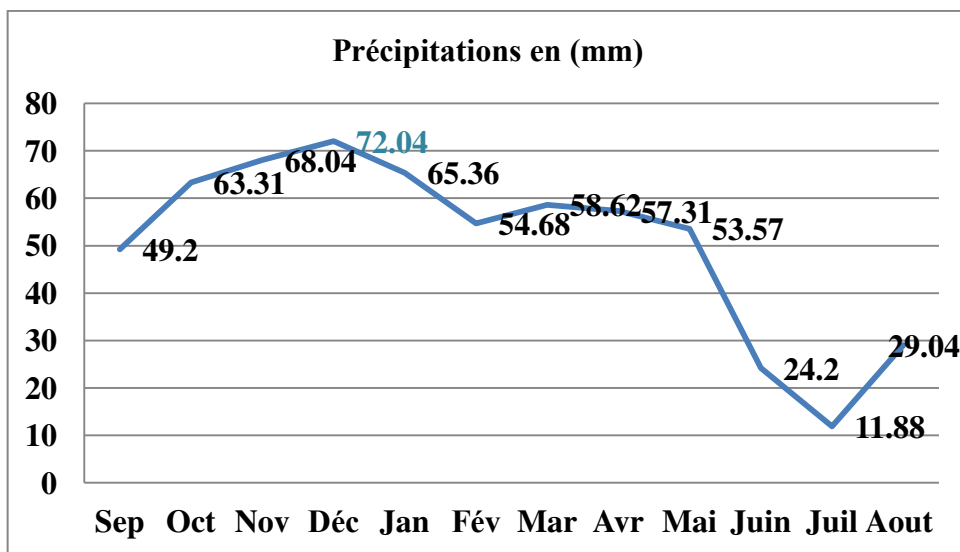


Figure II-2: Variation des précipitations mensuelles moyenne de la zone d'étude (2000-2018).

Précipitation saisonnière

L'analyse des données des précipitations saisonnières (tableau II-3) démontre que la saison hivernale est la plus arrosée en eau de pluie, tandis que la saison estivale est la plus sèche (Fig. II-3).

Tableau II-3: Valeurs des précipitations saisonnières (2000-2018).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Moyenne	180.55	192.08	169.5	65.12
%	29.73	31.63	27.91	10.72

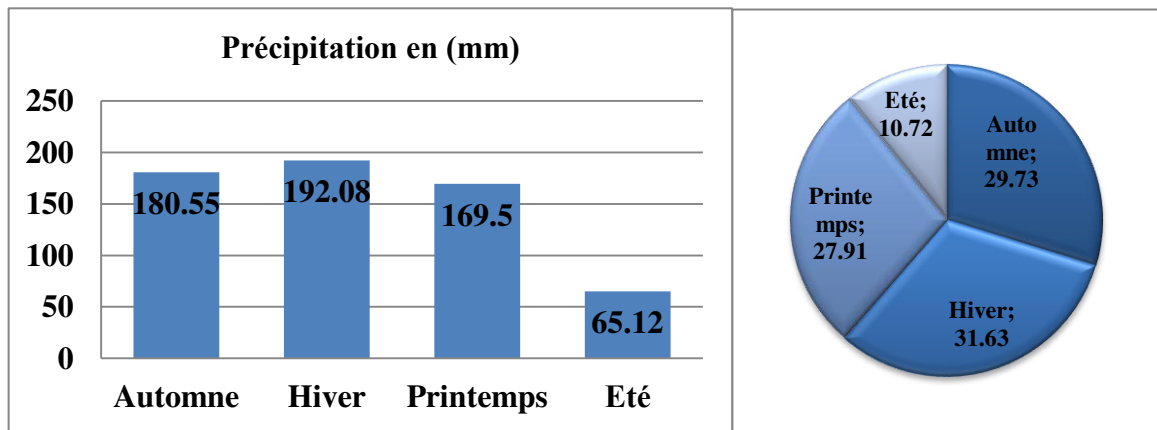


Figure II-3: Variation des précipitations saisonnières de la zone d'étude durant la période (2000-2018).

2.2. Températures

Température annuelle

Le tableau II-4 donne la répartition annuelle durant 18 ans qui montre une irrégularité interannuelle des températures maximales et minimales, ou on a enregistré un maximum de température à 2009 avec 18.70 (°C) et le minimum à 2003 avec 14.27 (°C) (Fig. II-4).

Tableau II-4 : Les températures moyennes annuelles (2000-2018).

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	moy
16.59	16.69	16.57	14.26	16.08	16.89	17.25	16.21	16.57	18.69	17.47	16.83	16.11	15.55	16.09	15.55	15.05	16.20	15.94	16.27

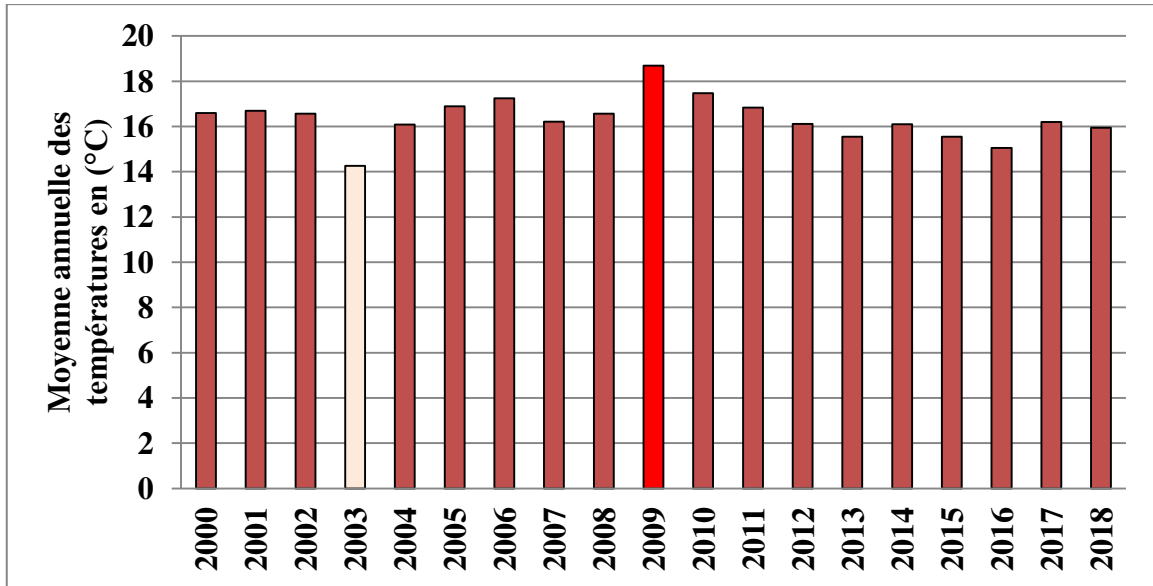


Figure II-4: Variation de température annuelle (2000-2018).

Température mensuelle

Le tableau II-5 donne les températures mensuelles pour une période de 18 ans (2000-2018). On note que la température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois d'Aout avec 26,58°C, en revanche la température moyenne mensuelle des minima la plus basse est celle du mois de Janvier ayant comme valeur de 3,7°C, (Fig. II-5).

Tableau II-5 : Moyenne mensuelle de température (2000-2018).

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy.
T.moy.	9,35	10,25	12,36	14,50	19,70	23,55	26,25	26,58	22,54	18,80	13,25	9,50	17,22
T.min.	3,7	5,00	6,7	09	14,8	16,10	18,5	18	17,08	13,20	8,5	4,7	11,87
T.max.	15	15,5	18	20	24,6	31	34	35,15	28,00	24,40	18	14,3	23,16
T.min.absl	-5,5	-4,3	-2,1	1,8	6	11	14	15	10	2,6	-1,2	-3,8	
T.max.absl	23	28	37	35	42	45	45	45	41	36	31	25	

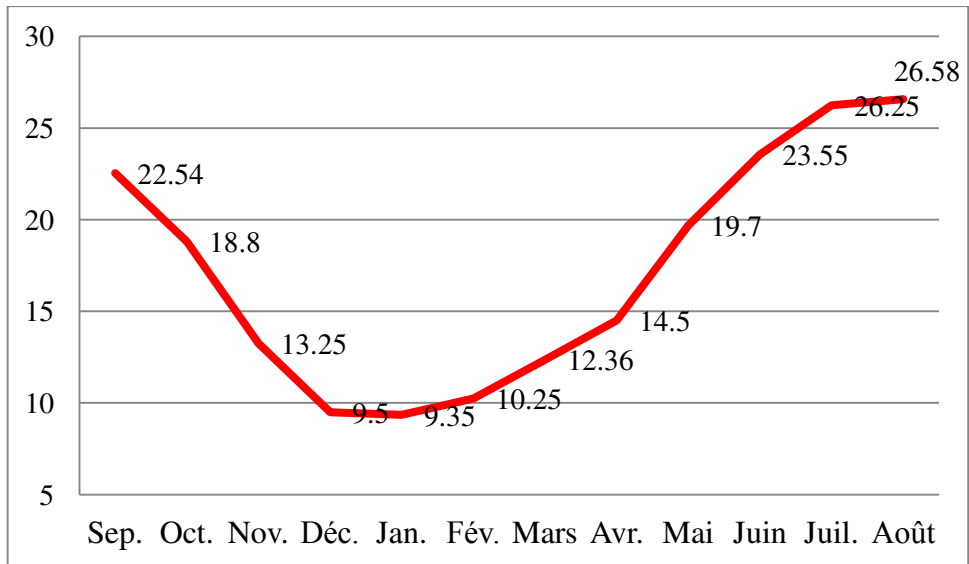


Figure II-5: Variation des moyennes mensuelles des températures (2000-2018).

Les températures enregistrés au niveau de la station de Souk Ahras (tableau II-5) montrent que le mois le plus froid (Février) et le mois le plus chaud (Juillet) de l'année (Fig. II-5).

Température saisonnière

Tableau II-6: Moyenne saisonnière de température (2000-2018).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Été
Moyenne (°C)	18,2	9,7	15,52	25,46
%	26,5	14,1	22,6	36,8

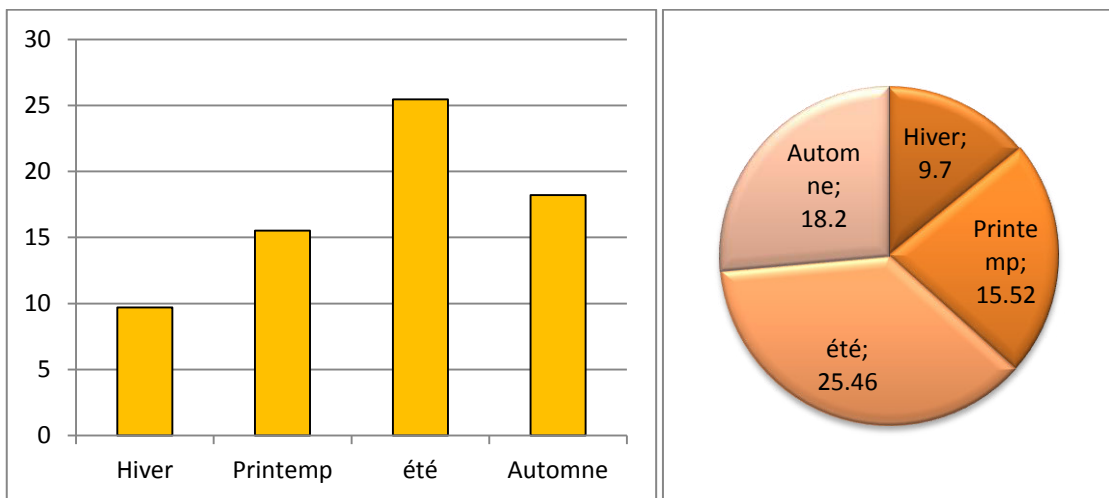


Figure II-6: Variation des moyennes saisonnières des températures (2000-2018).

Les températures enregistrées au niveau de la station de Souk Ahras (tableau II-6) montrent que la saison la plus froide est l'hiver et la plus chaude est l'été (Fig. II-6)

2.3. Le diagramme ombro-thermique :

Le diagramme ombro-thermique est un type bien particulier de diagrammes climatiques. Il a été développé par Henri Gaussen et F. Bagnouls en 1953; représentant les variations mensuelles sur une année des températures et des précipitations selon des gradations standardisées : une gradation de l'échelle des précipitations correspond à deux gradations de l'échelle des températures ($P = 2T$). L'analyse du diagramme ombro-thermique de la zone d'étude montre une saison humide qui s'étale d'octobre à la mi-mai et période sèche durant le restant de l'année (Fig. II-7)

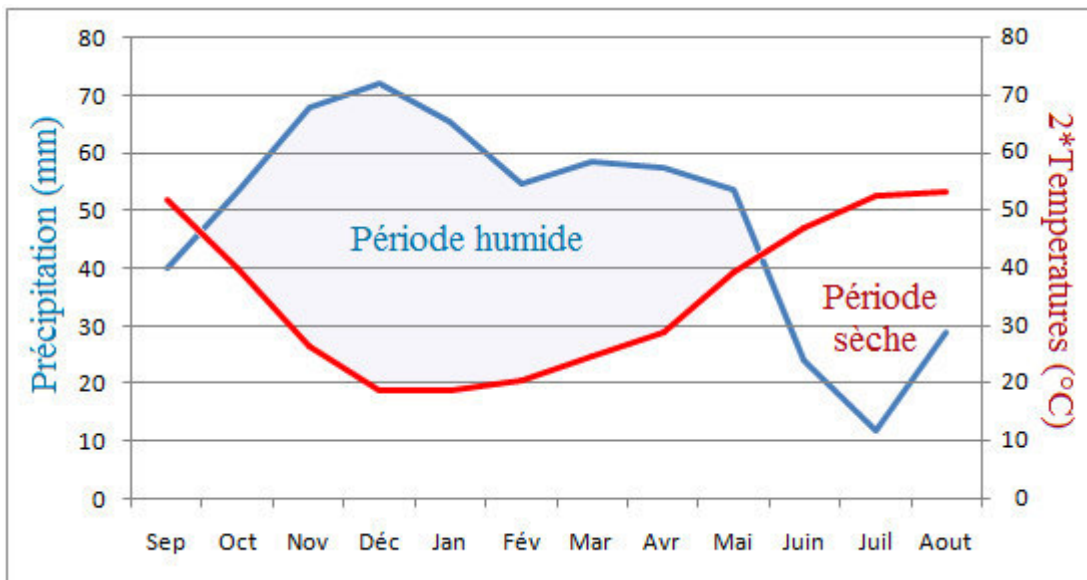


Figure II-7: Diagramme ombro-thermique de la zone d'étude.

2.4. L'humidité du sol :

L'humidité du sol constitue un paramètre très important tant de point de vue géotechnique que géochimique ou minéralogique dans la genèse et le déclenchement des glissements de terrain. Surtout si les sols recèlent une importante fraction argileuse. Dans notre analyse ce paramètre a été analysé en terme d'humidité annuelle (tableau II-7 et Fig. II-7); d'humidité mensuelle (tableau II-8 et Fig. II-8); ou saisonnière (tableau II-9 et Fig. II-10).

Humidité annuelle

Tableau II-8 : Humidité annuelle du sol (2000u-2018) en (mm).

2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	moy-an
5476	5390	5367	6638	6677	6454	6145	5922	5907	6644	6311	6728	6642	6364	6415	6277	5744	5574	6291	6154.1

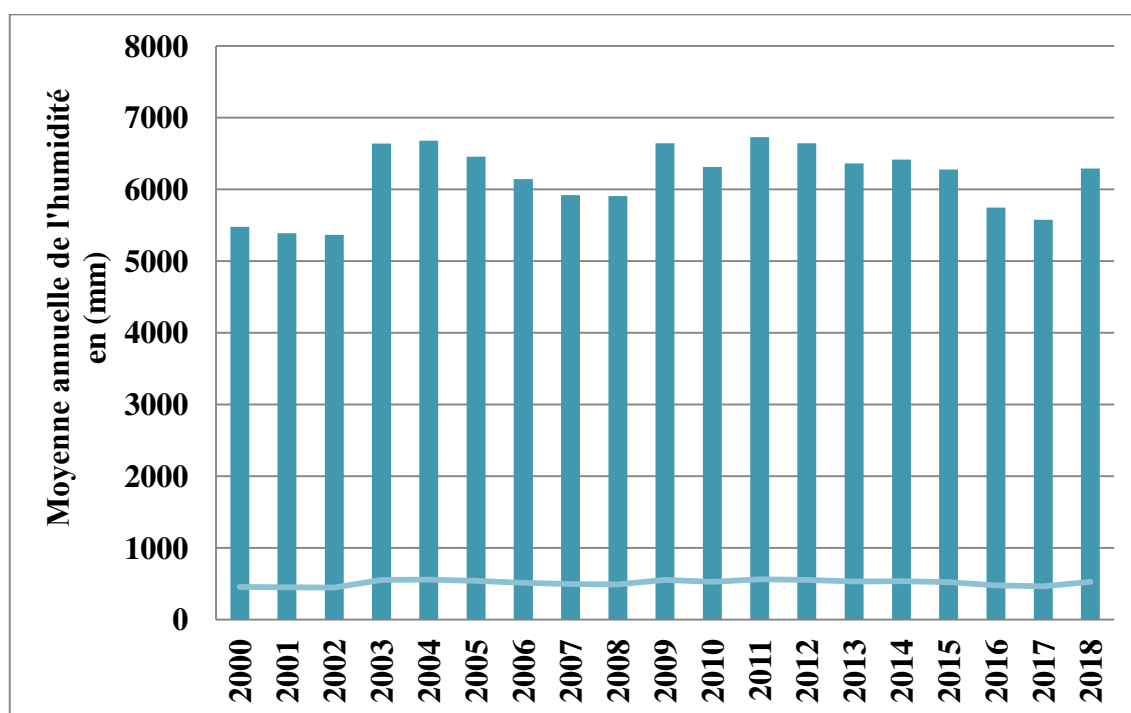


Figure II-8: Variation des moyennes mensuelles de l'humidité (2000-2018) en (mm).

Humidité mensuelle

Tableau II-9: Humidité moyenne mensuelle du sol (2000-2018) en (mm).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	An
Moy(mm)	442.7	463.1	498.3	541.7	573.1	593.7	595.3	569.7	524.3	478.5	441.8	431.9	6154

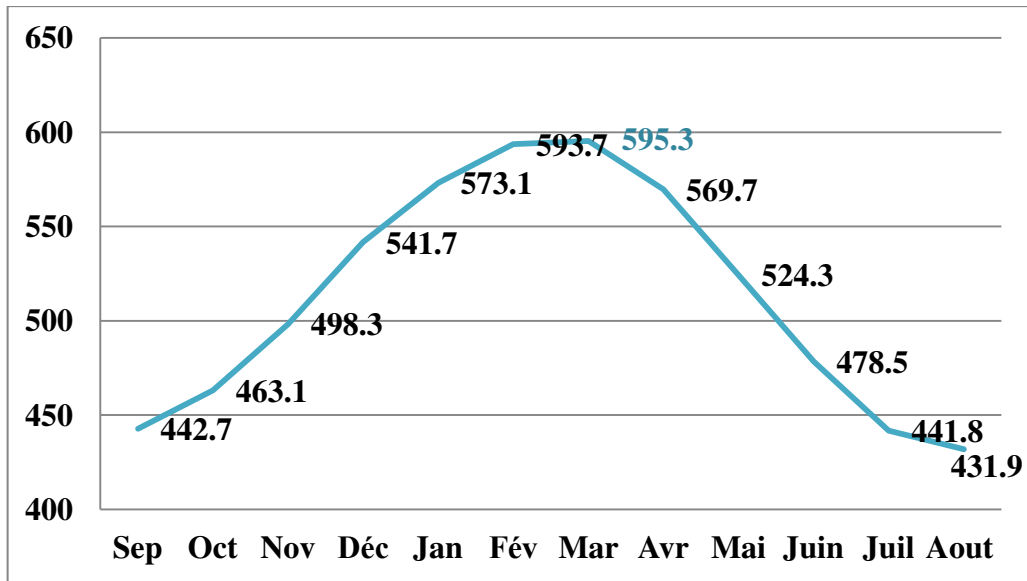


Figure II-9: Variation des moyennes annuelles de l’humidité (2000-2018).

Humidité saisonnière

Tableau II-10 : Humidité saisonnière du sol (2000-2018) en (mm).

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
Moyenne (mm)	1404.1	1708.5	1689.3	1352.2
%	22.81	27.76	27.44	21.97

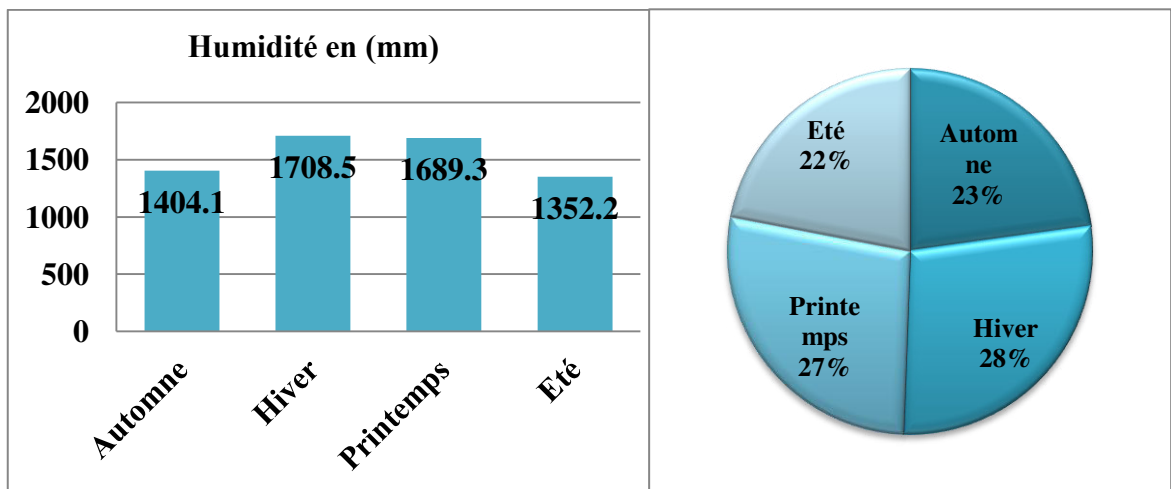


Figure II-10: Variation des moyennes saisonnières de l’humidité (2000-2018).

L'analyse de l'humidité du sol montre qu'elle est notable dans la saison hivernale et vernal. Durant l'été et l'automne cette humidité n'est guère négligeable, cela est dus au lithologies argilo-marneuse des terrains qui favorise la rétention de l'eau.

2.5. Humidité de l'air

Cette méthode est basée sur l'établissement d'un rapport entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles (P/T) d'une même période.

Le rapport (P/T) donne la valeur de l'humidité de l'air et permet de définir quatre types de régimes (tableau II-11).

Tableau II-11 : Classification d'Euverte (Rahmani, 2014).

Rapport (P/T)	P/T < 1	1 < P/T < 2	2 < P/T < 3	P/T > 3
Le régime	Très sec	Sec	Subhumide	Humide

Tableau II-12 : Résultat du calcul d'après la classification d'Euverte (2000-2018).

Mois	Sep	Octo	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Annuel
P(mm)	49.20	63.31	68.04	72.04	65.36	54.68	58.62	57.31	53.57	24.20	11.88	29.04	607.25
T (°C)	22.08	18.53	13.22	9.36	7.61	7.54	10.96	13.80	17.18	21.81	26.74	25.43	16.18
(P/T)	2.22	3.41	5.14	7.69	8.58	7.25	5.34	4.15	3.11	1.10	0.44	1.14	4.13

Les valeurs du rapport P/T représentées dans le Tableau II-12 permettent de connaître l'évolution de l'humidité du sol pendant l'année :

- ✓ Un régime **très sec** durant le mois Juillet.
- ✓ Un régime **sec** durant les mois de Juin et Aout.
- ✓ Un régime **subhumide** durant le mois de septembre.
- ✓ Le régime est **humide** pendant le reste de l'année.

2.6. Détermination des indices climatiques

a) Climagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat dans la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 . Ce quotient dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes des températures minima et maxima, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Daget, 1977).

$$Q_2 = 2000 * (P / (M^2 - m^2))$$

Avec : P : désigne la précipitation moyenne annuelle, exprimée en mm.

M : désigne le maxima du mois les plus chauds, exprimés en degré absolu K°.

m : désigne le minima du mois les plus froid, exprimés en degré absolu K°.

$$T (K^{\circ}) = T^{\circ}C + 273,15$$

$$P = 607,25$$

$$M = 26,74 + 273,15 = 299,89 \rightarrow Q = 109$$

$$m = 7,54 + 273,15 = 280,69$$

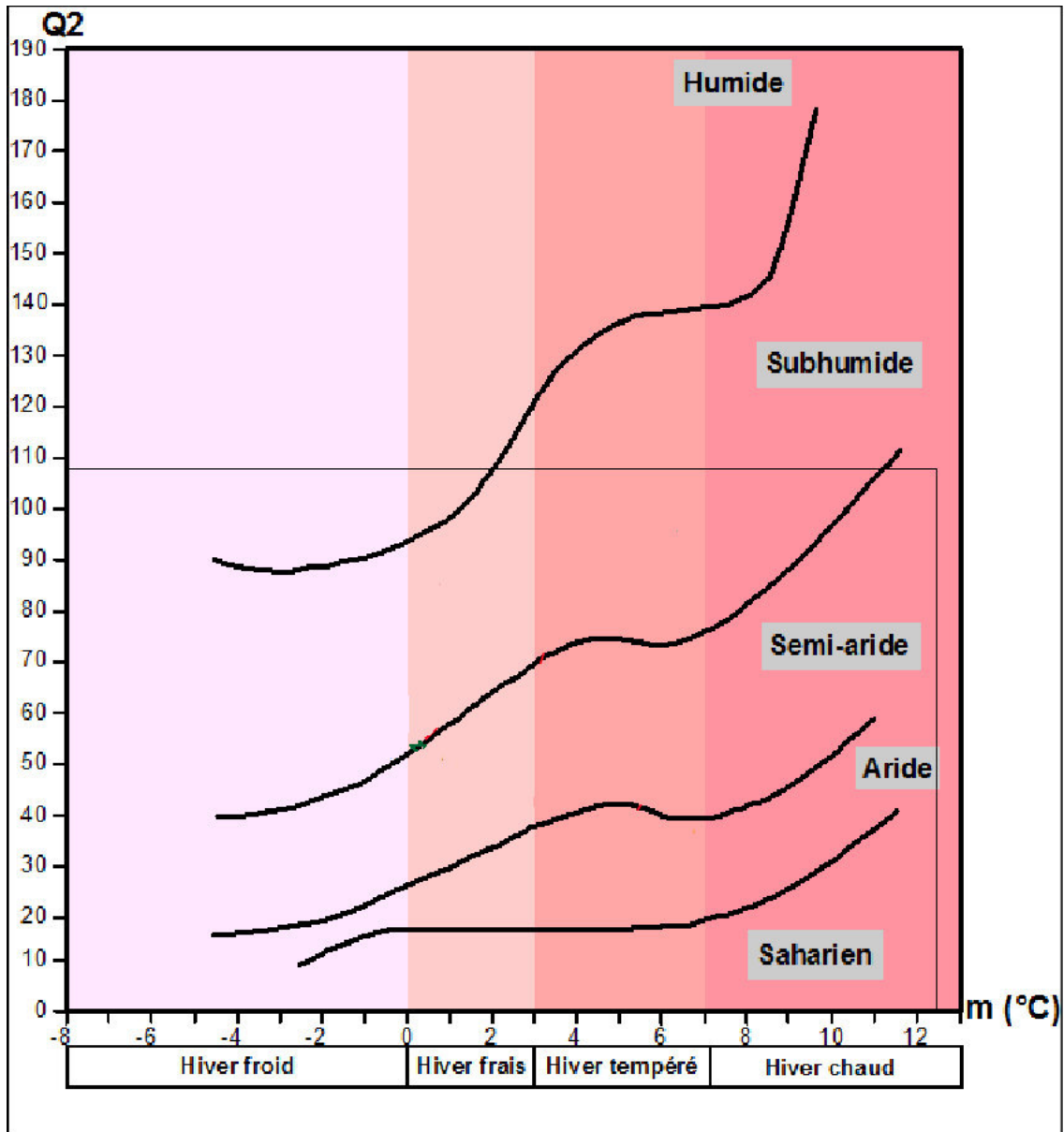


Figure II-11: Représentation graphique du climat de la zone d'étude sur le climagramme d'Emberger.

D'après du climat de le climagramme d'Emberger notre zone d'étude possède un climat semi-aride.

b) L'indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité (I) est un indicateur quantitatif du degré de manque d'eau à un endroit donné (Martonne 1926; Ghrieb 2007). Cet indice prend en compte les précipitations moyennes annuelles et les températures moyennes annuelles. Il est calculé par la formule de De Martonne (1923) (tableau II-13).

$$\text{Indice d'aridité : } I = \frac{P}{T+10}$$

D'où P : précipitation moyenne annuelle (mm). T : température moyenne annuelle (°C).

Tableau II-13: Classification de Martonne de type de climat, suivant les valeurs de «I»

I	< 5	5 < I < 7.5	7.5 < I < 10	10 < I < 20	20 < I < 30
Type de climat	Climat Hyperaride	Climat Désertique	Climat Steppique	Climat Semi-aride	Climat Tempéré

P=607.25 mm et T=16.18°C=> ce qui donne I=23.19.

La zone d'étude est soumise à un climat tempéré (I=23,19).

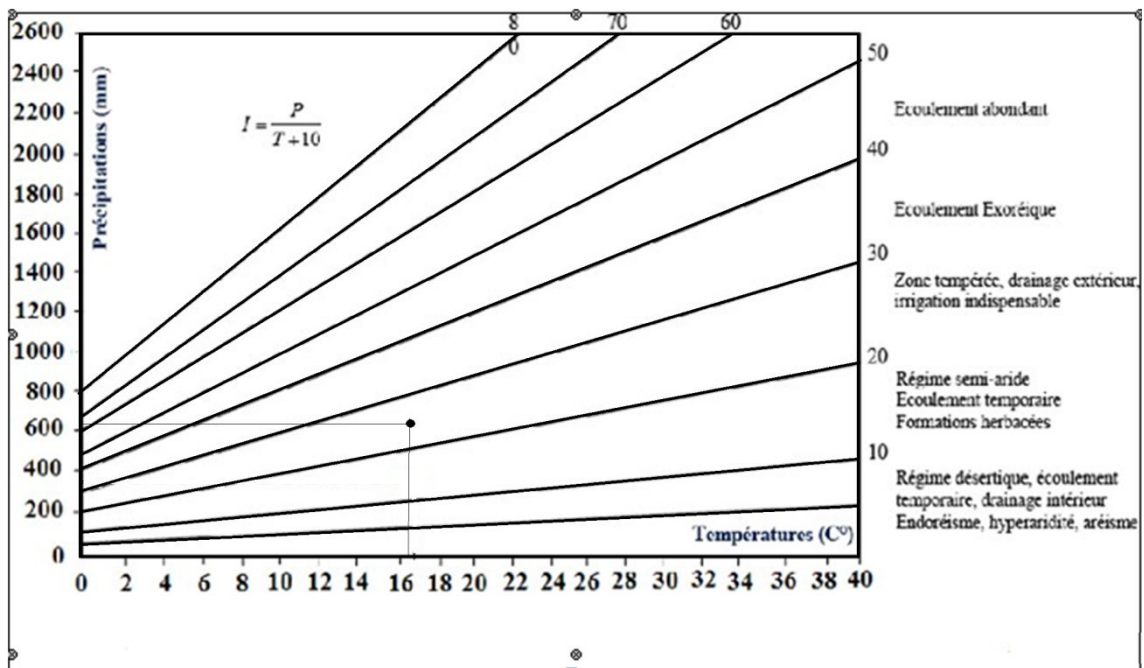


Figure II-12: Représentation de la zone d'étude sur l'abaque de l'Indice d'aridité de De Martone (1923).

D'après l'abaque de l'Indice d'aridité de De Martone (Fig. II-12); la zone d'étude apparaît comme une zone tempérée à drainage extérieur et une irrigation indispensable

2.7. Etude de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est considérée comme l'une des variables climatologiques les plus difficiles à approcher. Dans le bilan hydrique, c'est le terme le plus important après les précipitations. Elle est définie comme étant l'ensemble des pertes par transformation de l'eau en vapeur, sous la forme d'évaporation (phénomène physique), et transpiration (phénomène biologique).

Evapotranspiration réelle annuelle moyenne

L'évapotranspiration réelle annuelle moyenne (ETR) est déterminée par des équations empiriques comme celles de Turc ou de Coutagne.

- **Formule de L. Turc annuelle :**

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

Avec P : Précipitations annuelles moyennes en (mm)

$$L = 33 + 25T + 0.05T^3$$

D'où T est la température annuelle moyenne en (°C).

Formule de A. Coutagne :

Cette formule est donnée comme suit :

$$ETR = P - \lambda P^2$$

Elle n'est valable que lorsque les précipitations sont comprises entre $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{8}$ de λ .

$$\lambda = \frac{1}{0,8 + 0,4T}$$

Avec T : température moyenne annuelle en (°C).

Formule de G.W. Thornthwaite

L'évapotranspiration potentielle non corrigée est donnée par la formule :

$$ETP \text{ (mm)} = 16. (10T/I)^{\alpha} F (\lambda)$$

$$A = (16/100) I + 0,5 \quad I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{ou } i = (T/5)^{1,514}$$

Avec T : températures moyennes mensuelles en (°C);

I : indice thermique annuel.

i : indice thermique mensuel.

F (λ): facteur de correction intégrant la durée d'insolation et le nombre de jours du mois.

L'évapotranspiration potentielle corrigée est obtenue en multipliant la formule de Thornthwaite par le coefficient de correction k qui dépend de la latitude.

ETPc=ETP*K avec : ETPc : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée.

On trouve que : a= 1.70 et I= 75.5.

Tableau II-14: Résultats de calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) Selon la méthode de Thornthwaite.

Mois	Sep	Octo	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Tmoy(°C)	22.08	18.53	13.22	9.36	7.61	7.54	10.96	13.80	17.18	21.81	26.74	25.43
i	9.47	7.26	4.35	2.58	1.88	1.86	3.28	4.65	6.48	9.30	12.66	11.73
K	1.03	0.97	0.86	0.84	0.87	0.86	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16
ETP	99.17	73.62	41.46	23.05	16.21	15.96	30.15	44.60	64.73	97.12	137.33	126.09
ETPc	102.1	71.41	35.65	19.36	14.10	13.72	31.05	49.06	78.32	118.48	170.28	146.26

2.8. Calcul du ruissellement et de l'infiltration

On entend par ruissellement, l'écoulement par gravité à la surface du sol suivant la pente du terrain. Le ruissellement est estimé par la formule empirique de Tixeront-Berkalof: $R = P^3 / (3 * ETP)^2$. Si $P < 600$ mm,

Avec : R= Ruissellement annuel (mm);

P= Précipitation moyenne annuelle (mm) observée dans la station de Souk Ahras.

ETP= Evapotranspiration potentielle totale annuelle en (mm).

P= 607.25 ; ETP = 769.49.

$R = (607.25)^3 / (3 * (769.49)^2)$

R= 126.05 mm; R%= R/P x100= 20.75%.

Calcul de l'infiltration :

L'infiltration est le passage de l'eau de la surface de sol à l'intérieur du sous-sol, alimentant ainsi les réserves en eaux souterraines.

Elle est calculée par la formule suivante: $I = P - (R + ETR)$

$P = 607.25$; $R = 126.05$; $ETR = 402.63$

Ce qui donne $I = 78.57\text{mm}$; $I\% = I/P \times 100 = 12.93\%$.

2.9. Estimation de la recharge par la méthode de Thornthwaite :

Le schéma conceptuel du bilan de Thornthwaite suppose que la zone non saturée est divisée en deux parties :

- Une zone d'échanges (sol-plantes-atmosphère), d'épaisseur relativement faible et d'humidité très variable;
- Une zone de transfert, d'humidité peu variable et au moins égale à celle correspondante à la capacité au champ.

Le calcul est basé sur le schéma physique selon lequel la pluie tombée sur le bassin versant prend quatre destinations :

- L'évapotranspiration : ETR;
- Le ruissellement : R;
- La recharge des nappes ou infiltration : I;
- Le stockage dans le sol : ΔS .

Ceci se traduit par la relation : $P = ETR + R + I + \Delta S$.

La différence entre précipitation et évapotranspiration réelle ($P - ETR$) constitue la l'excédent qui conditionne le ruissellement et l'infiltration.

Cette méthode permet d'établir le bilan au pas de temps mensuel ou décadaire selon la nature des données dont on dispose. Dans notre cas nous disposons des valeurs mensuelles des précipitations (P) et de l'évapotranspiration potentielle (ETP). On calcule l'évapotranspiration réelle (ETR) en comparant l'évapotranspiration potentielle et les réserves en eau disponibles (RU) pour l'évaporation et la transpiration. Cette disponibilité en eau est estimée à l'aide de la réserve facilement utilisable (RFU) qui est une réserve conceptuelle car n'ayant pas de réalité physique, même si l'on peut l'assimiler à la quantité d'eau stockée dans les premiers mètres du sol (Marsily, 1994).

Le principe de calcul doit permettre à la pluie d'alimenter en priorité l'ETP, puis de compléter la RFU jusqu'à son maximum, et enfin d'alimenter l'infiltration et le ruissellement lorsque l'ETP et la RFU sont satisfaites.

On procède de la façon suivante:

1) Si les précipitations du mois (P) sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle :

L'évapotranspiration réelle est égale à l'évapotranspiration potentielle

Si : $P > ETP \rightarrow ETR = ETP$.

2) Si les précipitations du mois (P) sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle

Si : $P + RU > ETP \rightarrow ETR = ETP$.

Si : $P + RU < ETP \rightarrow ETR = P + RU$.

3) Si $P < ETP$ et $RFU = 0 \rightarrow ETR = P$.

Le bilan hydrologique pour la station de la région d'étude sur une période d'observation allant de (2010-2018) est présentés dans le tableau 14, Ils permettent de voir l'étendue de la période de sécheresse qui s'étale sur une bonne partie de l'année.

Tableau II-15: Bilan hydrique de la zone d'étude.

Mois	Sep	Octo	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P	49.20	63.31	68.04	72.04	65.36	54.68	58.62	57.31	53.57	24.20	11.88	29.04	607.25
ETP	99.17	73.62	41.46	23.05	16.21	15.96	30.15	44.60	64.73	97.12	137.33	126.09	769.49
BH	-49.97	-10.31	26.58	48.99	49.15	38.72	28.47	12.71	-11.16	-72.92	-125.45	-97.05	-162.24
RFU	0	0	26.58	75.57	124.72	163.44	191.91	204.62	0	0	0	0	786.84
ETR	49.20	63.31	41.46	23.05	16.21	15.96	30.15	44.60	53.57	24.20	11.88	29.04	402.63
Exc	0	0	26.58	48.99	49.15	38.72	28.47	12.71	0	0	0	0	
Déf	49.97	10.31	0	0	0	0	0	0	11.16	72.92	125.45	97.04	

T : température mensuelle en (°C); **P** : précipitation mensuelle en (mm) ; **RFU** : réserves facilement utilisable en (mm) ; **ETR** : évapotranspiration réelle en (mm) ; ETP évapotranspiration potentielle en (mm) ; **Déf.** : Déficit agricole en (mm) ; **BH**: Bilan Hydrique ; **Exc.** : excédent en (mm).

Commentaire sur le bilan hydrique :

Le bilan hydrique permet d'évaluer la part de chaque paramètre hydrologique (tableau II-15).

D'après le bilan on peut tirer quelques conclusions :

- ✓ L'ETP atteint son maximum au mois de Juillet 137.33mm où les précipitations atteignent leur minimum 11.88 mm.
- ✓ Le déficit agricole se remarque à partir du mois de Mai et se poursuit jusqu'à Octobre, période pendant laquelle la RFU est épuisée. Pendant le reste de l'année les réserves se reconstituent petit à petit jusqu'à l'atteinte d'un excédent.

3. Le bassin versant Medjerda amont (12-01)

La zone d'étude appartient au bassin versant Medjerda amont (code 12-01). Ce bassin de 1411 Km² de superficie est le nordique des cinq bassins du grand bassin Medjerda-Mellègue (7870 Km²). Il se situe à l'extrême Nord-est Algérien limité par le bassin des côtiers constantinois du Nord; par le Medjerda Tunisien à l'Est, par le bassin du Seybouse à l'Ouest et par les sous bassins de Mellègue amont (12-04) et Mellègue aval (12-05) au Sud (Fig. II-13).

Le bassin de Medjerda est drainé par l'oued Medjerda et ses affluents, alimentant le barrage d'Aïn Dalia dont l'eau est destinée à l'alimentation en eau potable de la ville de Souk-Ahras, Zaarouria, Taoura, Drea, Ouled-Driss, et Hennancha, etc. (Guesmi, 2004; Djaba 2010)

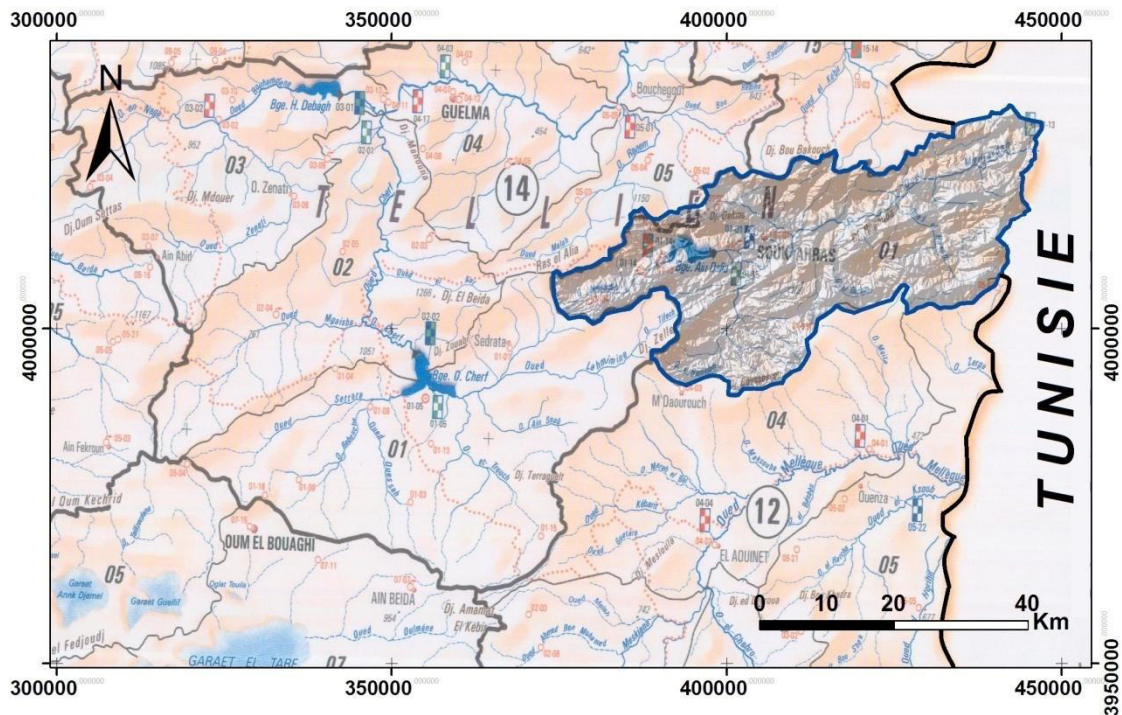


Figure II-13: Situation géographique du bassin versant de Medjerda amont.

4. Caractéristiques morphométriques du bassin versant

L'étude des caractéristiques morphométriques, d'un bassin versant est essentielle pour l'explication et la compréhension de son comportement hydrologique (surface, forme, relief, et réseau hydrographique) qu'il convient de préciser dès le début de toute étude. Ce milieu naturel complexe exige une étude géométrique permettant la mesure des facteurs caractéristiques du bassin et la quantification des paramètres physiques qui interviennent d'une façon continue dans l'écoulement. Le bassin versant en un point ou plus précisément dans une section droite d'un cours d'eau est défini comme la surface

topographique drainée par ce cours d'eau et ses affluents à l'amont de la dite section; tous les écoulements prenant naissance à l'intérieur de cette surface doivent traverser la section droite considérée pour suivre leur trajet vers l'aval.

4.1 forme du bassin

La forme du bassin versant contrôle l'hydrogramme de ruissellement superficiel d'une averse donnée et en particulier le débit de pointe à son exutoire. Généralement les bassins ont en une forme ovale. Certains facteurs permettent de décrire la forme d'un bassin versant, d'où des indices sont admis par les hydrologues pour caractériser cette forme :

4.2 Périmètre du bassin (P)

Le paramètre (Ps) est mesuré directement à partir de la carte topographique à l'aide d'un curvimètre. Pour palier les erreurs causées par la sinuosité de la ligne de partage des eaux l'utilisation des logiciels de cartographie s'avèrent à la page.

Le périmètre de notre bassin versant est de l'ordre de $P_s = 231$ Km.

4.3 Superficie (S)

Le paramètre (S) est facteur essentiel pour le calcul des indices du bassin versant. Il est obtenu par planimétrage sur les cartes topographiques à l'aide d'un planimètre, de papier millimétré quadrillé transparent ou par les logiciels de cartographie. Le bassin versant Medjerda amont a une superficie $S = 1411$ Km².

4.3.1 Indice de compacité de Gravelius (K_c)

Appelé aussi indice de forme, cet indice caractérisant la forme du bassin versant et tient compte de la vitesse de concentration, à l'exutoire, des eaux de ruissellement en provenance des diverses parties du bassin. est donnée par la formule suivante:

$$k_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Surface du bassin versant " S " en Km² ou Ha ;

Périmètre du bassin versant " P " en Km ou en m

Dans notre bassin on a $k_c = 0.28 \times 231 / 37.56 \rightarrow k_c = 1.74$

Ce qui donne au bassin versant Medjerda amont une forme de rectangulaire, où le temps de concentration des crues est long.

4.3.2 Rapport de circularité (RC)

L'indice (RC) de Miller (1953) définit par le rapport de la superficie (S) du bassin versant à la superficie du cercle (Sc) ayant le même périmètre (P) que le bassin versant est donné par : $RC = 4\pi S/P^2$ D'où on obtient $RC = 0.33$

Le rapport de circularité de Miller est égal 1 pour un cercle et décroît au fur et à mesure que l'élongation du bassin est importante. Donc notre bassin versant est rectiligne.

4.3.3 facteur de forme

Le facteur (FF) est une notion qui exprime l'influence de l'aspect du bassin sur l'écoulement. D'où $FF = 1$ pour les bassins à forme carré, $FF = 1.277$ pour les bassins à forme de cercle ; et $FF < 1$ pour les bassins à forme de rectangle.

Dans notre étude ce facteur de forme est obtenu par la formule de Zavoianu (1978):

$$FF = 16S/P^2 \quad \text{donc} \quad FF = 0,42$$

$FF < 1$, Donc le bassin versant de Medjerda amont à la forme d'un rectangle.

4.4 Le rectangle équivalent (L)

Pour estimer la forme d'un bassin versant, on assimile ce dernier à un rectangle ayant la même superficie, le même périmètre et la compacité. Cette notion de rectangle, appelé rectangle équivalent, a été introduite pour pouvoir comparer des bassins entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques géométriques sur l'écoulement.

Soit L et l la longueur et la largeur du rectangle, et P et A le périmètre et l'aire du bassin versant, on a:

$$K = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad 2(L + l) = P = \frac{K \sqrt{A}}{0,28} \quad L \cdot l = A$$

$$\text{d'où: } L = \frac{K \sqrt{A}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K} \right)^2} \right]$$

La longueur du rectangle équivalent de notre bassin est "L" = 100,52 Km.

La largeur du rectangle équivalent de notre bassin est "l" = 14.04 Km.

4.5. Le relief

Le relief d'un bassin est souvent caractérisé par la courbe de sa répartition hypsométrique. La courbe hypsométrique est tracée en reportant en ordonnée

l'altitude Y, et, en abscisse le pourcentage de la surface du bassin dont l'altitude est à supérieure ou égale à Y, rapportée à la surface totale du bassin. La répartition hypsométrique est donnée par le pourcentage de la surface comprise entre les différentes courbes de niveau à la surface totale.

Le relief de la région d'étude est assez accidenté situé au Nord et au Sud. On distingue deux types de zone dans ce relief :

- zones de montagne (massifs de ras el alia, Henancha);
- zones de plaine (plaine de Tiffech, M'Daourouch);

De par son influence sur les facteurs météorologiques la forme, du relief peut avoir un rôle déterminant dans le conditionnement du comportement hydrologique du bassin.

4.5.1. Altitudes caractéristiques du bassin

Les histogrammes des fréquences altimétriques permettent de déterminer les altitudes caractéristiques du bassin versant, à savoir:

a) Altitude moyenne (H_{moy})

Le paramètre (H_{moy}) s'obtient en divisant le volume montagneux (V) par la superficie du bassin (A). Ce volume est la somme des volumes élémentaires (V_i) de chaque tranche de surface comprise entre les isohypses choisies pour le planimétrage. Ces volumes s'obtiennent en multipliant les surfaces partielles (A_i) par la moyenne arithmétique des altitudes H_i et H_{i+1} des courbes qui les limitent.

L'altitude moyenne de notre bassin est $H_{moy}=650$ m

$$H_{moy} = \frac{\sum_{i=1}^k (H_i + H_{i+1}) A_i}{\sum_{i=1}^k A_i} = \frac{V}{A}$$

b) Altitude la plus fréquente H_{max}

Elle correspond au maximum de l'histogramme des fréquences altimétriques. On parlera Alor de classe modale ou classe d'altitude la plus répandue sur le bassin.

Notre bassin versant a un $H_{max} = 1276$ m (Fig. II-14).

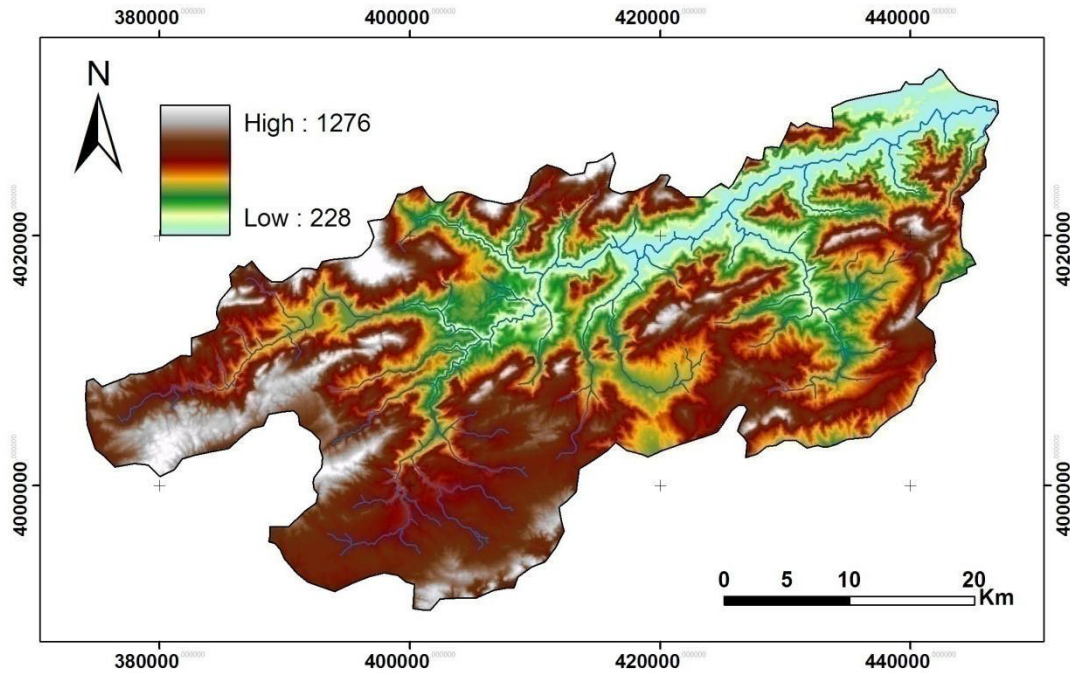


Figure II-14: Model numérique d'altitude de la zone d'étude.

4.5.2. Les pentes

On peut distinguer quatre types de pentes:

- la pente orographique;
- la pente topographique;
- la pente hydrographique;
- la pente stratigraphique.

Les indices de pentes permettent, comme pour certaines caractéristiques géométriques, de comparer les bassins versants entre eux.

Pente orographique. La pente orographique caractérise le relief. Elle favorise l'élévation des masses d'air en mouvement au dessus des reliefs et provoque la condensation de l'humidité qu'elles contiennent.

La pente topographique. C'est la pente qui influence l'écoulement superficiel des eaux: ruissellement de surface et écoulement hypodermique. Elle accélère le ruissellement sur les versants et détermine en partie le temps de réponse du cours d'eau aux impulsions pluviométriques.

La pente topographique se lit et se mesure sur la carte topographique à grande échelle ($>1/100000$) ou à l'aide de M.N.T.

La pente hydrographique. La pente hydrographique, ou profil en long du cours d'eau, peut-être déterminée sur la carte ou mesurée sur le terrain par un nivellement de précision. Cette pente exprimée généralement en m/km conditionne:

- la vitesse de l'eau dans le chenal;
- la vitesse de l'onde de crue;
- le tirant d'eau de la rivière: pour un même débit et une même largeur une rivière plus pentue a une vitesse d'écoulement plus grande et donc, généralement, une profondeur plus faible.

La pente hydrographique varie plus ou moins irrégulièrement pour un même cours d'eau selon les structures géologiques traversées et diminue en général d'amont en aval (forme concave des profils en long). La pente d'un cours d'eau varie beaucoup d'un type de cours d'eau à un autre: supérieurs à 10^2 m/km pour les torrents fortement pentus à 10^{-2} m/km pour les grands fleuves. Elle conditionne la forme des hydrogrammes de crue.

La carte des pentes du bassin versant Medjerda montre des pentes variant de 0° à $25,9^\circ$ (Fig. II-15)

4.5.3. Indices de Pentes

Les indices de Pentes permettent de caractériser les pentes d'un bassin versant et d'établir une classification des différents reliefs pour faire ensuite des comparaisons entre les différents bassins. L'appréhension du relief peut être faite à l'aide d'au moins deux indices.

a) Indice de pente global (I_g)

Cet indice présente l'avantage d'être très simple et facile à calculer. L'indice de pente global (I_g), exprimé en m/km, est donné par le rapport de la dénivelée utile (D, en m); estimée à partir de la courbe hypsométrique; à la longueur du rectangle équivalent en km (L_e), d'où:

$$I_g = D/L_e \quad \text{d'où} \quad I_g = 8.69 \text{ m/km}$$

$$D = H_{5\%} - H_{95\%} \quad \text{alors} \quad D = 874 \text{ m}$$

La dénivelée utile (D) est estimée, à partir de la courbe hypsométrique, par la différence des altitudes correspondant à 5 et 95% de la superficie totale du bassin ; altitudes dénotées, respectivement, par $H_{5\%}$ et $H_{95\%}$. Ceci dit que 90% de la superficie s'étend entre ces altitudes.

Selon la classification adoptée par l'ORSTOM (France), le relief est dit assez faible si l'indice de pente global est compris entre 5 et 10 m/Km.

Malgré sa simplicité, l'indice de pente global présente l'inconvénient de décroître pour un même bassin lorsque la superficie croit. Il permet la classification mais on ne peut pas s'en servir pour comparer des indices de pente des bassins versants de superficies différentes. Pour palier à cette lacune, il serait préférable d'utiliser la dénivelée spécifique.

b) Dénivelée spécifique (Ds)

La dénivelée spécifique exprimée en mètre, donne la possibilité de comparer entre les valeurs des différents bassins. Elle s'obtient à partir de pente global et la superficie par la relation suivante :

$$D_s = I_g \sqrt{A} \rightarrow D_s = 8.67 \times 37.56 \rightarrow D_s = 326.60 \text{ m}$$

On a $250 < D_s < 500 \text{ m}$, le relief est Fort et de catégorie R6 suivant la classification d'Orstom.

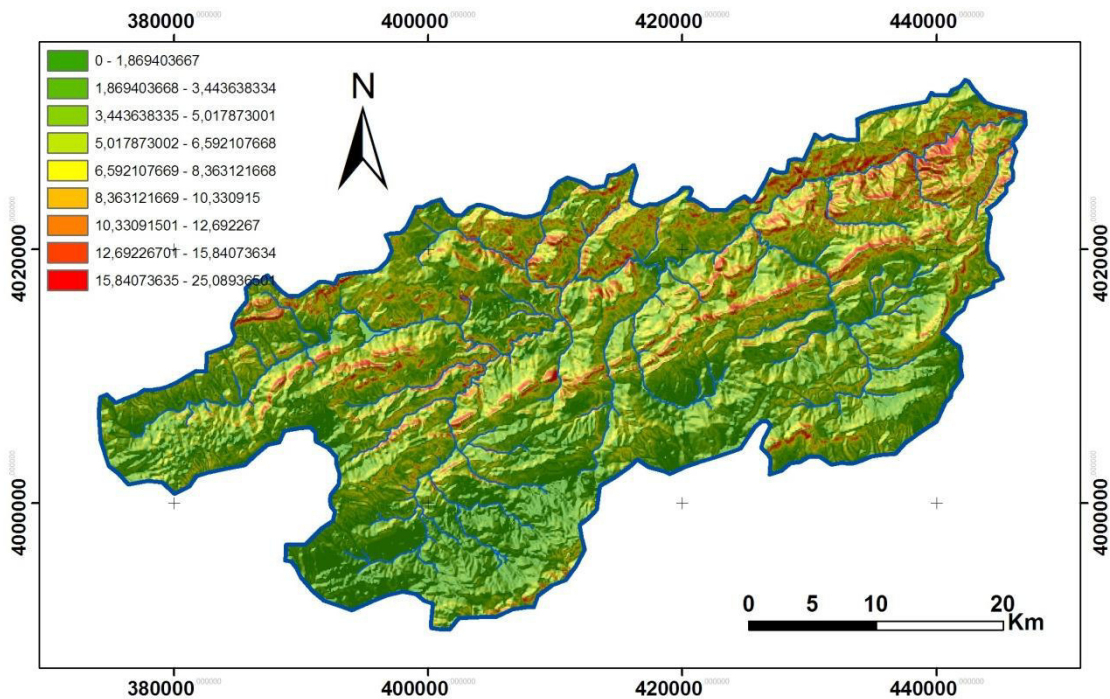


Figure II-15: Carte des pentes du bassin versant Medjerda amont.

c) La pente moyenne du bassin

Certains hydrologues de l'état définissent des pays de l'Est définissent la pente moyenne de bassin versant par la formule suivante :

$$I_{\text{moy}} = H_{\text{max}} - H_{\text{min}} / \sqrt{A} \text{ en (m/km)}$$

On a $H_{\text{min}} = 257 \text{ m}$ donc $I_{\text{moy}} = 1125 - 257 / 37.56 \rightarrow I_{\text{moy}} = 23.11 \text{ m/km}$ cette valeur obtenue, indique une pente légèrement inclinée selon la classification de l'CUIG.

5. Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique est l'ensemble des chenaux qui drainent les eaux de surface vers l'exutoire du bassin versant. Il peut se caractériser par trois éléments : sa hiérarchisation, son développement et son profil en long.

Le bassin versant de Medjerda amont draine un ensemble de région hétérogène des hautes altitudes. Le profil en long est hiérarchisé d'un talweg principal (Oued Medjerda) et ses principaux affluents tels que: Oued Djedra, Oued Chouk, Oued Hammam et Oued Er Rnem. L'oued Medjerda (106,16 km) se range parmi les oueds transfrontaliers qui a son amont en Algérie et son aval en Tunisie. Il prend naissance au Sud-ouest du cote de la commune de Khemissa, traverse les limites internationales à Mjez el Bab, puis s'écoule vers le Nord-est avant de se jeter dans la Méditerranée dans le golf de Tunis. Ces principaux affluents sont : Oued El Hammam (30,00 km) à écoulement du Sud vers le Nord; Oued El Berrich (15,00 km) à écoulement Sud vers le Nord; Ourd El Bateun (14,97 km) à écoulement Sud vers le Nord; Oued Djedra (12,64 km) à écoulement du Nord vers le Sud; Oued Er Ranem (12,46 km) à écoulement du Sud vers le Nord; Oued Chouk (12,34 km) à écoulement d'Ouest vers l'Est; Oued Er Roul (11,48 km) à écoulement du Sud vers l'Est; Oued Smenndil (11,09 km) à écoulement du Sud-est vers le Nord (Fig. II-16).

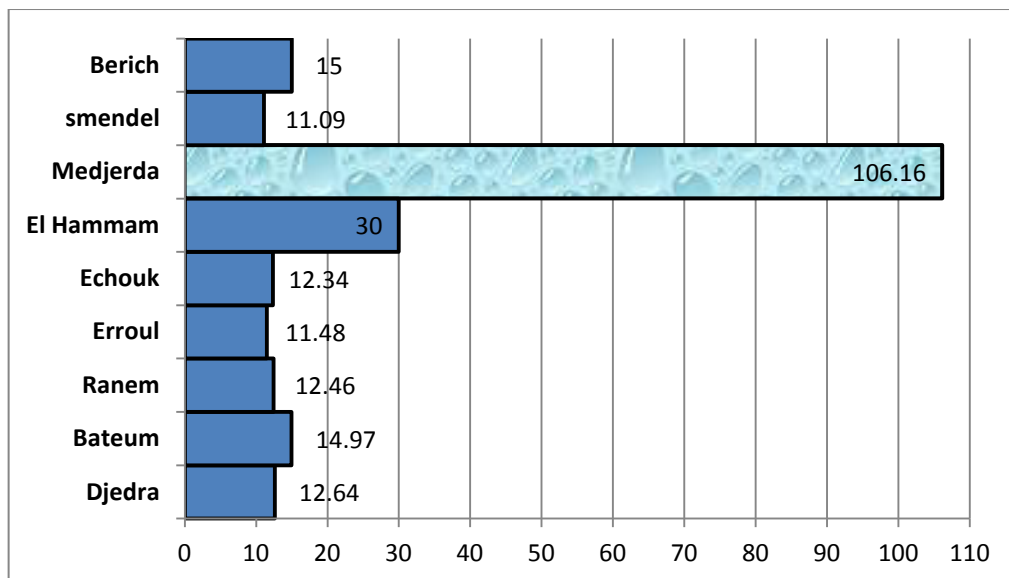


Figure II-16: Longueurs des du talweg principal et de ses principaux affluents dans le bassin versant Medjerda amont.

Le bassin de la Medjerda se caractérisé par :

5.1. La densité de drainage (Dd) :

Exprimé en Km/Km² ; se définit étant le rapport de la longueur total (L_x), en Km à la superficie totale du bassin (A) en Km² soit :

$$Dd = Lx/A \rightarrow Dd = 3.23 \text{ Km/Km}^2$$

5.2. Le Temps de concentration (Tc) :

Le temps de concentration est un concept utilisé en hydrologie pour mesurer la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux (réponse hydrologique)¹. Il est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci. Le temps de concentration est fonction de nombreux paramètres tels que la topographie, la géologie, l'occupation du sol dans le bassin versant, l'imperméabilité des sols, etc.

Le temps de concentration est utilisé pour les calculs de prédiction des débits résultant d'événements pluvieux basés sur des statistiques dérivées des périodes de retour. En effet, il est important pour les ingénieurs et les hydrologues d'être en mesure de prédire la réponse d'un bassin versant à une pluie. Notamment pour le dimensionnement des infrastructures (conception de ponts, ponceaux, etc.) et de gestion des inondations par exemple. Ce paramètre; exprimé dans ce cas en heures; peut être estimé par la formule de Giandotti :

$$T_C = \frac{4\sqrt{A} + 1.5 L_p}{0.8 \sqrt{H_{moy} - H_{min}}}$$

D'où Tc = 19.51 soit 19 heures et 30 minutes Dans laquelle L_p est la longueur (en km) du thalweg principal et H_{moy} et H_{min} Sont respectivement, les altitudes moyennes et minimales du bassin (en m).

On remarque que le temps de concentration est d'autant plus élevé que l'allongement du bassin est marqué. La lithologie et le couvert végétal influe également sur le temps de concentration en jouant le rôle d'entrave empêchant l'eau de s'écouler.

5.3. Profil en long

Le profil en long d'un cours d'eau est un graphique qui met en rapport la variation de l'altitude du lit ou du fond de la vallée et la distance. La distance, représentée sur l'axe des abscisses, est toujours mesurée à partir d'un point de départ donné, souvent localisé à une extrémité du réseau hydrographique, comme par exemple à une confluence, à l'entrée dans un lac ou dans la mer. Sur un profil en long, on peut

observer les variations de pente qui se succèdent au long d'un cours d'eau. Ces variations sont importantes car elles peuvent donner de façon indirecte des informations sur les climats antérieurs, sur l'augmentation amont-aval des débits, sur la charge sédimentaire transportée et sur les caractéristiques du bassin versant. Les variations de pente peuvent être aussi très utiles pour détecter des contrôles structuraux et pour déterminer les tronçons en érosion et les tronçons à dépôt.

Le profil en long de notre bassin (Fig.II-17) montre des ruptures de pente que l'on ne peut expliquer que par des seuils rocheux particulièrement résistants à l'érosion hydrique; une à l'altitude de 800m; une autre à l'altitude de 700m, où la pente est plus accentuée faisant accélérer l'écoulement et donnant naissance à un régime défavorisant l'infiltration; une troisième à l'altitude de 500m, qui se stabilise et donne l'occasion à l'eau de s'infiltrer et enfin une dernière à l'altitude de 300m, qui est plus importante car elle s'étend à une distance plus importante.

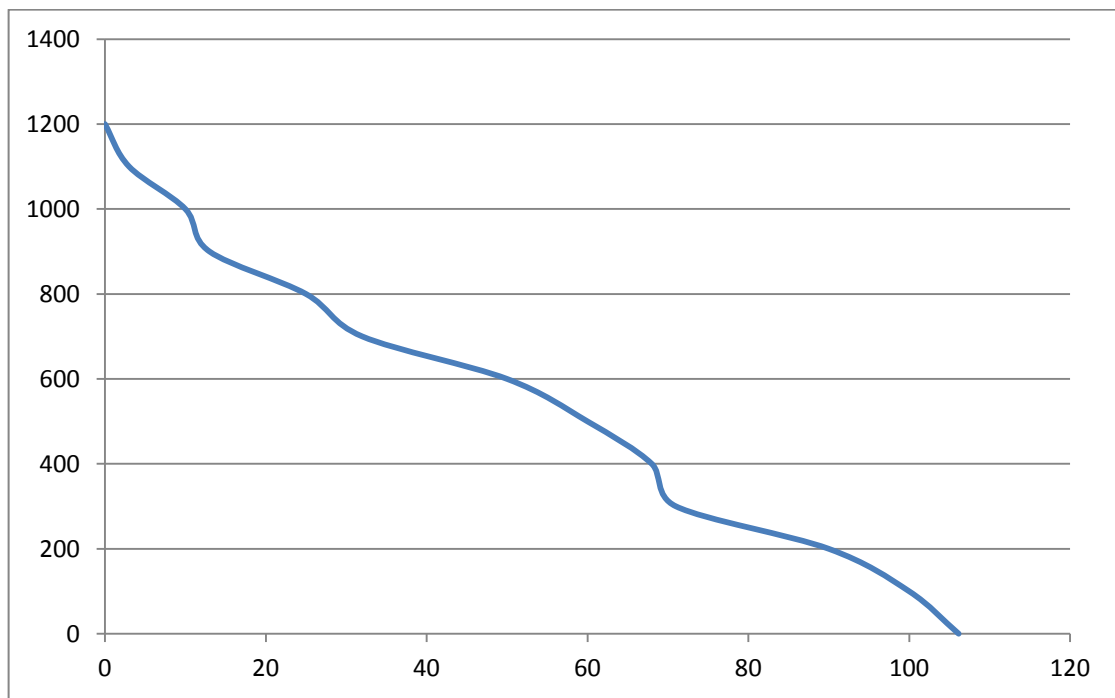


Figure II-17 : Profil en long de l'oued Medjerda.

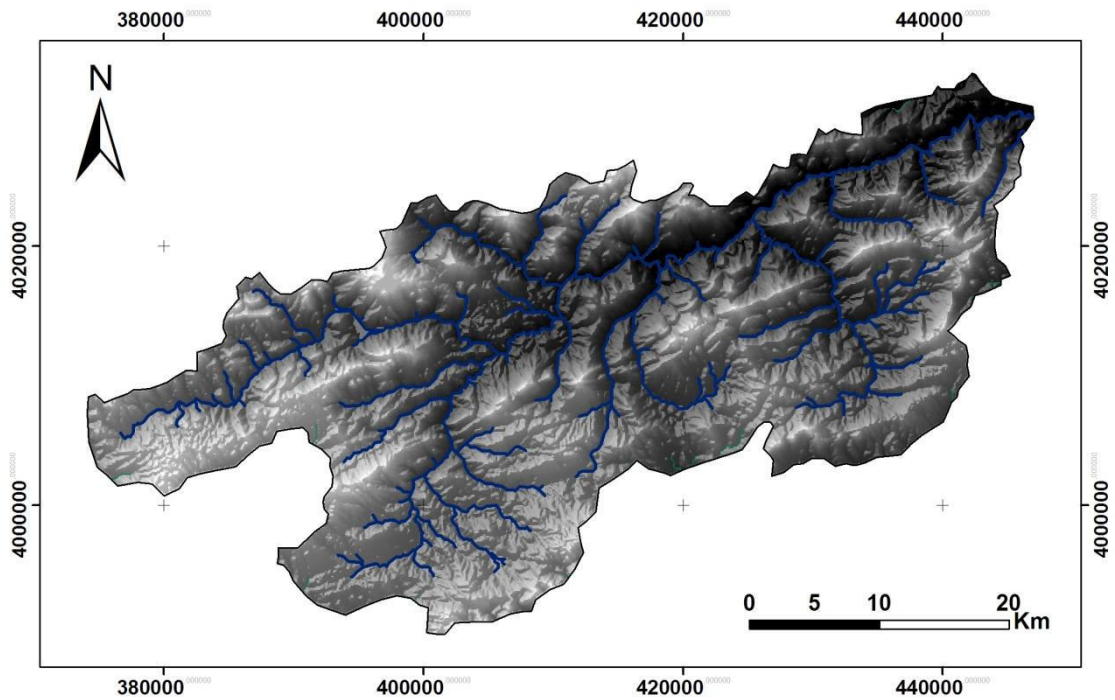


Figure II-18 : Réseau hydrographique du bassin versant de Medjerda.

6. Système Aquifère du Bassin Versant Medjerda

Le principal réservoir du Bassin Versant Medjerda est l'aquifère karstifiés Maestrichtien-Campanien-Turonien du synclinale de Taoua. Et la nappe de grès fracturés du Mio-pliocène de Bir Louhich. Les calcaires pliocènes peuvent aussi contenir des potentialités aquifères non négligeables. Ainsi que l'aquifère thermal de Hammam Tassa et Aïn Guelib.

6.1. Synclinal de Taoura

Le synclinal de Taoura est formé par la superposition de deux horizons aquifères. Le premier est superficiel, composé de formations alluvionnaires du Mio-Plio-Quaternaire de faible potentialité et le second est plus profond composé de formations calcaires du Maestrichtien.

6.1.1. La nappe libre du Mio-Plio-Quaternaire

Cette nappe permet le remplissage du synclinal de Taoura avec des argiles sableux, riches en marnes, conglomérats, sables, graviers, limons sableuses, et cailloutis du Miocène au Quaternaire. L'aquifère est bien présent au centre du synclinal (zone de décharge) son épaisseur varie de 10 à 140 mètres de profondeur et diminue progressivement jusqu'à disparition totale sur les bordures du bassin (zone de recharge). Cette nappe est captée par des puits domestiques et est à l'origine de plusieurs sources, tel qu'Aïn Tamatmat, Aïn el Hadjar, et Aïn el Berda. Son alimentation se fait essentiellement par les eaux de pluie. La source d'Aïn Legridjine se situe à 7 km à l'Ouest de la ville de Taoura, et produit un débit de 10-30l/s. Cette source constitue un des exutoires de l'aquifère des calcaires du Maestrichtien. Elle se localise dans une zone fracturée à proximité d'une faille orientée NW-SE.

6.1.2 La nappe captive du calcaire Maestrichtiens

La nappe de Taoura, est considérée comme le principal réservoir d'eau dans la région d'étude. Elle est constituée par des marnes et des calcaires fissurés appartenant au Maestrichtien inférieur et au Campanien moyen. Sa forme structurale en cuvette explique son affleurement sur les flancs Nord et Sud du synclinale (remarquable par plusieurs sources, tel que Aïn Legridjine, Aïn Bousessou et El Khengua), et son plongement en profondeur sous le remplissage Mio-Plio-Quaternaire au coeur du bassin, (où elle peut atteindre les 600 m d'épaisseur). Délimité par un mur marneux et un toit argilomarneux, cette nappe est composée de deux aquifères superposés séparés

par une couche de marnes. Les calcaires du Maestrichtien inférieur sont très fissurés et renferment un aquifère important. Les fissures peuvent avoir des dimensions de cavernes confirmées par le forage "T1" qui a rencontré une caverne à 103 mètres de profondeur au cours de sa réalisation (Friane, 2000). Cet aquifère s'étend sur tout le synclinal et disparaît au Nord-est vers Merahna sous une épaisse couche de marnes Miocènes (400 m). Son substratum n'a jamais été atteint en raison de sa profondeur, supérieure à 400 m. Par contre, son toit est représenté par la formation argilo-calcaire du Maestrichtien supérieur. Cette nappe offre un débit d'exploitation important pouvant aller jusqu'à 300 l/s, c'est le cas des forages D4, T1 et D3, T2, D7 T3, T7, T6. Cette eau est destinée à l'alimentation en eau potable des villes de Souk-Ahras, Taoura, Merahna, Drea, Zaarouria et Sidi Fredj, Ouillen. Le contact des marnes du Miocène et des calcaires fissurés, favorise l'apparition des sources, nous avons dénombré environ 14, avec un débit global, de l'ordre de 43 l/s, destiné à l'alimentation en eau potable.

Dans le côté effondrée du synclinal au niveau de Merahna, la formation du Maestrichtien plonge sous la couverture Miocène à plus de 400 m, ce qui explique l'absence de forages profonds dans cette zone. La superficie des calcaires du Maestrichtien inférieur à l'affleurement est de l'ordre de 57 Km². L'écoulement des eaux souterraines s'effectue généralement du Sud vers le Nord. L'estimation de la capacité hydrique des calcaires fissurés du synclinal de Taoura est de 44 Mm³. Les valeurs de la transmissivité, sont élevées, variant de 10⁻¹ à 10⁻²m²/s, ce qui confirme la présence d'une fissuration et karstification de la nappe. Le coefficient d'emmagasinement est de l'ordre de 9.10⁻³ (Toubal, 1993).

6.1.3 L'aquifère campanien

Les ouvrages de reconnaissance et d'exploitation n'ont pu atteindre l'aquifère du Campanien supérieur, en raison de sa profondeur et surtout de la difficulté à traverser les calcaires du Maestrichtien inférieur du fait du phénomène de pertes totales de boue au cours du forage. Cependant on dénombre plusieurs sources jaillissantes de cet aquifère:

La sources d' Aïn Guelib

La source se situe à 12 km à l'Ouest de la ville de Taoura. Elle émerge à la faveur d'une faille NW-SE au contact des marnes et calcaires du campanien. L'exutoire principal est capté, trois autres griffons émergents des alluvions. Toutes ces sources se rejoignent et finissent dans les gorges de l'Oued Guelib.

6.1.4. Les sources thermo-minérales

Les nombreuses sources thermales de la région sont liées aux accidents tectoniques, le plus souvent jalonnés par une montée triasique (David, 1956). Les failles transversales qui génèrent d'importantes sources thermales, sont aussi responsables de la remontée du flux de chaleur, des formations évaporitiques. Le gradient géothermique mesuré ou calculé est souvent supérieur à 4°C/100 m (Guasmi, 2005).

Source thermal de Hammam Zaid :

Cette source prend naissance à l'extrémité sud-occidentale du massif Eocène dit Djebel El-Hammam ; sa température atteint une moyenne de 39° à 40°, son débit serait d'environ 80l/min ; c'est une eau chlorurée-sulfurée au contact des calcaires yprésiens et au Trais. Elle constitue un établissement de bains fréquents sur toute l'année pour des cures thérapeutiques

Source thermal de Hammam Tassa:

La source coule au centre de l'anticlinal crétacé de Hammam Tassa. Elle se situe à proximité de la route du Kef, à 15 km de Souk-Ahras, où un bain thermale y est installé. L'eau est chlorurée-sulfurée et jaillit des calcaires du Sénonien à 40 °C, avec un débit de 2 l/s. Elle est caractérisée par (6,8 mg/l) de H₂S et (957,6 mg/l) de CO₂.

6.2. La nappe alluvionnaire

La nappe alluvionnaire, émerge les alluvions de la zone effondrée (Dahdouha N., 2012). Elle est exploitée par deux forages à proximité d'Oued Medjerda mobilisant 8 l/s destinés à l'A.E.P des localités de Khedara Gare et El Hemmissi. La transmissivité du forage F1 est de 3.10⁻⁴ m²/s. La perméabilité moyenne est estimée à 1,2.10⁻⁵ m/s, le coefficient d'emmagasinement calculé est de 2,3.10⁻⁴. La majorité les puits se localisent à proximité des berges d'Oued Medjerda et de ses affluents et leur débit moyen par puits varie de 01 à 02 l/s, le reste est réparti aux piémonts des montagnes et les zones éparses avec un débit de 01 l/s par puits.

6.2.1. Les Sources

Les débits jaugés dépassent les 10 l/s, c'est le cas des sources de Ced Benouir, Mougras, Cheb, Hefala, Alioua,etc. Ces sources se localisent dans les calcaires du turonien.

Notons également que des émergences sont issues des calcaires Eocène, plus particulièrement les calcaires à grandes nummulites au contact des marnes paléocènes.

Les sources, du massif du Djebel El-Hemmam, Ras-El-Oud et Aïn Souda, s'écoulent à la base des calcaires à silex yprésien. Elles alimentent la commune d'Ouled –Driss avec un débit très important d'environ ≈ 12 l/s ; soit : (1000 m³/jour).

En outre, dans les sédiments gréseux du (Numidien), se forment des sources d'affleurement au niveau des masses argileuses. Le débit est faible, elles sont souvent ferrugineuses et sortent du pied de grands cônes d'éboulis installés au bas des pentes.

6.3. aquifère Sid Fredj-Aïn Zerga

La zone de Sid Fredj-Aïn Zerga comporte deux aquifères :

-Un aquifère libre qui se trouve dans la région Nord, alimentant 05 et est captée par une dizaine de puits et 3 forages (A.B.H, 2012).

-Un aquifère karstique qui se trouve dans la région Sud, capté par 6 forages, dont deux équipés par une station de déminéralisation à l'osmose inverse.

Les caractéristiques et potentialités des principales sources de la région d'étude sont bien détaillées dans le tableau (II-16)

Tableau II-16: Position, débit et conditions d'émergence des plus importantes sources du secteur d'étude

Source	X(m)	Y(m)	Z(m)	Débit (l/s)	Conditions d'émergence
Aïn Legridjine	972093	329470	783	8	Calcaire Maestrichtien
Aïn Tamatmat	974540	328990	846	8	Grès Miocenes
Aïn Boussebt	1002150	337850	770	7	Calcaires Campaniens Inf
Aïn Djehifa	975100	333850	907	7	Santonien supCampanien
Aïn Trab	976075	329878	866	6	Pliocene continental
Hamman Tassa	968100	334300	650	5	Alluvions Quaternaires
Aïn Guelib	968079	328305	789	5	Calcaires Campaniens
El Khenga	980660	328360	831	4	Calcaires Maestrichtien inf
Aïn Oum El Jera	974734	342650	860	4	Calcaire Campanien
Aïn Oglia	972906	322760	895	3	Grès Miocene
Aïn Hammam	966130	326620	793	3	Alluvions Quaternaires
Aïn Hallouf	978452	333093	765	3	Calcaires Maestrichtiens Inf

7. Conclusion

Les résultats de l'étude hydroclimatologique a permis de définir les principaux paramètres du bilan hydrique de la région, ainsi que son climat. La région d'étude est caractérisée par un climat froid pendant la saison l'hivernale et chaud pendant la saison d'été par une température moyenne annuelle de l'ordre de 16.18°C. La lame d'eau précipitée dans la région d'étude atteint un cumule annuel de 607.25 mm/an. Les précipitations sont plus fréquentes pendant l'hiver avec une valeur de 192.8 mm soit 31,63% des précipitations totales alors que l'évapotranspiration représente 402.63 mm de la lame d'eau précipité, ce que représente une tranche d'eau ruisseler 20.75% (126.05 mm) et une quantité d'eau absorbée par le sol et le sous-sol est de 12.93% (78.57 mm) des précipitations totales. De point de vue hydrologique, le bassin versant de l'oued Medjerda amont est un sous-bassin du grand bassin du Medjerda-Mellègue. Il occupe dans sa partie Algérienne une superficie environ de 1411 Km² et s'étend sur une longueur du talweg principal de 106.16 Km caractérisé par un chevelu hydrographique très dense ($Dd = 3.23$) et un écoulement temporaire. Le territoire du bassin Medjerda est composé de deux grands ensembles pédologiques : Zone Nord, répartie entre dix (10) communes de la wilaya de Souk-Ahras, occupant une superficie plus de 112000 Ha. C'est une région montagneuse dont environ 40% des terres sont situées en pentes supérieures à 25%, donc les sols sont instables. La forêt est prédominante et seule une agriculture de subsistance est pratiquée par les ruraux (Maraîchage, Arboriculture, élevage de bovins). La zone des hautes plaines dont l'altitude dépasse 800m. Le relief est pratiquement plat. Les sols sont stables et l'agriculture extensive est dominante (Céréales, fourrages). Elle comprend les plaines situées au centre et au Sud de la wilaya: Taoura, Merahna, M'Daourouch jusqu'à Sidi Fredj qui couvrent une superficie environ de 80000 Ha. De point de vue hydrogéologique le principal réservoir du Bassin Versant Medjerda est l'aquifère karstifiés Maestrichtien-Campanien-Turonien de Taoua. La nappe des grès fracturés du Mio-pliocène de Bir Louhich constitue également un important réservoir. Les calcaires pliocènes peuvent aussi contenir des potentialités aquifères non négligeables. Par endroit les alluvions et les sables quaternaires recellent d'importants potentialités, ainsi que l'aquifère thermal de Hammam Tassa et Aïn Guelib.



CHAPITRE III

GENERALITE SUR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

1. Introduction

Les mouvements de terrain sont des phénomènes fréquents en Algérie qui se caractérisent par une large diversité. Leur manifestations sont lourdes de conséquences, aussi bien sur le plan humain que matériel. Ces phénomènes sont connus comme des événements naturels qui consistent en une dégringolade d'une masse de matériaux tels que de la terre, des roches, des déchets miniers, etc. vers le bas de la falaise. Ces déplacements plus ou moins brutaux du sol ou du sous-sol sous l'effet d'agents naturels comme la fonte des neiges, pesanteur, séismes, etc. ou anthropiques tel que les terrassements, vibrations, exploitation des matériaux, etc. surviennent lorsque la résistance des terrains devient inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité ou par les travaux de l'homme. Leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique des sols, mécanique des roches et résistance des matériaux.

Les glissements de terrain sont des déplacements lents de quelque millimètre/an à quelque mètre/jour d'une masse cohérente de terrain le long d'une surface de rupture plane, courbée ou quelconque.

L'analyse de la stabilité des talus naturels digues, remblais, déblais, etc. est l'une des principaux problèmes en géologie de l'ingénieur et géotechnique. Les désordres causés par les échecs des pentes sont souvent surprenants, couramment destructifs et rarement meurtriers. L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis l'éventualité de rupture est une question compliqué surtout dans le cas où les données sont limitées ou mal connues. Le calcul de stabilité d'un talus exige la représentation de la géométrie, les charges et surcharges, les sollicitations sismiques, les propriétés et caractéristiques mécaniques et les conditions hydrauliques du site, etc. Le problème comporte essentiellement la détermination d'un plan de rupture critique et le coefficient de sécurité correspondant. Qui est le rapport entre la résistance au cisaillement du sol à la contrainte de cisaillement réelle sur le terrain le long de la surface de rupture.

Dans ce chapitre on passe en revue quelques concepts liés aux typologies des mouvements de pentes, méthodes de calcul de stabilité des talus, et la cartographie du risque glissement de terrain. Ce dernier est lié ; d'une part à la présence d'un événement dommageable ou aléa qui est la manifestation d'un phénomène géomorphologique naturel, et d'autre part à l'existence d'enjeux qui représentent l'ensemble des

conséquences ou des pertes attendus en vies humaines, blessés, biens, activité économique, aux moyens de subsistance, et à l'environnement ou au patrimoine.

2. Classification des mouvements de terrain

Les classifications des mouvements de terrain qu'ils soient d'origine naturelles ou anthropiques se diffèrent d'un auteur à l'autre, et d'une école à l'autre (Varnes 1984). Des caractéristiques particulières sont prises en compte dans chaque classification. Elles peuvent porter essentiellement sur:

Les mécanismes du déplacement;

Le type de mouvement;

Le type de matériaux;

La géométrie et l'état;

La vitesse de déplacement;

Les caractéristiques géotechniques

le contexte géologique et géomorphologique;

Les causes de la rupture.

Ces mouvements de terrain peuvent affecter les pentes naturelles ou les talus dressés:

2.1. Pentas naturelles :

Il s'agit des talus naturels existants, peu homogènes et présentant des variations géologiques et éventuellement des discontinuités stratigraphiques ou tectoniques. On distingue :

Les glissements.

Les écroulements.

Le fluage et solifluxions.

Les coulées boueuses.

2.2. Talus artificiels :

Les talus artificiels ou dressés peuvent être affectés par des ruptures de pentes ou par des fluages. En fonction des types d'ouvrages; les talus peuvent être classés comme suit :

Talus en déblai;

Talus en remblai;

Talus en remblai sur sol compressible;

Ouvrages de soutènement vis-à-vis d'un glissement profond;

Digues, retenues collinaires et barrages en terre.

3. Mécanismes et typologies des ruptures des pentes

Les mécanismes de rupture de pentes naturelles ou dressées dépendent de la forme de la surface de cisaillement (droite, arc de cercle, spirale logarithmique, etc.) ou de la mécanique de rupture (poinçonnement, coulée de boue et de fluage, etc.). L'explication des modes de rupture considère généralement un mécanisme plan pour les glissements translationnels et courbé pour les glissements rotationnels. Les glissements plans se produisent par translation sur un plan de cisaillement incliné, où la masse de sol ou de roche en mouvement est considérée comme monolithique. Cependant les glissements rotationnels se traduisent par un basculement de la masse glissée le long d'une surface de cisaillement plus ou moins profonde dans un milieu plutôt homogène et isotrope.

3.1. Les glissements de terrain :

Un glissement de terrain est défini comme le déplacement d'une masse de terrains meuble ou rocheux le long de surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante. Il peut provoquer des dommages importants aux ouvrages et aux constructions avec un impact économique conséquent à la suite d'un événement naturel comme pluie, érosion, érosion de berge, séisme ou par des actions directe de l'homme tel que les terrassements, modification des conditions géologiques ou géotechniques. Les vitesses de déplacement couramment observés varient de très lent en phase de préparation des mouvements à très rapide en phase paroxysme.

3.2. La morphologie d'un glissement de terrain :

La morphologie d'un glissement de terrain peut être déterminée par plusieurs caractéristiques telles que (Fig. III-1) :

Rejet principal : surface inclinée ou verticale, souvent concave limitant le glissement à son extrémité supérieure et prolongée en profondeur par la surface de glissement.

Couronne : se situe au-dessus de l'escarpement principal souvent peu affecté par le désordre. Seules quelques fissures ou crevasses témoignant de la mise en mouvement des terrains dans ces zones.

Tête : c'est la limite amont du glissement et plus précisément partie où le matériau glissé se trouve en contact avec l'escarpement principal.

Rejet secondaire : circulaire semblable à l'escarpement principal, mais visible dans la masse remaniée. Ces escarpements confèrent à la masse en mouvement une structure en escalier.

Flanc : limite latérales du glissement prolongeant l'escarpement principal.

Élément : fraction de la masse glissée entre deux escarpements.

Pied : correspond à l'intersection aval de la surface topographique initiale.

Pouce : zone aval du mouvement du terrain ou extrémité du bourrelet.

Corps : partie centrale du glissement recourant la surface de rupture.

Fissures et crevasses : rupture au sein du matériau se manifestant par des fentes d'importance et de formes diverses suivant leur position.

Rides transversales : se forment dans le bourrelet du mouvement du terrain, suite aux efforts de compression pouvant aboutir à des chevauchements dans le matériau.

Surface de rupture : c'est la surface qui sépare la masse glissée du terrain en place.

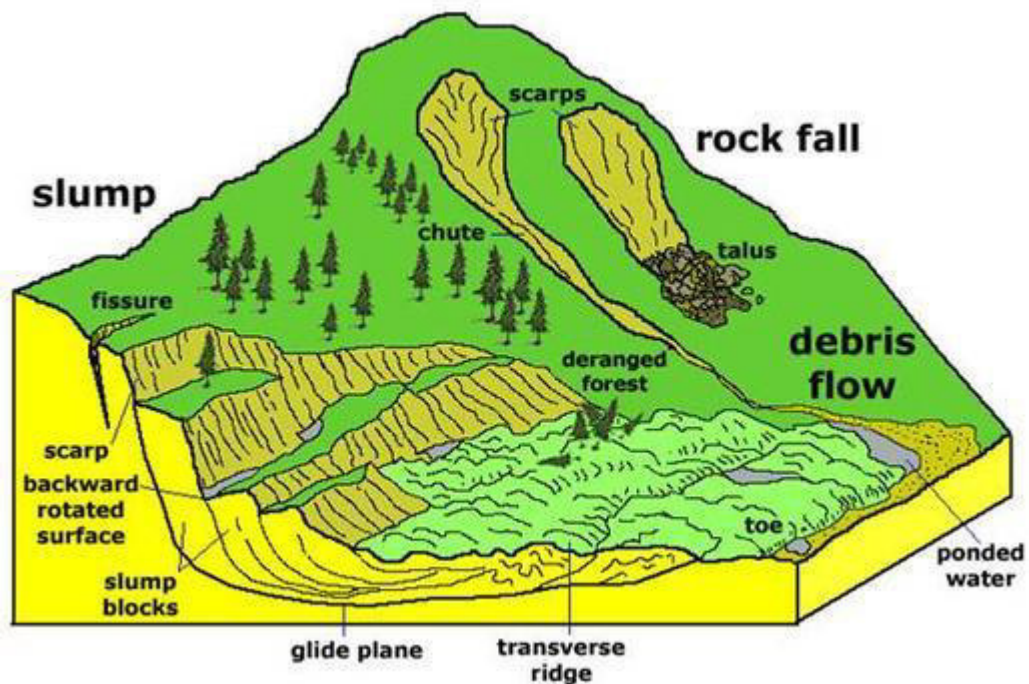


Figure III-1: Quelques éléments descriptifs d'un glissement de terrain.

On peut distinguer trois types de glissements:

Les Glissements plans :

Le mouvement est une translation du massif sur un plan incliné, plus au moins régulier. En général la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques, et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Les joints argileux sont particulièrement favorables aux déclenchements de glissements plans lorsque les terrains qui les surmontent sont perméables (Fig. III-2a).

Glissements rotationnels :

Ces type des glissements superficiels ou profonds se produisent dans les terrains inclinés homogènes dépourvus de discontinuités géologiques, pour influencer notablement la forme et la position de la surface de glissement. Généralement on parle de glissements circulaires simples ou glissements circulaires complexes (Fig. III-2b).

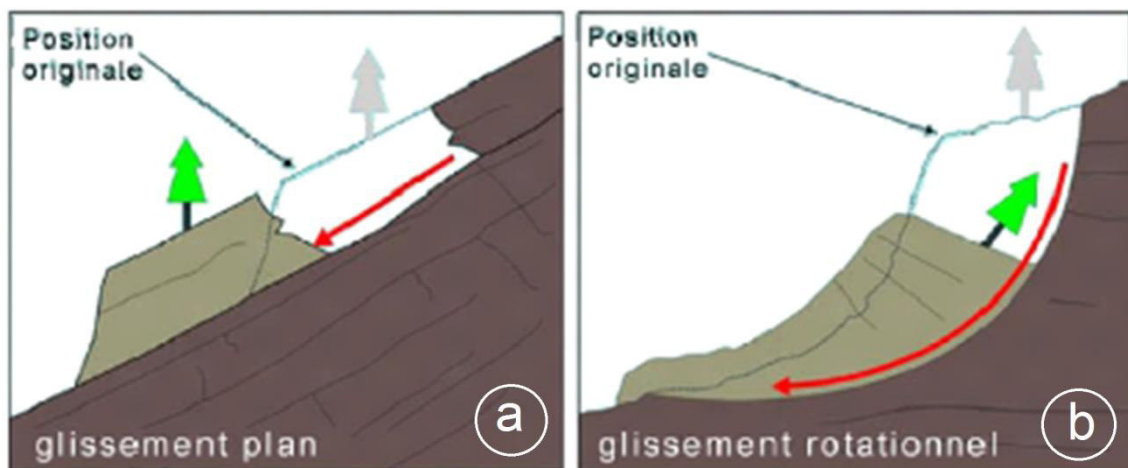


Figure III-2: a-Morphologie d'un glissement plan. b- morphologie d'un glissement rotationnel.

Glissements rotationnels simples : C'est le type de glissement le plus fréquent en Algérie. La surface de rupture présente une forme simple et peut être assimilée à une concavité. L'analyse des possibilités de rupture par le calcul est alors abordable par les méthodes d'équilibre limite. Le plus souvent, la ligne de rupture peut être assimilée à un cercle il s'agit alors d'un glissement circulaire. Si la ligne de rupture a une forme plus complexe, le glissement est appelé glissement non circulaire (Fig. III-3a).

Glissements rotationnels complexes : Les glissements rotationnels complexes évoluent généralement dans les milieux hétérogènes et anisotropes, et résultent d'un emboîtement

les uns dans les autres de glissements rotationnels simples dont la surface de rupture globale n'est pas circulaire (glissements en escaliers - glissements épicycloïdaux - glissements régressifs). Il s'agit de glissements multiples où l'apparition du premier glissement, en bas de la pente, conduit à une perte de butée pour les terres situées au-dessus, et ainsi provoque des glissements successifs remontant jusqu'à l'amont (Fig. III-3b)..

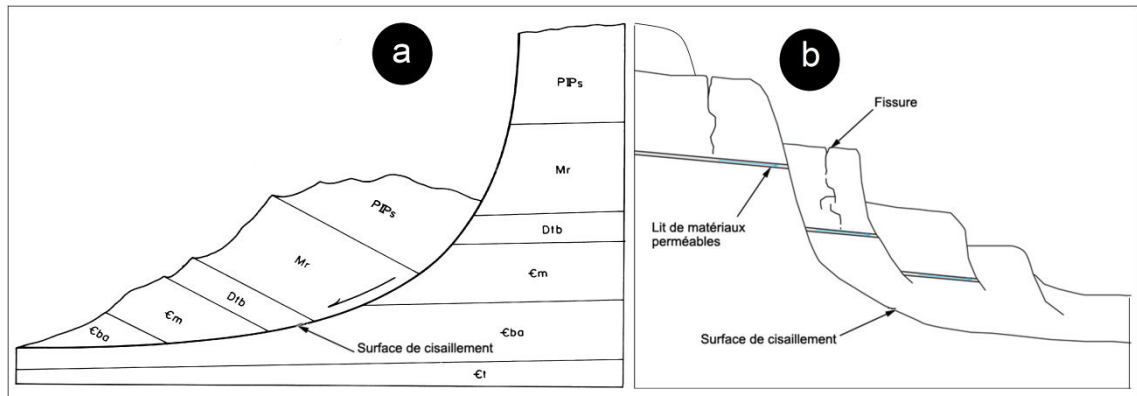


Figure III-3 : a- glissement rotationnel simple. b-Glissement rotationnel complexe.

Glissements quelconques

Les glissements quelconques sont fréquemment rencontrés dans les terrains anisotropes et hétérogènes. Ce type de glissement se calcule par la méthode globale, dans laquelle on considère que la contrainte normale n'est pas constante le long de la surface de rupture. Cette méthode dite "des perturbations" est applicable à une courbe de rupture quelconque envisagée. Elle est basée sur la résolution des équations de l'équilibre statique avec ajustement automatique de la distribution de la contrainte normale obtenue par une perturbation de la contrainte normale de Fellenius le long de la courbe de rupture.



3.4. Vitesse moyenne de mouvement des glissements :

La vitesse moyenne de mouvement des glissements de terrain atteint le plus souvent quelques millimètres par an pour un glissement substabilisé, très lent, et quelques centimètres à quelques décimètres par an pour un glissement actif.

Il existe des cas où le glissement peut être bien plus rapide et où la masse en mouvement, sans perdre sa compacité, peut atteindre plusieurs décimètres par jour. Quelquefois, ces glissements à villosité très rapides peuvent se produire.

Tableau III-1: Classification selon l'activité en fonction de l'évaluation de la vitesse moyenne de glissement à long terme.

Glissement	Vitesse de glissement cm/an
Substabilisé, très lent	0-2 cm/an
Peu actif, lent	2-10 cm/an
Actif (ou lent avec phase rapide),	>10 cm/an

3.4. Profondeur de la surface de glissement

Les glissements peuvent être classés selon la profondeur estimée de la surface de glissement et selon la vitesse moyenne à long terme des mouvements. Lors de l'évaluation du danger potentiel que représente un glissement, on ne doit pas seulement considérer le volume ou la vitesse du glissement.

Tableau III-2: Classification selon la profondeur de la surface de glissement.

Glissement	Surface de glissement
Superficiel	0-2 m
Semi profond	2-10 m
Profond	>10 m

3.5. Les écroulements :

Ce sont des chutes soudaines de grandes masses rocheuses, généralement dus à des causes internes au massif. Ils peuvent se produire suite à la dislocation d'une masse rocheuse diaclasée par altération interne ou accroissement de pressions interstitielles. Ou parfois par des glissements sur banc d'une masse rocheuse stratifiée (Fig. III-4).

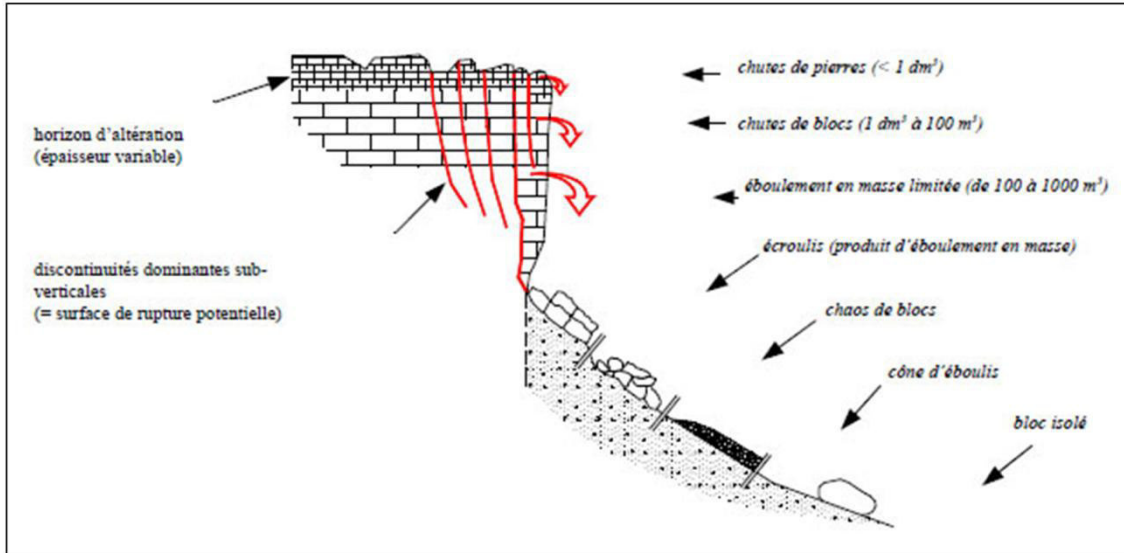


Figure III-4: Ecoulement et chutes de blocs.



3.6. Fluages et solifluxions :

Fluage:

Le fluage est un mouvement lent de matériaux plastiques sur faible pente qui résulte d'une déformation plastique 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. Ces mouvements affectent principalement des versants naturels divers (Fig. III-5a).

Solifluxions

Les phénomènes de solifluxion représentent un cas particulier de fluage.

C'est un phénomène superficiel provoqué par les variations volumique du sol au cours des saisons comme le gel et dégel en montagne, ou l'alternance des saisons sèches et pluvieuses.

Lorsqu'ils affectent des pentes, les mouvements alternés conduisent à une reptation de sol vers l'aval. La solifluxion se repère par la présence d'ondulation du sol et par l'inclinaison des arbres.

La solifluxion se produit essentiellement dans des pentes constituées des sols argileux gonflants et rétractables. (Fig. III-5b).

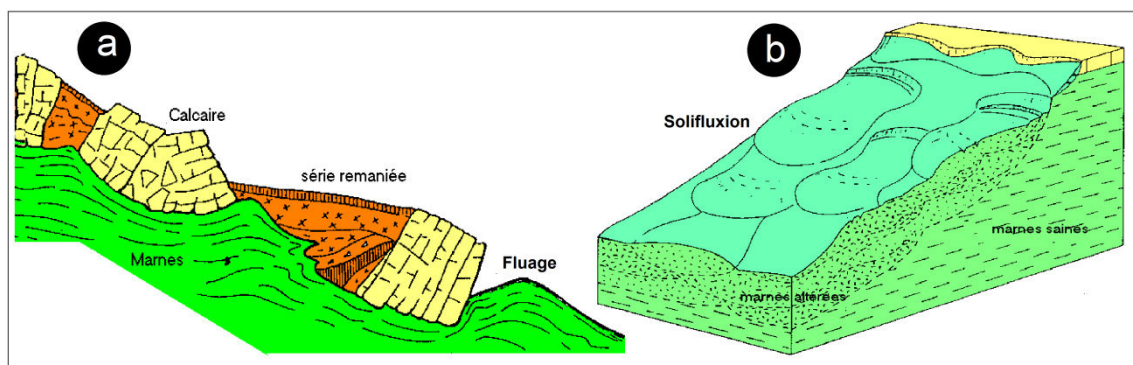


Figure III-5: a: Fluage; b: Solifluxion



3.7. Les coulées boueuses :

La coulée de boue est un mouvement rapide d'une masse de matériaux remaniés, à forte teneur en eau et de consistance plus ou moins visqueuse. Elle prend fréquemment naissance dans la partie aval d'un glissement de terrain. Ces glissements de boue se produisent dans des argiles saturés de tous types, provenant d'argilites ou de marnes ou grès altérés, la teneur en argile dépasse 50% d'éléments inférieur à 2 microns (Fig.III-6).

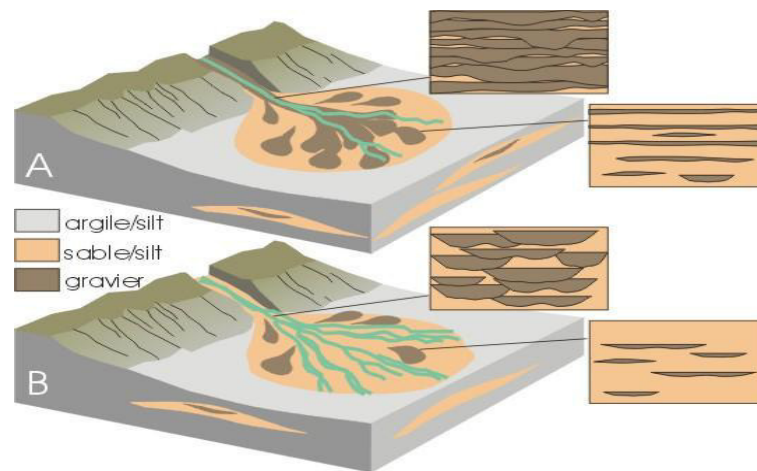


Figure III-6: Les coulées boueuses

3.8. Talus en déblais et en remblais sur sols non compressibles :

Les ruptures de ces talus ont en générale, l'allure de glissements rotationnels circulaires, d'où on distingue:

- les cercles de talus : se produisent généralement dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspondant à une couche plus résistante.
- les cercles de pied sont les plus courants dans ce type d'ouvrages.
- les cercles profonds : ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du pied du talus est de qualité médiocre (Fig. III-7)

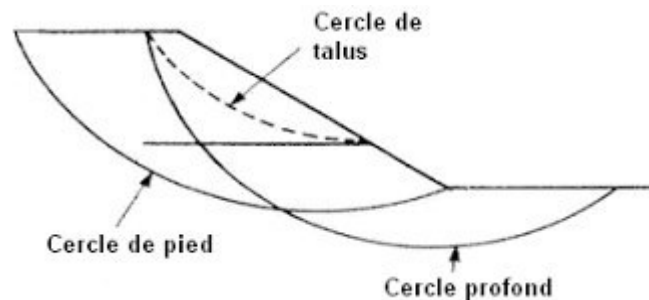


Figure III-7: Différents types de rupture circulaire.

3.9. Talus en remblais sur sols compressibles

Lorsqu' un remblai en sol compacté tel que les remblais routiers repose sur une couche d'argile molle, de vase ou de tourbe, les ruptures susceptibles de se produire sont profondes et se manifestent rapidement. Si le sol mou est homogène, les cercles de rupture sont tangents à la base de la couche molle lorsque celle-ci est relativement peu épaisse (Fig. III-8).

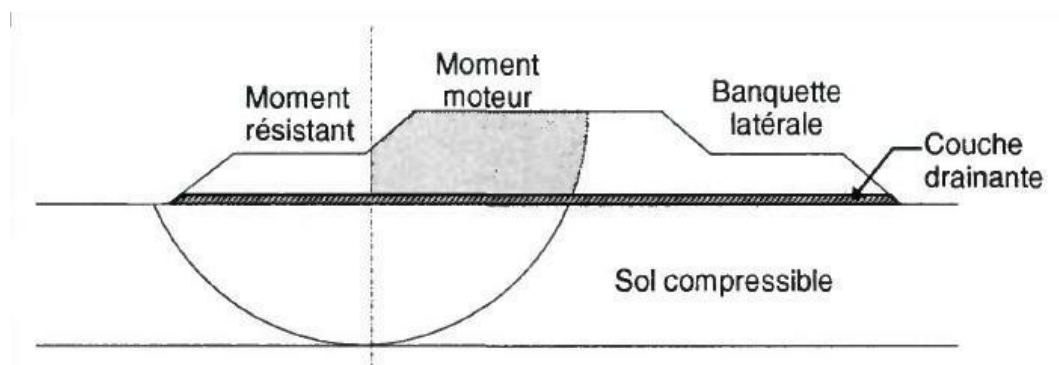


Figure III-8: Remblai sur sol compressible.

3.10. Digues et barrages en terre :

L'étude de la stabilité des pentes amont et aval est une étude indispensable pour la conception des barrages et digues en terre. Différents cas peuvent être étudiés en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue.

Pratiquement, on calcule le coefficient de sécurité "F" le long des cercles de glissement supposés :

- pendant la construction et peu après la construction.
- lorsque le barrage vient d'être rempli.
- lors d'une vidange rapide.

3.11. Ouvrage de soutènement

Diverses techniques de renforcement et ouvrages de soutènement des talus ont été développées par l'ingénierie géotechnique (clouage, tirants précontraints, pieux, etc.). Elles se différencient par le méthode de leur réalisation, la technologie, et le coût. Tout type d'ouvrage, doit assurer une stabilité confortable contre les menaces de rupture circulaire profonde englobant le talus naturel et l'ensemble des constructions qui s'y trouve (Fig. III-9).

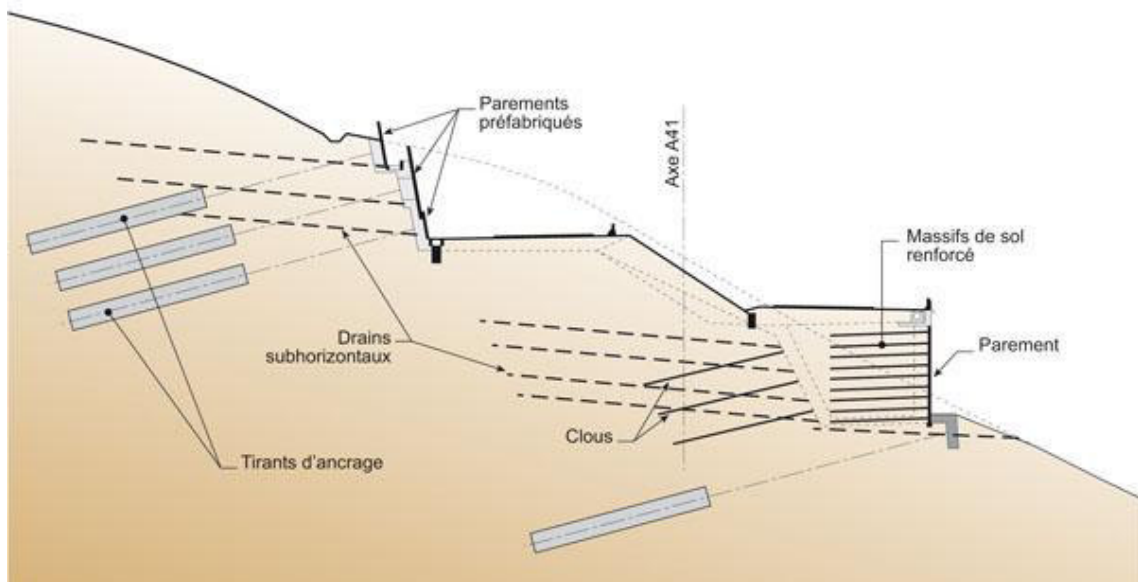


Figure III-9: Soutènement par clouage, ancrage et murs d'un glissement de terrain.





4. Causes d'instabilités

Les causes des glissements de terrain sont diverses et complexes. Elles peuvent varier d'une perturbation des forces (surcharges, suppression de la butée, sollicitation sismique, etc.), à une modification des caractéristiques géométriques, mécaniques ou hydrauliques du terrain (ramollissement, écoulement, précipitations, fonte de neige, vidange rapide).

4.1. Les facteurs conditionnant

Les principaux facteurs conditionnant les glissements de terrain sont ceux qui déterminent les conditions de stabilité ou d'instabilité du versant :

La lithologie

La lithologie est un facteur conditionnant majeur dans la stabilité du versant aussi bien par, la nature et la qualité géotechnique des matériaux, que par la structure tel que la direction et pendage des couches, plans de schistosité, etc.

La pente

La pente st 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 peut pas se produire ans les terrains plats. La prise en compte du gradient de pente des versants et des couches est d'une importance capitale.

Le relief

Par sa composante altimétrique représente aussi l'un des facteurs les plus déterminants dans la genèse des glissements de terrains.

La 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:

Peut conditionner ou déclencher un mouvement de masse au niveau des matériaux fragilisés par broyage des failles par cisaillements ou par décrochements. L'occurrence des mouvements de masse se trouve généralement accentuée à proximité des résurgences.

4.2. Les facteurs déclenchant:

Les facteurs déclenchant engendrent les mouvements par changement rapide des conditions du versant définies par les facteurs déterminants :

Les précipitations:

Les précipitations tiennent un rôle principal 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 plastique, ce qui a pour conséquence directe le déplacement de la masse sous son propre poids.

La sismicité:

Les séismes ne peuvent déclencher un mouvement de masse qu'à partir d'une magnitude critique d'activation de l'ordre de $M \approx 4$. Les sollicitations sismiques peuvent être la cause de glissements de terrain. Deux phénomènes entrent en jeu dans ce cas : La liquéfaction des limons et sables fins saturés, susceptible de provoquer le glissement des formations sus-jacentes, La force inertielle déstabilisatrice due au séisme lui-même.

Les cours d'eaux:

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.

Le couvert végétal:

Exerce essentiellement une action phytostabilisante sur les versants à substrat argileux ou à rocheux développant une couverture d'altération argileuse peu épaisse. Son absence ou sa rareté sur des versants accélère l'effet érosif du ruissellement et des précipitations ; ce qui déclenche les mouvements de masse.

5. Méthodes de calcul de la stabilité des pentes

L'analyse de la stabilité des pentes s'effectue habituellement à la rupture à l'aide de calcul en équilibre limite avec la méthode des tranches. Cette méthode donne par l'intermédiaire d'un facteur de sécurité une approximation de l'état d'équilibre de la pente étudiée par rapport à l'équilibre limite. Plusieurs méthodes de calcul de stabilité peuvent être trouvées dans littérature géoscientifique. Elles se particularisent par les hypothèses admises pour le calcul (mathématique en équilibre limite, volumique en déformation, analytiques à la rupture, etc.) et par le type de calcul (abaques, tableaux, numérique, etc.), mais toutes se mettent d'accord à décrire un facteur de sécurité décrivant l'état de la stabilité du talus étudié. Toutes ces méthodes de calculs de stabilité nécessiteront de connaître :

- les conditions géologiques : nature du faciès et/ou de la fracturation ;
- les propriétés mécaniques des terrains et/ou des discontinuités ;
- les conditions hydrodynamiques ;
- la géométrie interne et externe de la pente;
- le type du projet et la sensibilité des enjeux.

La littérature scientifique propose plusieurs méthodes d'évaluation et de prédiction des glissements de terrain. Parmi ces méthodes on trouve essentiellement :

Les méthodes volumiques

Le stade de la pré-rupture des déformations progressive et/ou complexes obéissant à un comportement élastoplastique, par fluage, ou écrouissage, le massif de sol ou de roche est continu et son comportement ne peut être analysé par des méthodes d'équilibre limite car on ne peut pas différencier une surface de rupture bien distincte. Il

est alors nécessaire de considérer des méthodes des éléments finis prenant en compte l'ensemble du volume pour analyser l'évolution des déplacements, contraintes et déformations dans l'espace et dans le temps.

Les méthodes énergétiques

Les méthodes énergétiques sont assez utilisées pour leurs formes simples et leurs résultats qui se rapprochent aux méthodes rigoureuses. L'intensité et la villosité des composantes du mouvement dépendent essentiellement de la redistribution de l'énergie potentielle devenant disponible au moment de la rupture. Pour les grandes vitesses et les grands déplacements, il faut alors considérer des approches énergétiques.

Les méthodes de calcul à la rupture

Lorsqu'une masse rigide se met en mouvement le long d'une surface de géométrie bien définie, le comportement est contrôlé par la loi de Mohr-Coulomb, qui donne la résistance au cisaillement τ_f . Dans ce cas, les méthodes dites "d'équilibre limite" sont très convenables car on peut écrire simplement les équations qui relient les différentes variables en forces, moments et propriétés; mais, sauf même pour les cas les plus simples, le nombre des variables est bien supérieur au nombre d'équations. Pour pouvoir résoudre les équations, il faut alors introduire des hypothèses supplémentaires et simplificatrices, de manière à égaliser le nombre d'inconnues et le nombre d'équations.

5.1. Notion sur le coefficient de sécurité:

Le coefficient de sécurité est utilisé dans tous les calculs à la rupture. Il permet d'apprécier la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture ($F > 1$: stable; $F = 1$: critique; $F < 1$: rupture). L'expression du coefficient de sécurité est différente selon qu'il s'agit d'un type de rupture plane, circulaire ou quelconque. Dans tous ces cas, les calculs s'opèrent en contraintes totales à court terme et/ou en contraintes effectives à long terme. Le degré de précision des calculs dépendra toutefois de la qualité de détermination des paramètres de cisaillement, et des moyens de calculs. Il existe plusieurs définitions possibles du coefficient de sécurité. La définition la plus couramment utilisée est

$$F = \frac{\text{Résistance au cisaillement maximale mobilisable}}{\text{Résistance au cisaillement nécessaire à l'équilibre}}$$

Les différentes définitions du coefficient de sécurité conduisent à des valeurs diverses pour une même géométrie, sauf dans le cas où l'on se trouve à la rupture. Parmi ces définitions les plus consensuelles on cite :

Définition de Fröhlich :

Cette définition suppose que la surface testée est circulaire (ellipsoïdale en 3D) et considère $F_s = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}}$

Définition de Bishop :

Cette définition suppose que la valeur du coefficient de sécurité est une entité ponctuelle qui dépend de la position du point considéré le long de la surface testée.

Elle est calculée par l'équation $F_s = \frac{\text{Effort résistant}}{\text{Effort moteur}}$

Définition de Fellenius:

Fellenius considère que l'équilibre du milieu est atteint lorsque le système des forces extérieures qui lui appliqué mobilise les fractions $\tan\phi/F$ et c/F des valeurs réelles du frottement et de la cohésion du milieu. Cette définition a pour inconvénient de poser que la rupture se produira simultanément en tout point, ce qui n'est pas applicable dans le cas de sols fortement hétérogène.

5.2. Méthodes classiques de calcul en équilibre limite

Les méthodes de calcul à la rupture sont des méthodes où l'analyse et le calcul se font localement sur des profils, admettant la possibilité du développement d'une surface de rupture qui sépare la masse glissée du terrain stable. Le principe de cette méthode s'oppose entièrement à celui des méthodes volumiques. Elles sont fondées sur les hypothèses que le massif en mouvement peut être décomposé en un ensemble de tranches rigides indéformables qui frottent les uns sur les autres. Le comportement de l'interface est presque toujours défini par la loi de Coulomb.

Ces méthodes de calculs à l'équilibre limite, se distinguent par une partie potentiellement mobile, séparée d'une partie fixe du massif, par une courbe de rupture définissant une rupture cinématiquement admissible. Dans ce cas :

- Le calcul d'équilibre est fait à la rupture ;
- Les équations résolvantes se font dans la statique ;
- Le coefficient de sécurité F est spatialement bien défini.

Il existe plusieurs méthodes de calcul à la rupture comme les méthodes classiques, graphiques, nomographiques, méthode des perturbations, ainsi que les méthodes en trois dimensions. Fredlund et Krahn (1977) ont entrepris une étude de comparaison en déterminant le facteur de sécurité pour différentes méthodes de calcul. L'exemple d'un talus simple a été traité avec plusieurs combinaisons de la géométrie, des propriétés du sol et des conditions piézométriques. Mis à part la méthode ordinaire de Fellenius, les écarts du calcul du facteur de sécurité, avec un même jeu de données, n'excèdent guère les 4% pour l'ensemble des méthodes utilisées (Bishop, Spencer, Janbu, Morgenstern et Price). Le facteur de sécurité F , déterminé à partir de l'équilibre des forces (comme Janbu simplifiée sans correction), est plus sensible aux hypothèses faites sur les forces de cisaillement inter-tranches que le facteur de sécurité déterminé par les moments d'équilibre. Pour cette raison, il est préférable d'utiliser une méthode d'analyse où le moment d'équilibre est satisfait

Les principales méthodes classiques de calcul de stabilité des talus sont :

5.3. Méthodes des blocs

Cas statiquement définis

Dans cette méthode l'équilibre de la masse potentiellement instable est décrit sur un plan incliné par la formule suivante:

$$F(\alpha) = \frac{c'l + W \cdot \cos\alpha \cdot \tan\phi'}{W \cdot \sin\alpha}$$

Où $(W \cdot \sin\alpha)$ est la force motrice et $(c'l + W \cdot \cos\alpha \cdot \tan\phi')$ est la force résistante obtenue par la loi de Coulomb appliquée à la réaction normale de la masse en mouvement sur le sol. On retient la ligne de rupture définie par la variable (α) qui minimise le coefficient F . L'inconvénient de cette formule est qu'elle surévalue le coefficient de sécurité. Et ce car, les simplifications divergent le résultat de la réalité. On traite alors un mécanisme plus résistant que le mécanisme réel, qui correspond à une valeur minimale. Une analyse critique du résultat peut conduire à son rejet, si cette surface de rupture est incompatible avec la structure géologique du terrain.

Ce principe d'équilibre, illustré par ce cas simple (Fig. III-10), est à la base de toutes les méthodes de calcul à la rupture. Il est développé avec toutes les hypothèses simplificatrices nécessaires pour modéliser le cas réel et le réduire à un ensemble d'équations que l'on peut résoudre. La description des autres méthodes consiste à préciser les hypothèses choisies et le mode de résolution utilisé.

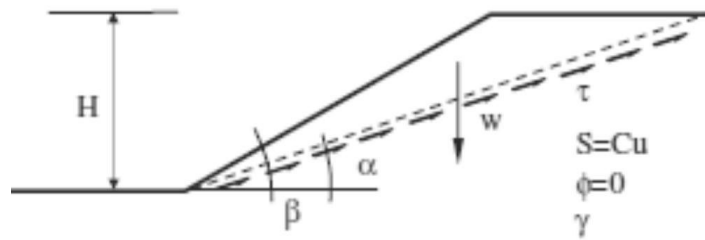


Figure III-10 : Schéma de rupture plane.

Cas statiquement indéfinis

Une bonne façon d’aborder le problème consiste à faire l’inventaire des inconnues. Parmi les méthodes à multi blocs on rencontre :

5.3.1. Méthodes des tranches

Le découpage de la masse glissée en tranches verticales (Fig. III-11) a permis le développement d’un très grand nombre de méthodes. Ces méthodes issues de l’analyse de l’équilibre d’une tranche, le dénombrement des inconnues et des équations du problème permet de comparer facilement les méthodes.

Par tranche, il y a les forces intertranches situées à droite et à gauche (deux forces et leurs points de passage, soit $6n$ inconnues, a ce n le nombre des tranches), les forces à la base $2n$ inconnues, et le coefficient de sécurité qui est pris constant le long de la courbe de rupture, ce qui fait au total $8n+1$ inconnues. Le principe d’action et de réaction entre tranches fournit $3(n-1)$ équations, l’équilibre de chaque tranche $3n$ équations ; on a aussi n équations de type Coulomb à la base des tranches et les 6 équations correspondant à des forces nulles aux extrémités du glissement, ce qui fait au total $7n+3$ équations. Il manque $(n-2)$ équations pour résoudre. Le choix de ces $(n-2)$ équations différencie les méthodes.

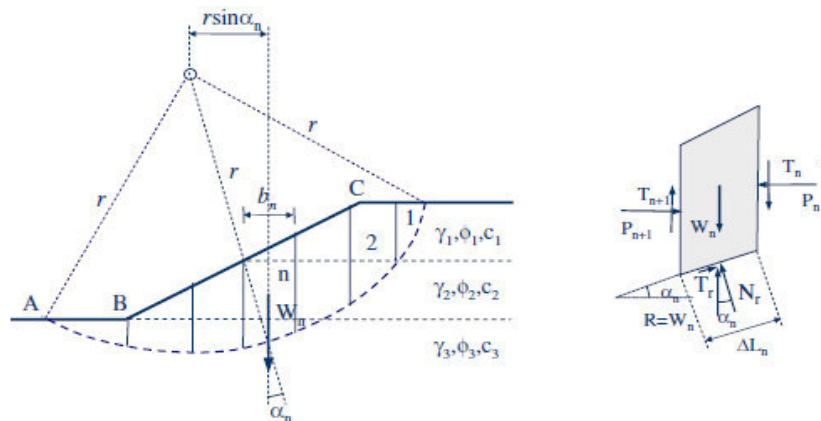


Figure III-11 : Les forces d’une méthode des tranches.

Il existe plusieurs méthodes des tranches, parmi les plus utilisées, sont :

La méthode Suedoise

La méthode de Fellinuis néglige les forces qui existent entre les tranches, elle consiste à admettre que, la résultante de E_i et X_i est égale à E_{i+1} et X_{i+1} avec une ligne d'action qui coïncide. Cette résultante parallèle à la base de la tranche. Quand les tranches adjacentes ont différentes inclinaison de la base, cette hypothèse simplificatrice conduit à des erreurs. La méthode satisfait l'équilibre des moments, et le coefficient de sécurité a la forme suivante:

$$F = \frac{\sum(c'l + [W\cos\alpha - ul]\tan\phi')}{\sum W\sin\alpha}$$

Méthode de Bishop

La méthode de Bishop ne néglige pas les forces inter-tranches horizontales, dans sa méthode simplifiée la résultante verticale des forces inter-tranches est nulle, d'où : $X_i = X_{i+1}$ mais $E_i \neq E_{i+1}$ (Fig. III-12).

Cette méthode satisfait, l'équilibre des forces verticales de chaque tranche ainsi que l'équilibre des moments par rapport au centre du cercle de rupture.

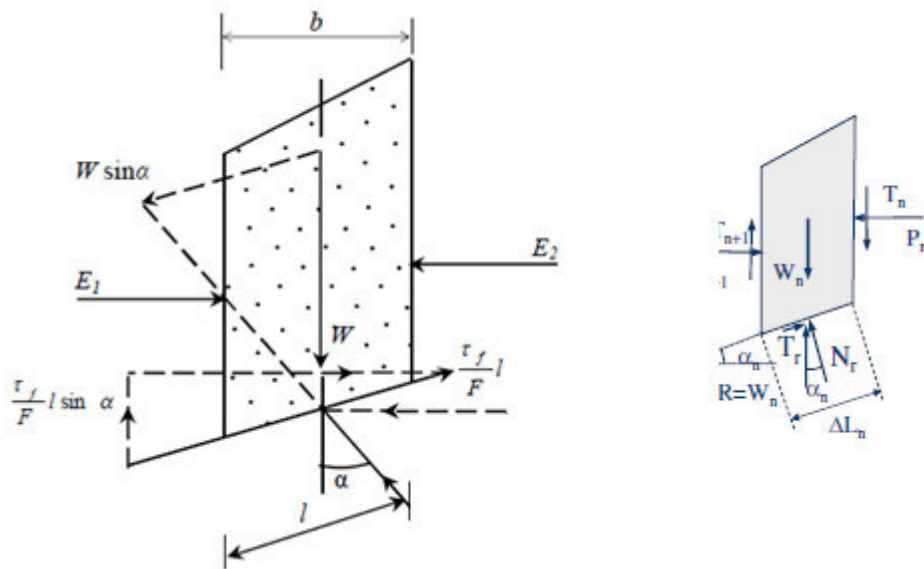


Figure III-12 : Les forces appliqués sur la tranche.

l'équation de la méthode de Bishop est formulée comme suit:

L'équilibre le long de la base de la tranche :

$$0 = W\sin\alpha - \frac{\tau_f l}{F} = W\sin\alpha - \frac{c'l + N\tan\phi}{F}$$

L'équilibre dans la direction verticale :

$$0 = W - N' \cos \alpha - ul \cos \alpha - \frac{c'}{F} l \sin \alpha - \frac{N' \tan \phi'}{F} \sin \alpha$$

$$l = b \sec \alpha$$

Après substitution de, l et N' par leurs valeurs dans l'équation, on trouve une équation de coefficient de sécurité non linéaire :

$$F = \frac{1}{\sum W \sin \alpha} \sum \frac{[c' b + (W - ub) \tan \phi'] \sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}}$$

Ces méthodes non linéaires nécessitent un processus itératif. La programmation à l'aide d'un ordinateur permet de trouver une solution rapide après seulement quelques cycles. En supposant tout d'abord que $F=1$ à droite, et en calculant ensuite la valeur de gauche. Cette dernière valeur de F est comparée à la valeur proposée, s'il n'est pas suffisamment proche, le coefficient F calculé est utilisé dans la prochaine itération et ainsi de suite. Il existe une autre version rigoureuse pour Bishop qui justifiée toutes les équations d'équilibre mais, l'écart entre la version rigoureuse et la version simplifiée n'étant que de 1%.

Méthode de Janbu simplifiée

La méthode de Jumbu simplifiée assume que les forces inter-tranches sont horizontales, ce qui sous-estime le coefficient de sécurité.

Dans cette méthode les forces verticales inter-tranches sont supposées nulles. Le facteur de sécurité est calculé à partir d'équilibre des forces horizontales, puis un facteur de correction empirique est multiplié par ce coefficient de sécurité pour pallier au manque de l'effet des forces verticales inter-tranches. L'équilibre des moments n'est pas satisfait. L'approche de Janbu pour un cas simple pose que la surface de rupture est assumée être un cercle. D'où un paramètre appelé le nombre de stabilité N_s est introduit

$$N_s = \frac{\gamma H}{c_{requis}}$$

et il regroupe les facteurs affectant la stabilité des pentes

Si la valeur de ϕ est nulle, l'abaque de Junbu (Fig. III-13) doit être utilisée. À partir de la valeur de β (abscisse) et de $n d$ on détermine la valeur de N_s . Lorsque $\beta > 53^\circ$, la surface de glissement est un cercle de pied. Lorsque $nd > 4$, la surface de glissement est toujours un cercle de mi-pente. La valeur de N_s obtenue avec l'abaque correspond à un

facteur de sécurité de 1. Si on désire déterminer le facteur de sécurité, on utilise la

relation :
$$F.S = \frac{N_s c}{\gamma H}$$

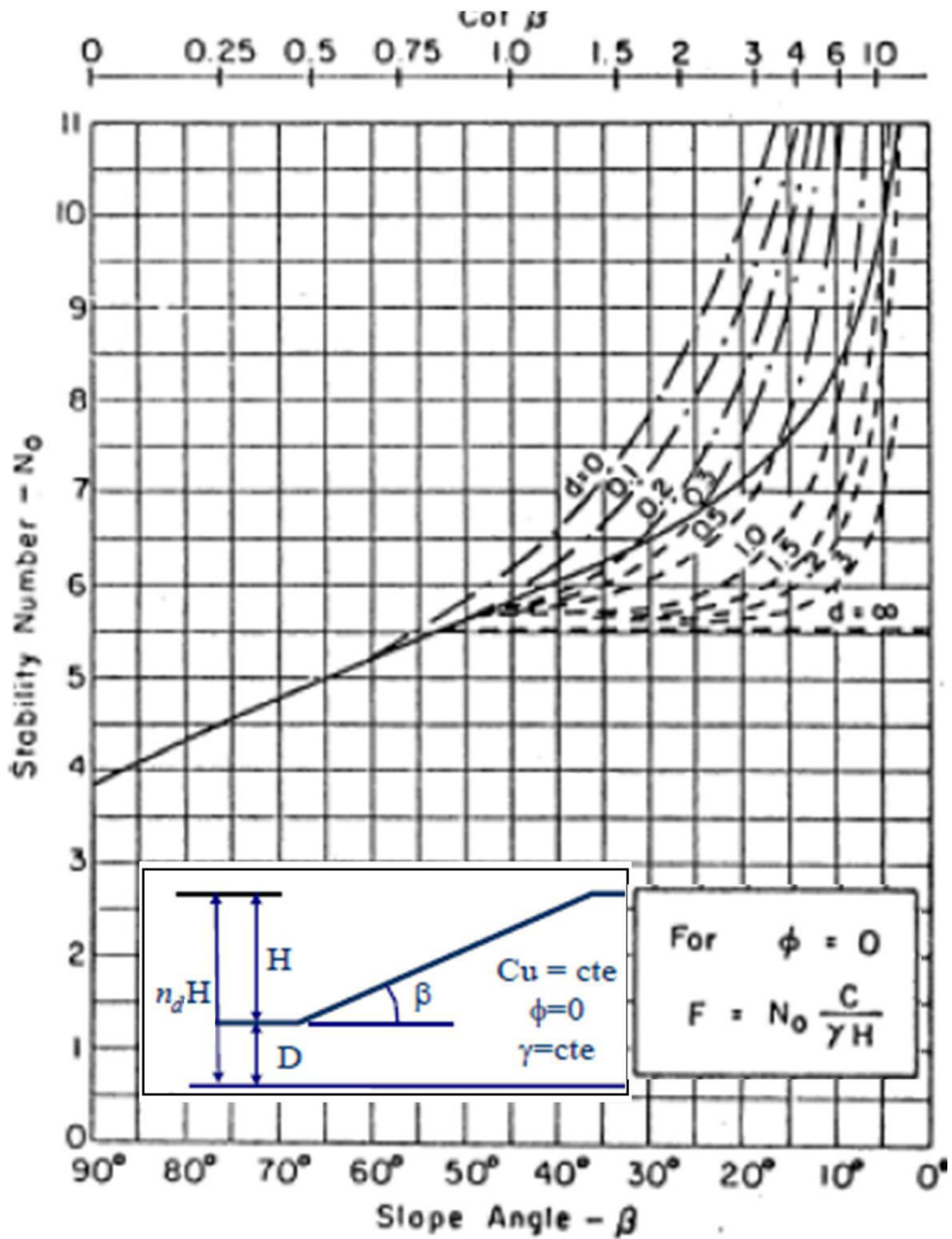


Figure III-13: Abaque de Junbu simplifié

Méthode de Morgenstern et Price

La méthode de Morgenstern et Price définit une fonction donnant l'inclinaison des efforts inter-tranches, cette méthode introduit une fonction mathématique arbitraire pour représenter la variation de la direction des forces entre les tranches :

$$\tan\theta_i = X/E = \lambda \cdot f(x'_i)$$

Où : θ_i est l'angle formé par la résultante et l'horizontale, il varie systématiquement d'une tranche à une autre le long de la surface de glissement ; λ est une constante qui doit être évaluée pour le calcul du facteur de sécurité ;

$f(x'_i)$ est la fonction de variation par rapport à la distance le long de la surface de glissement.

x'_i est la normalisation linéaire des coordonnées x_i , avec les valeurs des deux bouts de la surface de rupture égales à zéro et π .

Cette méthode satisfait toutes les conditions d'équilibre statique pour chaque tranche, ainsi que l'équilibre des moments et l'équilibre des forces dans la direction horizontale, pour l'ensemble de la masse qui glisse suivant une surface de rupture circulaire ou non circulaire. La figure (III-14) représente les forces sur une tranche.

En assurant l'équilibre des forces de chaque tranche, la résultante (Q_i) des forces inter-tranches (Z_i, Z_{i+1}), inclinées d'un angle θ_i par rapport à l'horizontal est :

$$Q_i = \frac{\frac{c' \cdot b \cdot \sec\alpha}{F} + \frac{\tan\phi'}{F} (W \cdot \cos\alpha - W \cdot a_v \cdot \cos\alpha - W \cdot a_h \cdot \sin\alpha - u \cdot b \cdot \sec\alpha + q_c \cdot b \cdot \cos\alpha) - W \cdot \sin\alpha + W \cdot a_v \cdot \sin\alpha - W \cdot a_h \cdot \cos\alpha - q_c \cdot b \cdot \sin\alpha}{\cos(\alpha - \theta_i) \cdot (1 + \tan(\alpha - \theta_i) \cdot \frac{\tan\phi'}{F})}$$

L'équilibre des moments dans chaque tranche est pris par rapport au point E défini sur la figure, il permet de trouver le point d'application de la résultante :

$$\sum M = Q \cdot \cos\theta_i \cdot h_Q - W \cdot a_h \cdot h_G = 0$$

L'ordonnée du point d'application de la résultante Q_i par rapport à l'axe global devient :

$$Y_{qi} = Y_{ei} + h_Q$$

L'équilibre des forces de toute la masse glissée, donne :

$$\sum(Q_i \cdot \cos\theta_i) = 0 \qquad \sum(Q_i \cdot \sin\theta_i) = 0$$

L'équilibre global des moments par rapport à l'origine ($x=0$; $y=0$) :

$$\sum M = \sum(Q_i \cdot \cos\theta_i \cdot Y_{qi} + Q_i \cdot \sin\theta_i \cdot X_{qi}) = 0$$

Pour trouver les deux inconnues, F et λ , on résout les équations précédentes. Et on assure la théorie algébrique suivante :

$$|\sum M| + |\sum(Q_i \cdot \cos\theta_i)| = |\sum(Q_i \cdot \cos\theta_i \cdot Y_{qi} + Q_i \cdot \sin\theta_i \cdot X_{qi})| + |\sum(Q_i \cdot \cos\theta_i)| = 0$$

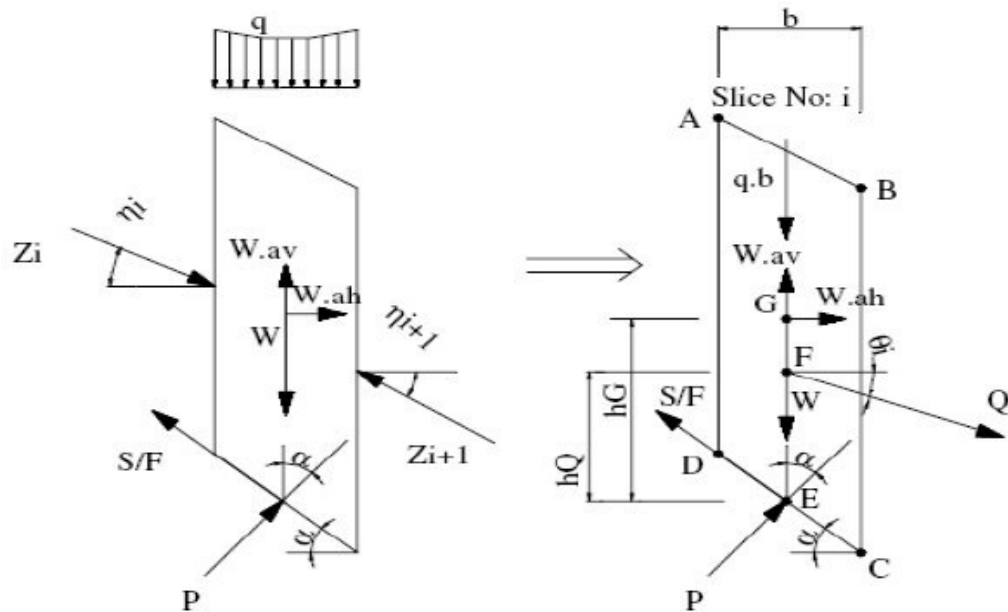


Figure III-14 : Forces sur une tranche selon la méthode Morgenstern et Price.

6. Risque glissement de terrain

On classe souvent les catastrophes naturelles en météoriques (cyclones, crues, sécheresses, etc.) et telluriques (séismes, volcans, mouvements de terrains, etc.), mais comme la plupart des glissements de terrains accompagnent des précipitations exceptionnelles, l'Organisation météorologique mondiale les associe à la première catégorie. Quoique nombre de victimes des glissements de terrain est nettement inférieur de celui des inondations et des séismes, celui-ci n'est pas négligeable car les événements recensés ne représentent qu'une fraction des glissements survenus, et un grand nombre d'entre eux ne produisent heureusement que des dégâts matériels. L'événement le plus meurtrier connu reste celui de l'écroulement du mont Huascarán (Pérou), en 1970, qui a détruit les villes de Yungay (20000 victimes) et de Ranratura (3000 victimes) (Erismann, 1979). La coulée de boue qui suivit l'éruption du Nevado del Ruiz en Colombie, en 1985, engloutit quant à elle une grande partie de la ville d'Armero et 22 000 de ses habitants (Pierson et al. 1990). En Algérie, l'écroulement d'Aokas (2015) a fait 7 innocentes victimes (Hadji et al. 2017). Malgré cette catastrophe, une cartographie thématique reste toujours absente pour aider les décideurs à lutter contre ce phénomène. Les travaux de protection et de réparation des routes et des voies ferrées, au fil des années coute souvent plus cher que la route elle même. Le relief, le climat, le contexte géologique, la densité de population et la maîtrise technique expliquent l'inégalité entre régions de faire face à ce risque.

6.1. Le concept de risque

Le terme de risque recouvre une dualité fondamentale réunissant deux notions indépendantes, celle de perte et celle de probabilité d'occurrence. Cette probabilité traduit les chances qu'un phénomène se manifeste. Si on arrive à quantifier les deux notions de perte et de probabilité d'occurrence pendant une période donnée, on peut alors exprimer le risque comme le produit des deux, ce qui correspond à la définition de l'espérance mathématique. Le risque se traduit comme l'espérance mathématique des dommages. En supposant un élément exposé donné, le risque encouru par cet élément peut être appelé Risque spécifique (R_s) par opposition au Risque global (R_g) encouru par une communauté donnée constituée d'un ensemble de ces éléments exposés.

Notion de risque spécifique :

On propose la définition du risque spécifique suivante qui peut se définir comme l'espérance mathématique de l'endommagement d'un élément exposé donné :

$$R_s = fct (P_o, P_a, P_b) * D$$

Avec : R_s : risque spécifique;

P_o : probabilité d'occurrence de phénomène;

P_a : probabilité pour que le phénomène touche l'élément exposé;

P_b : probabilité pour que l'élément exposé soit présent au moment de l'accident;

D : niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé si le phénomène l'atteint.

La mesure de ce risque spécifique à établir pour une période de retour donnée, s'effectue sur une échelle de valeur comprises entre 0 et 100% valable aussi pour chacune de ces composantes. La valeur 0 correspond à un risque nul, et la valeur 100% correspond à un risque total (Fig. III-15).

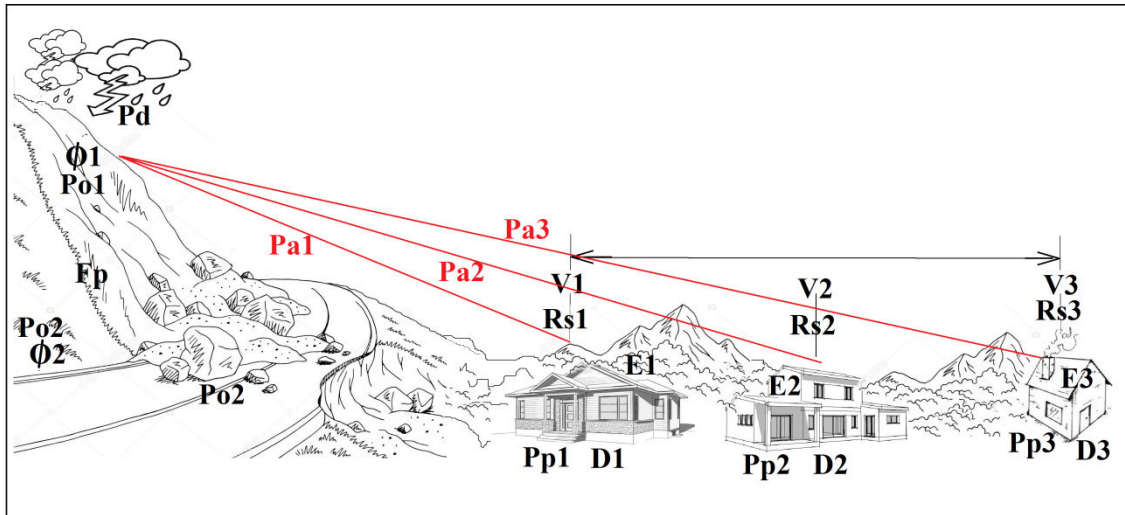


Figure III-15: Illustration de différentes composantes entrant dans la définition analytique de risque : Application au cas des phénomènes des mouvements de terrain. Avec E : élément exposé. Φ : phénomène d'intensité donnée. R_s : risque spécifique. R_g : risque global encouru. P_d : probabilité d'occurrence d'un facteur déclenchant. F_p : facteur permanent. P_o : probabilité d'occurrence de phénomène. P_a : probabilité d'atteinte de l'élément exposé par le phénomène. P_p : probabilité de présence de l'élément exposé. D : niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé. V : valeur initiale de l'élément exposé.

Notion de risque global:

Le risque global encouru par la communauté exposé se calcul avec la somme des risques spécifiques des différents éléments composant cette communauté, mais après l'évaluation des niveaux d'endommagement de chacun des éléments exposés.

Cette évaluation tient compte des valeurs initiales avant endommagement potentiel, de l'élément exposé. Le risque global encouru correspond ainsi à une quantification structurelle, corporelle, ou fonctionnelle des dommages potentiels.

L'expression mathématique du risque global est traduite par l'équation:

$$R_g = \sum R_s * V_i$$

Avec : R_g : risque global encouru par la communauté exposé;

R_s : risque spécifique encouru par chacun élément exposé, de cette communauté;

V_i : valeur unitaire de l'élément exposé.

Les pertes encourues peuvent être exprimées soit en valeur absolue de coûts ou les préjudices humains, soit en valeur relative par rapport à un capital de valeurs

initiales correspondant à différents éléments exposés. Pour la communauté exposée, le type de valeur correspond aux enjeux (Fig. III-16).

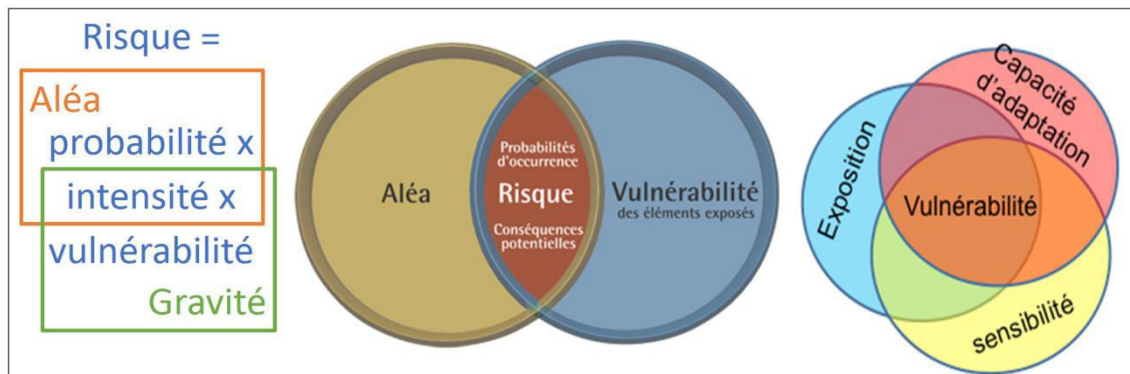


Figure III-16: Combinaison de Risque Aléa et Vulnérabilité.

6.2. Analyse spatiale du risque glissement de terrain

Parmi les méthodes qui ont prouvées leur efficacité pour l'estimation et la cartographie du risque glissement de terrain on note celles basées sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Toutes les méthodes se mettent d'accord sur une résolution à 3 étapes :

- L'estimation et la cartographie de la susceptibilité aux phénomènes glissement de terrain, par l'utilisation d'un modèle soit heuristique, soit statistique soit déterministe. pour définir le rôle de chaque facteur impliqué dans l'occurrence spatiale et temporelle des glissements de terrain.
- L'estimation et la cartographie des conséquences des échecs des pentes sur les éléments exposés et l'analyse de leurs dommages possibles. Cela est estimé à l'aide d'un modèle empirique combinant plusieurs critères de description des enjeux.
- L'estimation et la cartographie du risque total glissement de terrain par la combinaison des cartes de susceptibilité et des cartes de conséquences (Fig. III-17).

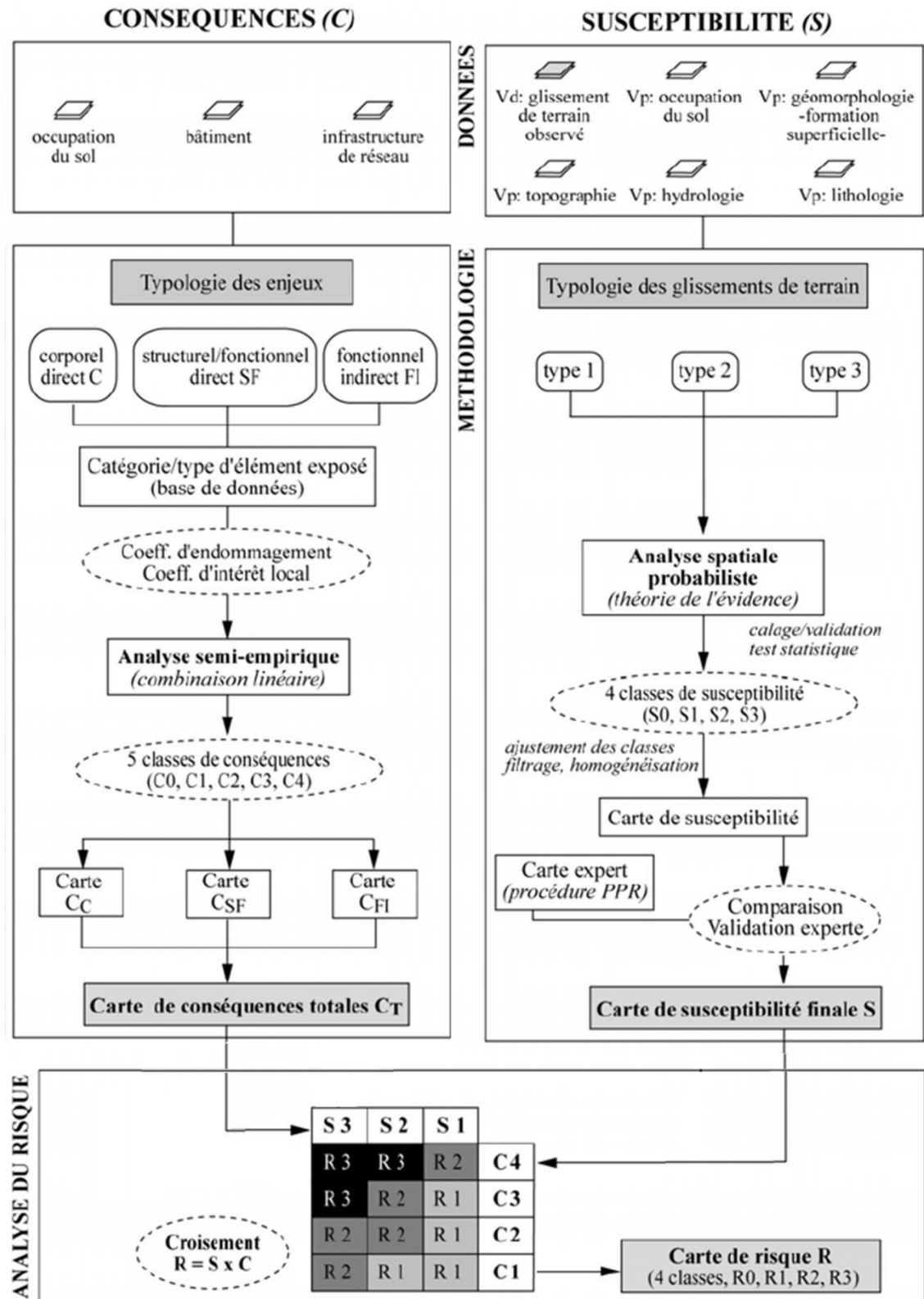


Figure III-17 : Organigramme méthodologique expliquant la cartographie de risque glissement de terrain.

6.3. Approche pour l'analyse du risque glissement de terrain :

Le risque glissement de terrain est défini comme le croisement de la susceptibilité de terrain aux conséquences du phénomène par les enjeux (Leone et al. 1996; Abdelouahad et al. 2017).

L'analyse de la vulnérabilité

La méthode d'analyse de la vulnérabilité, dépend de l'objectif de l'étude et de la quantité et la qualité des données disponibles pour l'étude. Les différentes méthodes se mettent d'accord sur la bonne identification et l'évaluation des éléments exposés. Trois méthodes peuvent ainsi être retenues :

- Une approche qualitative experte, basée sur l'identification et la catégorisation des principaux enjeux dans une zone sensible donnée;
- Une approche semi-quantitative basée sur l'estimation de la valeur de l'élément exposé. Dans ce cas, une valeur individuelle ou globale est affectée à un type d'élément spécifique (MATE/METL, 1999; Bonnard et al., 2004).
- Une approche quantitative, basée sur le calcul de la valeur des éléments exposés. La vulnérabilité est déterminée soit par des coefficients d'endommagement, soit par des fonctions d'endommagement (Léone et al, 1996).

L'analyse de la susceptibilité :

La susceptibilité est définie comme étant la probabilité spatiale qu'un glissement de terrain se produise sur un territoire donné pour différentes conditions environnementales locales. Les techniques d'analyses spatiales (Guzzeti et al, 1999 ; Van Westen, 2004; Achour et al. 2017) permettent d'identifier des zones susceptibles selon deux approches distinctes :

- Une approche directe et qualitative fondée sur une connaissance experte et intuitive de la relation entre les glissements de terrain observés et différents facteurs de prédisposition.
- Une approche indirecte, généralisable et reproductible, fondée sur des modèles statistiques d'analyse spatiale. Le concept fondamental de ces modèles est d'étudier le comportement d'une variable dépendante (localisation des glissements de terrain) à partir d'une combinaison de variable prédictive indépendante pour des unités

géomorphologiques homogènes. Des modèles d'analyses bi variée (IV, FR) ou multi variée (LR) peuvent être utilisés (Carrara et al, 1995).

6.3.1. Le concept de la vulnérabilité :

On peut trouver plusieurs définitions de la notion vulnérabilité comme « la vulnérabilité est un système articulé autour d'un nombre élevé de variables, dont la dynamique dans le temps et dans l'espace peut engendrer des situations plus ou moins dangereuses pour les éléments exposés». La définition la plus acceptée par la communauté géoscientifique pour définir cette notion est « La propension variable d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique » (D'Ercole 1994). La démarche la plus adoptée pour étudier la vulnérabilité s'articule sur l'analyse des facteurs qui contribuent à son existence, suivant une approche directe qualitative. Les facteurs retenus pour déterminer la vulnérabilité d'une société donnée face à un phénomène naturel donné, sont :

- Le facteur institutionnel et administratif;
- Les facteurs sociologiques et comportementaux;
- Les facteurs économiques;
- Le facteur démographique;
- Le facteur technique.

La définition la plus appropriée pour définir cette vulnérabilité technique, est une « Grandeur pouvant être évalué par le niveau d'endommagement constaté ou potentiel d'un élément exposé donné, soumis à l'action d'un phénomène déclaré ou pressenti, d'intensité donnée». Le niveau est mesuré par le taux d'endommagement compris entre 0 et 100%, un dommage nul donnant la valeur 0 et un dommage total la valeur 100% en se basant sur trois notions :

- Élément exposé;
- Interaction entre phénomène et élément exposé;
- Niveau d'endommagement potentiel de l'élément exposé.

6.3.2. Types de vulnérabilités :

Deux types de la vulnérabilité peuvent être analysés:

La vulnérabilité directe :

La vulnérabilité directe est définie à partir des constructions dans un territoire donnée, en terme spatial et fonctionnel à usage d'habitation, établissement public, elle doit aussi être décrite en terme de densité et de type d'occupation.

La vulnérabilité indirecte :

La vulnérabilité indirecte évalue l'importance de la mobilité sur les réseaux de communication dans le fonctionnement d'un territoire, (Manche, 2002).

6.3.3. Les éléments de la vulnérabilité :

Il existe trois groupes d'éléments exposés susceptible d'être endommagés qui sont les biens physiques, les personnes et leur fonction. A chacune correspond une fonction d'endommagement caractéristique:

La fonction d'endommagement corporel :

Concerne l'endommagement des individus : elle est fonction de l'intensité du phénomène et de facteurs de sensibilité intrinsèque et extrinsèque.

La fonction d'endommagement structurel :

Concerne l'endommagement des biens matériels : et est fonction de l'intensité d'un phénomène donné et de la sensibilité de ce bien.

La fonction d'endommagement fonctionnel :

Concerne le dérangement des activités et les fonctions humaines, et dépend du niveau d'endommagement des biens et des personnes et des fonctions. La cartographie du risque glissement de terrain peut se résumer dans la figure (III-18).

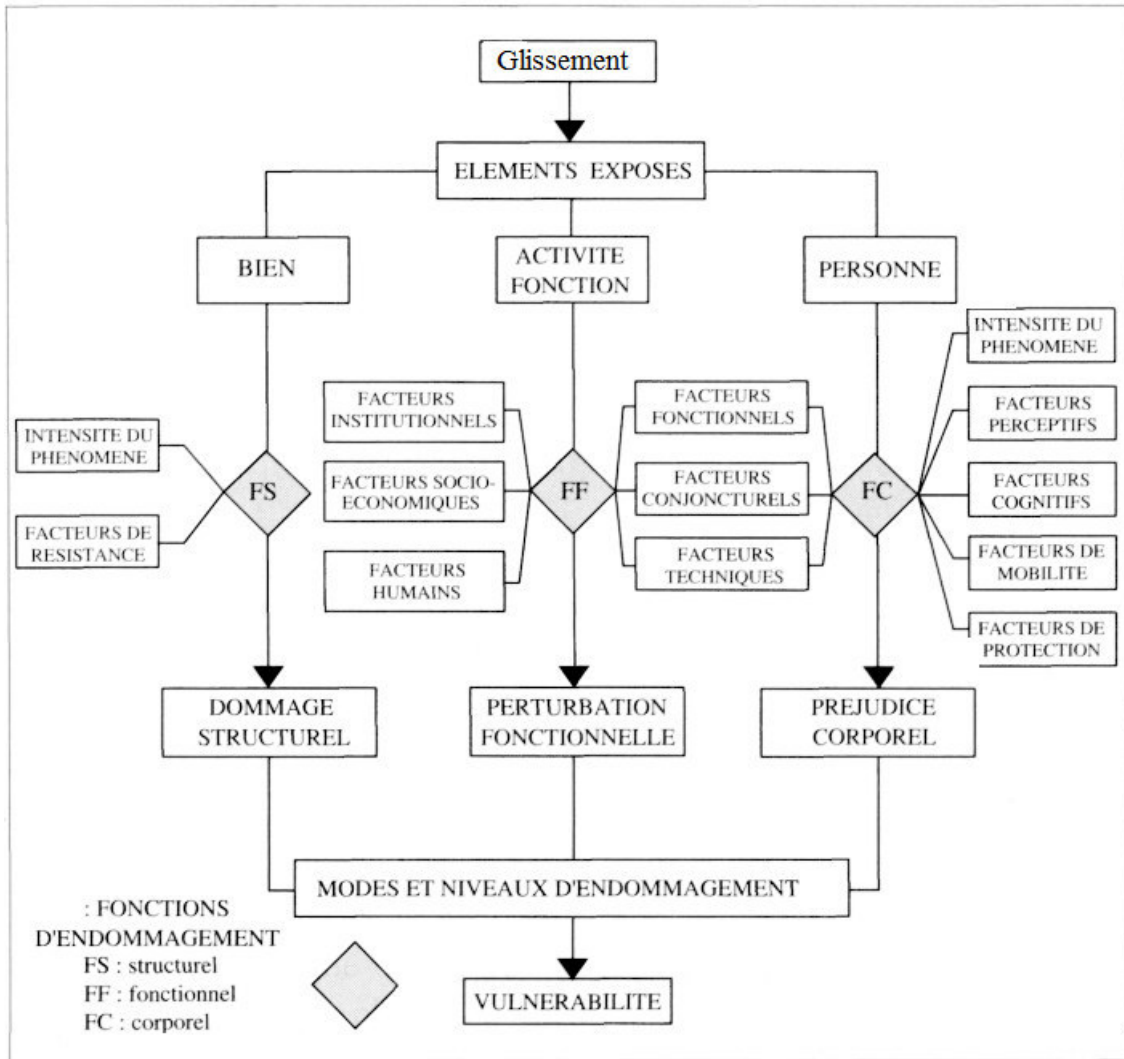


Figure III-18 : Les composants de la vulnérabilité (Leone et al. 1996).

7. Conclusion

La possibilité d'apparition d'un glissement peut être estimée par l'analyse de la variation du facteur de sécurité en fonction de la forme et de la position de la surface possible de glissement. Les méthodes qui considèrent l'équilibre limite, admettant la formation d'une surface de rupture dans le massif et opérant par la division du massif qui glisse dans des tranches verticales. Ses méthodes les plus utilisées, grâce à leur capacité de prendre en considération des variétés géométriques et des conditions complexes de stratification et de chargement. Il existe des dizaines de méthodes de calcul de stabilité ayant toutes des avantages et des inconvénients. L'évaluation de la susceptibilité, vulnérabilité et risque aux mouvements de terrain demeure une opération difficile. Cela tient à la fois de la complexité des phénomènes impliqués et du manque de bilan d'analyse en retour d'évènement passés. Les technologies SIG ont ouvert de nouvelles perspectives très prometteuses pour l'étude spatiales du phénomène.

CHAPITRE IV

CARTOGRAPHIE DE RISQUE GLISSEMENT DE TERRAIN

1. Introduction

Les mouvements de terrains sont des phénomènes naturels d'origines très diverses. Annuellement, ils provoquent la mort d'environ mille personnes, dans le monde. Ils ont aussi un impact économique en causant parfois des dégâts très sérieux. Dans le nord Algérien d'importants dommages sont constamment enregistrés (Hadji et al. 2017). Les dégâts portent essentiellement atteinte à l'économie, et nécessitent constamment la réhabilitation des routes et le relogement des sans abris. On se trouve chaque fois en train de remédier aux mêmes instabilités surtout après les fortes précipitations. Cette situation est devenue un véritable handicap à l'aboutissement de n'importe quel plan de développement dans cette région.

Les mouvements de terrain sont des déplacements de masses rocheuses compactes ou désagrégées, et/ou de terrain meuble (c'est-à-dire ce qu'il y a sous les roches, le sol compris) ainsi que de l'eau. C'est un ensemble de déplacements plus ou moins brutaux d'origine naturelle ou anthropique. Ces glissements se font vers l'aval sous l'effet de la gravité. Ils résultent de l'association de conditions topographiques, climatiques, et géologiques, favorables à leur genèse (Gadri et al. 2015; Achour et al. 2017). Faisant partie de cet environnement, notre zone d'étude souffre de la récurrence des glissements de terrain de tout type. La perception du risque mouvements de terrain est aggravé par le manque total d'une cartographie règlementaire pour l'estimation de la l'aléa et de la susceptibilité du phénomène. Cette problématique est intéressante vu le volume des pertes enregistrées chaque année et, justifie raisonnablement son étude.

A l'aide des technologies spatiales et des systèmes d'information, une base de donnée cartographique bien étoffée en divers types et extensions de fichiers tel que les cartes géologiques et topographiques, un model numérique de terrain, des photos satellitaires, données climatiques, données de positionnement et d'un inventaire explicite des événements passés qui se sont produit dans la zone d'étude. Cette base de données est composée de couches d'information à référence spatiale (Layers) indispensables pour le déroulement de notre étude.

Le choix de la méthode d'investigation dépend de plusieurs paramètres tel que : l'échelle de travail, les caractéristiques physiques du terrain, la disponibilité des données, le cadre administratif de gestion, et le fond cartographique existant, etc. Elles se divisent entre les méthodes directes (type qualitatif) et indirectes (type quantitatif), (Grozavu et al. 2013; Karim 2018). Pour le premier type, l'estimation de la susceptibilité des terrains aux mouvements de pente se fait directement par un zonage qualitatif sur le terrain, pour le second, l'estimation se fait par une affectation quantitative de niveaux hiérarchiques de susceptibilité, (Regmi et al. 2014).

L'approche adoptée par notre recherche se base sur un modèle probabiliste ; définissant statistiquement la relation superposée entre les glissements de terrain et leurs variables prédictifs, (Anbalagan et al. 1992). Cette modélisation permet une évaluation raisonnable des menaces encourues par la zone d'étude à l'aide de cartes thématiques d'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain. La lecture de tels documents permet le repérage des zones potentiellement instables, nécessitant un traitement particulier lors des opérations d'aménagement de territoire.

2. Notions de risque, d'Aléa et de vulnérabilité

Le risque glissement de terrain est défini comme étant : « la probabilité d'occurrence d'un événement spécifique menaçant un élément à risque, sans tenir compte des conséquences potentielles » (Vandine et al. 2004). Le risque cartographique est la croisée d'un phénomène naturel dommageable et d'enjeux présentant une certaine vulnérabilité : Risque = aléa × vulnérabilité (CERG, 2000).

La notion d'aléa traduit la probabilité d'occurrence spatiale et temporelle, d'un phénomène de nature et d'intensité définie. La probabilité d'occurrence spatiale de l'aléa, dépend des caractéristiques physiques de terrain, (Hansen, 1984). La probabilité d'occurrence temporelle, est la possibilité de chaque zone élémentaire de subir l'impact du phénomène étudié dans une période de temps fixée.

La cartographie de la vulnérabilité identifie, caractérise et hiérarchise des thèmes susceptibles de subir des dommages corporels structurels ou fonctionnels au sein d'un territoire (D'Ercole et Metzger, 2009).

3. Caractéristiques de la zone d'étude

La zone concernée par l'étude, occupe la partie centrale de la wilaya de Souk Ahras. Elle se situe entre les latitudes $36^{\circ}06'04,97''$ à $36^{\circ}19'26,69''$ N et les longitudes $07^{\circ}51'11,38''$ à $8^{\circ}04'19,52''$ E. Elle englobe les communes de Souk Ahras et Zaarouria et se répartie sur une surface totale de $206,146 \text{ km}^2$ (Fig. IV-1). Elle est limitée au Nord par les communes d'El Machroha et Ouled Driss, à l'Est par Ouilen et Mrahna, à l'Ouest par Hanancha et Tifech et, au Sud par Dréa et Taoura. Elle réunit une population résidentielle estimée à 166493 hab. (ONS, 2008). Elle est caractérisée par une forte dynamique démographique et agricole et présente le pôle de développement futur de la wilaya.

Son couvert végétal est principalement à base de pin d'Alep, Cyprès et Eucalyptus. Les cultures des céréales sont localisées sur les formations marneuses. Sur les affleurements des calcaires fracturés, les sous-bois, pinèdes, et maquis dominant. Les zones caillouteuses et les encroûtements sont couverts une végétation de type steppique.

Le climat est semi-aride avec un été chaud et sec et un hiver froid et humide. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de $840,74 \text{ mm}$ par an (Fehdi, 2008).

Géomorphologiquement, la zone d'étude présente une allure d'une dépression ouverte vers l'Est. Ses altitudes varient entre 480 m (dans le lit de l'oued Medjerda) et 1090 m (dans le Djebel Chouga). Le relief se caractérise, par une altitude qui diminue régulièrement du SW vers le NE. Une dissymétrie du relief apparaît transversalement avec une pente NW. Deux directions structurales majeures caractérisent la région ; une direction atlasique NE-SW et l'autre liée de la tectonique Miocène, d'orientation NW-SE à WNW-ESE.

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est bien développé. Il est représenté par des petits cours d'eau temporaires bien élaborés aux flancs des versants, s'épandant au large les vallées, dont le plus important oued est le Medjerda. Le model topographique montre deux directions d'écoulement: une vers l'Ouest de suivant la direction topographique des flancs des montagnes et l'autre vers l'Est suivant le plongement géométrique.

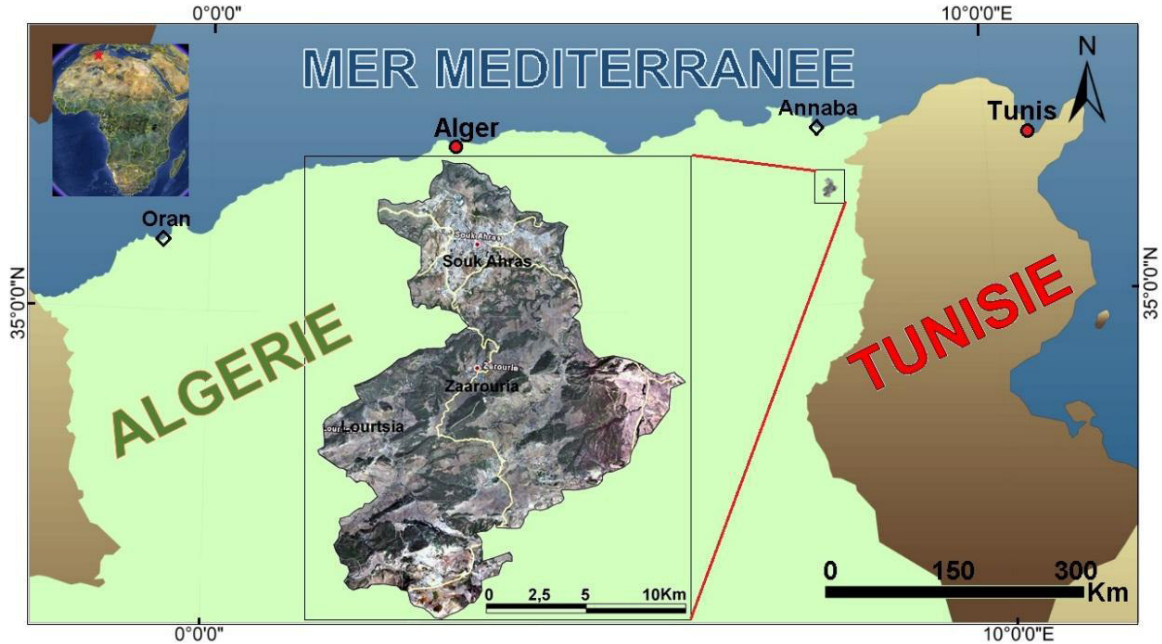


Figure IV-1 : Situation géographique de la zone d'étude.

4. Acquisition des données

Le SIG de notre zone d'étude est constitué de plusieurs couches d'information à référence spatiale (WGS 84 UTM 32N). Ces couches interprètent les facteurs causatifs jugés responsables de la préparation ou du déclenchement des ruptures de pentes. Elles sont utilisées en fonction de critères spécifiques, pour définir un modèle booléen permettant le mappage des cartes d'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain.

4.1. Model numérique de terrain

Un TIN (*Triangulated Irregular Network*) de la zone d'étude a été créé à partir de l'interpolation des valeurs d'altitude d'un échantillon de points (tableau de plus de 1000 mesures GPS) et des courbes de niveau (polylines) vectorisés à partir des cartes topo de Souk Ahras, M'daourouch et Taoura (1 : 25000) (Fig. IV-2). Un MNT (modèle numérique de terrain 5x5m) a été dérivé à partir de ce TIN et, a été le sujet de divers traitements (*filling, resampling, etc.*) pour améliorer sa qualité. Il comporte 3644 colonnes et 4564 rangers, (Fig. IV-3). La carte du réseau hydrographique a été automatiquement générée à partir du MNT en exploitant le module ArcHydroTools 9/ arcMap. Le réseau hydrographique a été intégré dans la modélisation en adoptant des buffers de : <50m, de

50 à 100m et >100m autour des oueds. L'MNT a servi également à générer les paramètres morpho-métriques de terrain.

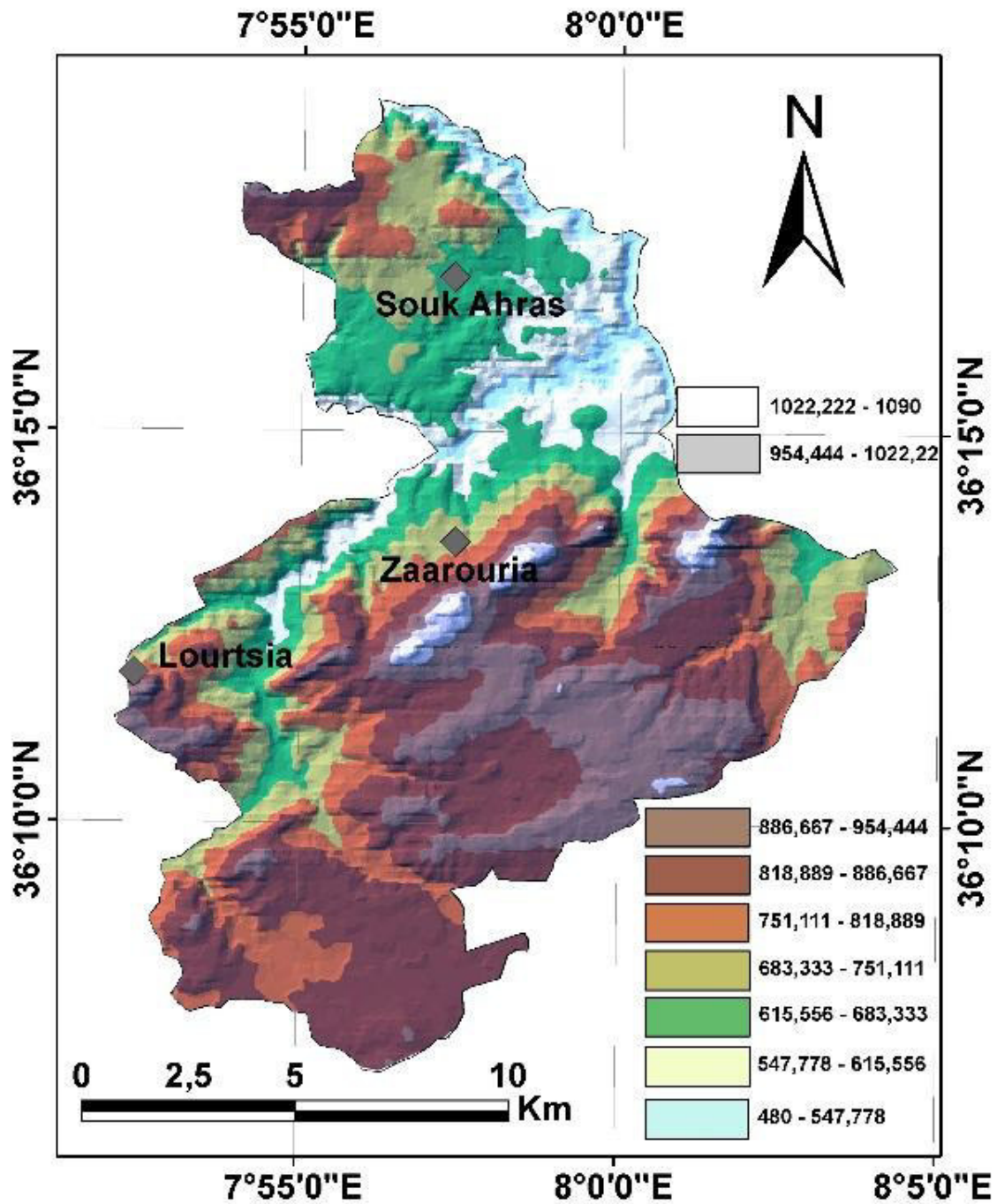


Figure IV-2: Le « Triangulated Irregular Network » (TIN) de la zone d'étude.

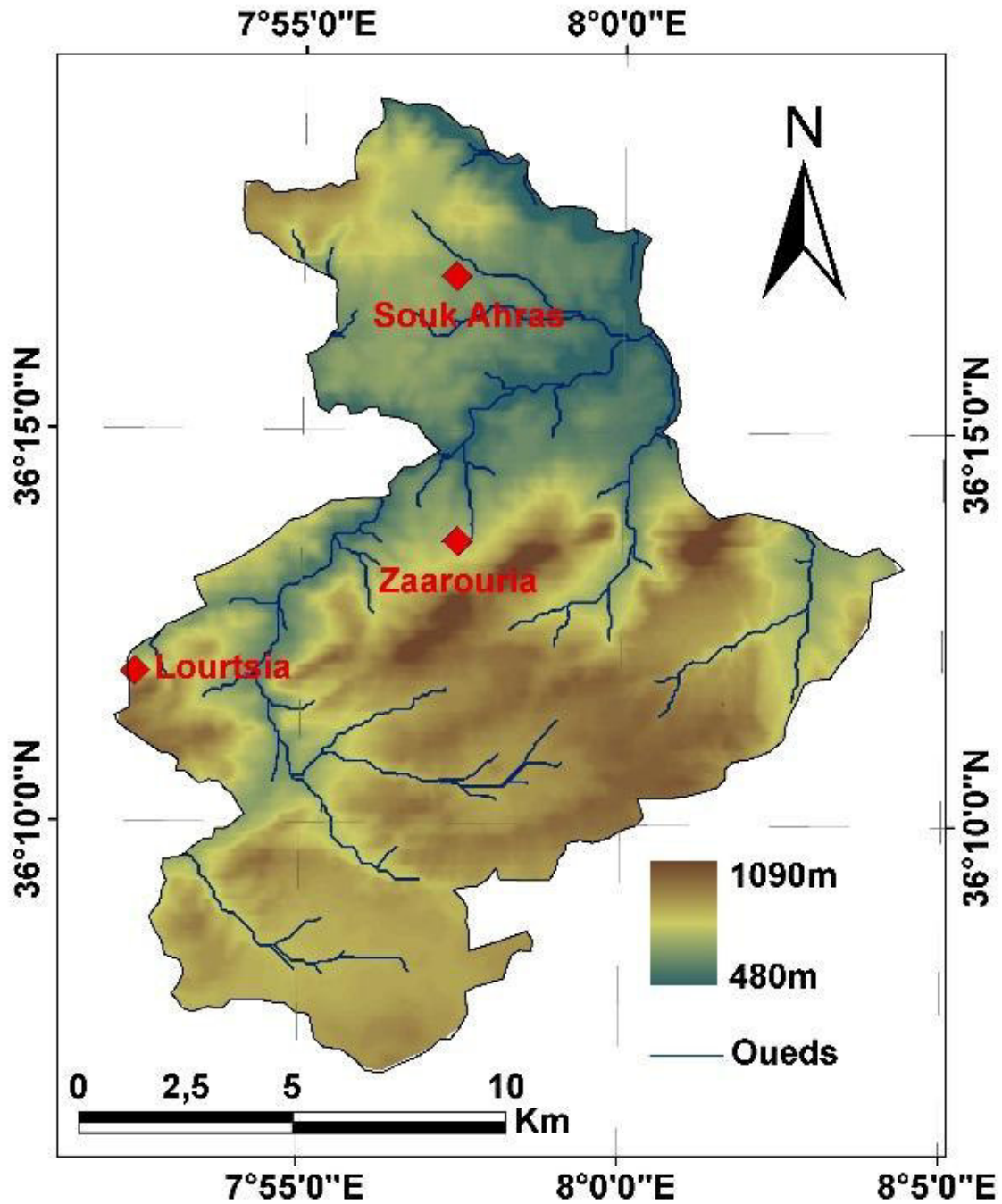


Figure IV-3: Le modèle numérique de terrain (MNT) couplé au réseau hydrographique de la zone d'étude.

4.2. Cartes de base

Les thèmes lithologie et failles ont été digitalisés sur un fond composé de la carte géologique de Souk Ahras (N°77), M'daourouch (N°100) et Taoura (N°101), (en 1 :50000) (Fig. VI-4). Les lignes limitant les affleurements de chaque formation lithologique ont été fermés en polygones. Un tableau d'attribution a été créé, contenant pour chaque unité lithologique le nom de faciès, l'âge, le symbole, et la classe de susceptibilité, etc. Les faciès connus pour leur sensibilité aux glissements de terrain sont très abondants dans la zone d'étude, on peut citer : les argiles rouges du Pliocène, les marnes jaunes de l'Eocène, les Marnes argileuses du Crétacé et, les formations argilo-gypso-gréseuses du Trias (Hadji et al 2013, a). Les failles ont été séparément digitalisées en *polylines* sur le même fond cartographique, (Fig. VI-5b). Elles ont été intégrées dans la modélisation en adoptant des buffers de : <500m, de 500 à 1000m et >1000m autour des failles (Fig. VI-5b).

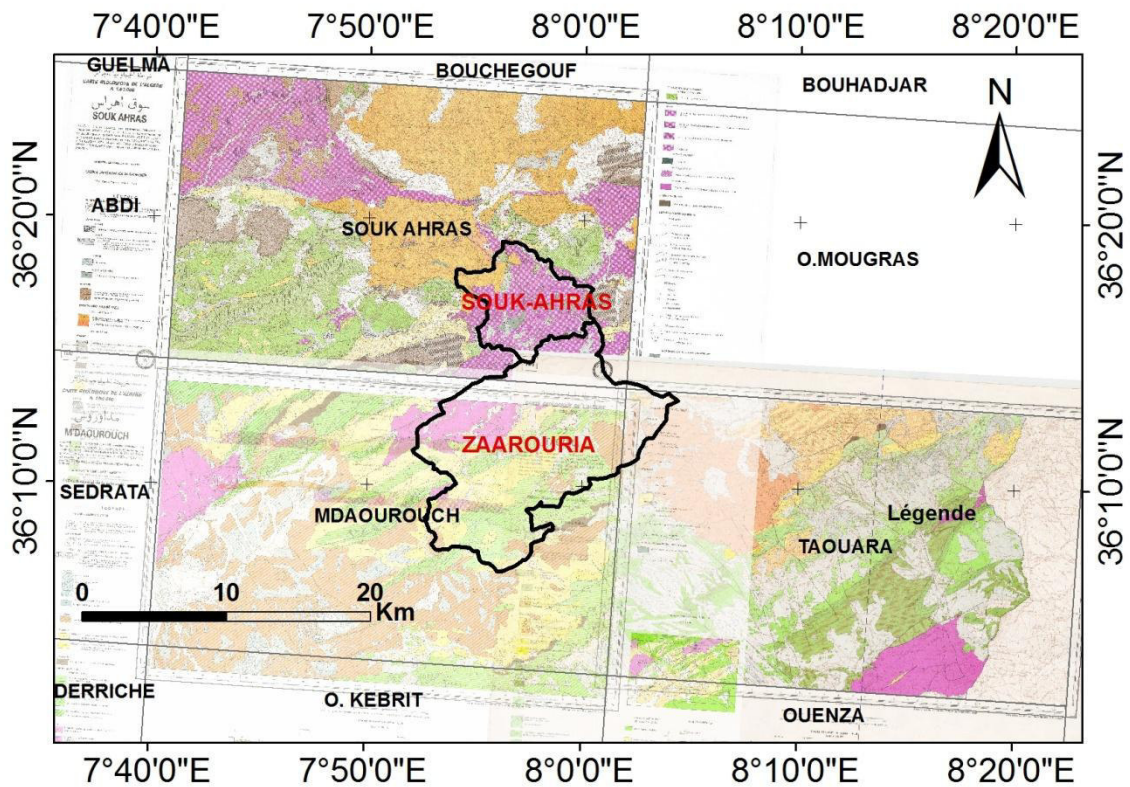


Figure VI-4: Assemblage des cartes géologiques de la zone d'étude.

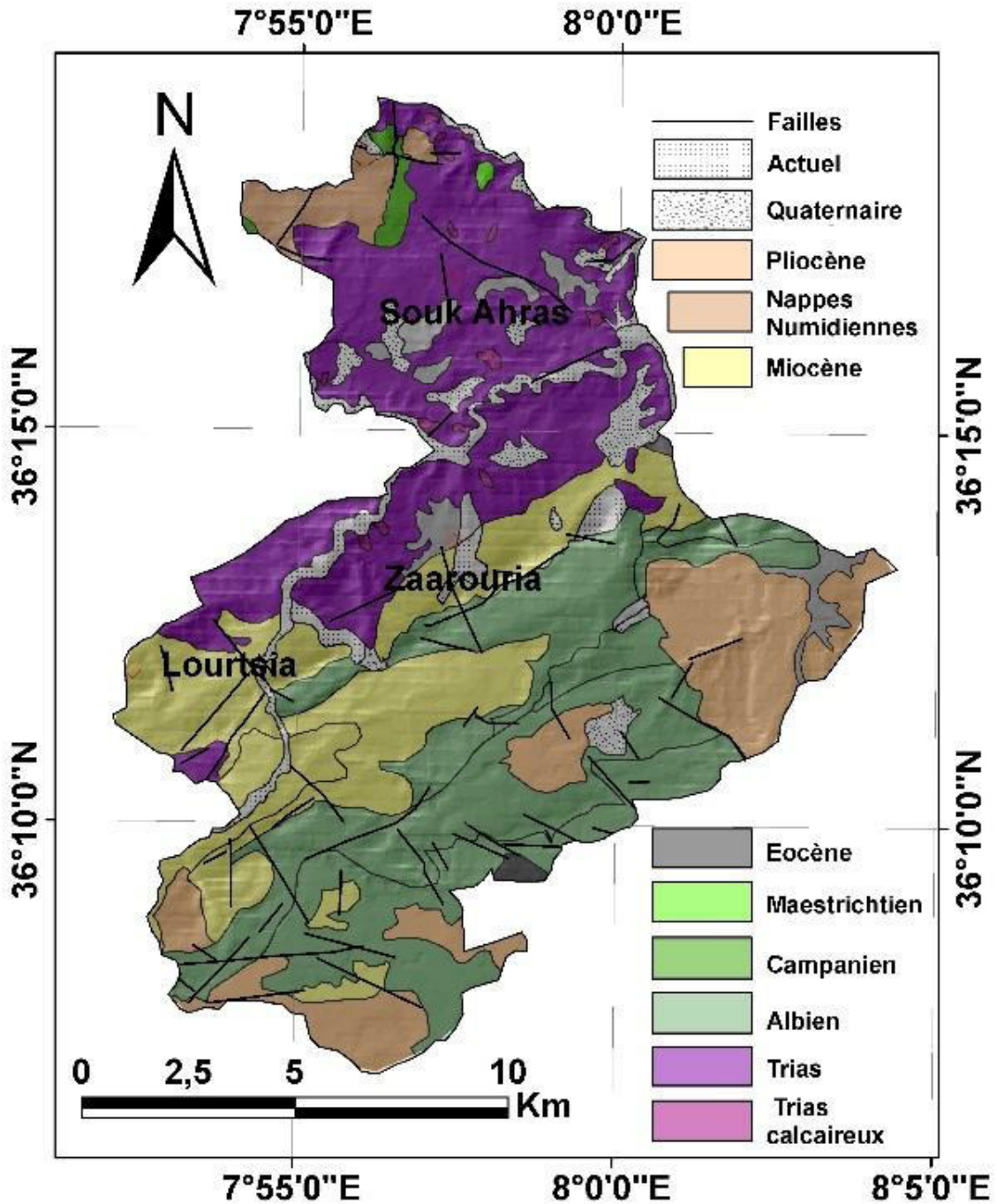


Figure VI-5 a: Carte géologique simplifiée de la zone d'étude.

Légende : Actuel : Alluvions fluviales et formations gravitationnelles ; Quaternaire : Alluvions, Conglomérats et éboulis de pente ; Pliocène : Argiles rouges ; Nappes Numidiennes (Oligocène Allochtone) Grés Quartzeux et Argiles verdâtres ; Miocène : Siltstones et Marnes argileuses ; Eocène : Marnes jaunes et

calcaires marneux ; Maestrichtien(Crétacé) : Marnes argileuses, calcaires marneux et calcaires blanc crayeux ; Campanien : Marnes Argileuses et Marno-calcaires ; Albien : Marnes argileuses noires ; Trias : Formations argilo-gypso-gréseuses à fragments et blocs de roches diverses ; Trias calcaireux : Calcaires Gris et noires.

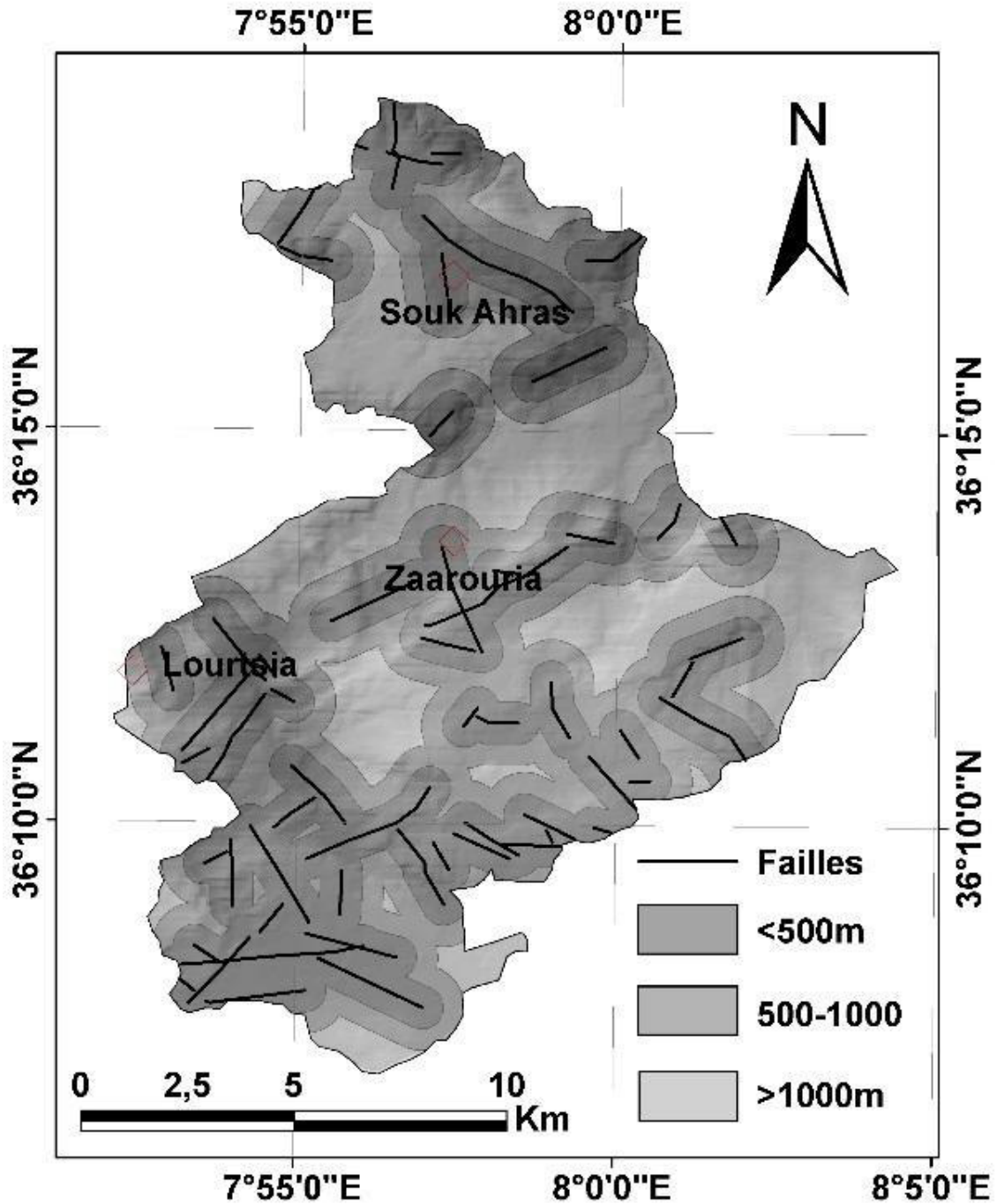


Figure VI-5b : Carte des tampons des failles de la zone d'étude.

4.3. Cartes des pentes d'élévations et d'exposition

L'inclinaison des pentes est le principal facteur de prédisposition des terrains aux glissements (Kundu et al. 2013). Les pentes de la zone d'étude se répartissent entre 0° et 79° , avec une moyenne d'environ $8,34^\circ$ et une déviation standard de $7,26^\circ$ (Fig. VI-6). Sur la base de mesures de terrain on a choisis une subdivision de la carte des pentes en 5 classes : $<5^\circ$, $[5-10[$, $[10-20[$, $[20-30[$ et $\geq 30^\circ$. Les observations montrent qu'en dessous de (5°) aucun événement significatif n'a été enregistré. La classe $[5-10[$ n'est pas favorable à la genèse des mouvements de pente. Les pentes de la classe $[10-20[$ sont peu stables ; celles ayant une déclivité comprise entre 20° et 30° présentent des indices nets d'instabilité; enfin la pluparts des pentes possédant un degré d'inclinaison dépassant les 30° sont quasi--instables. L'abondance des glissements de terrain sur cette classe, est due au faciès lithologique de ces pentes. En effet le trias diapirique (Argilo-gypseux) favorise l'apparition des glissements rotationnels, plus que tout autre type de mouvements de pente.

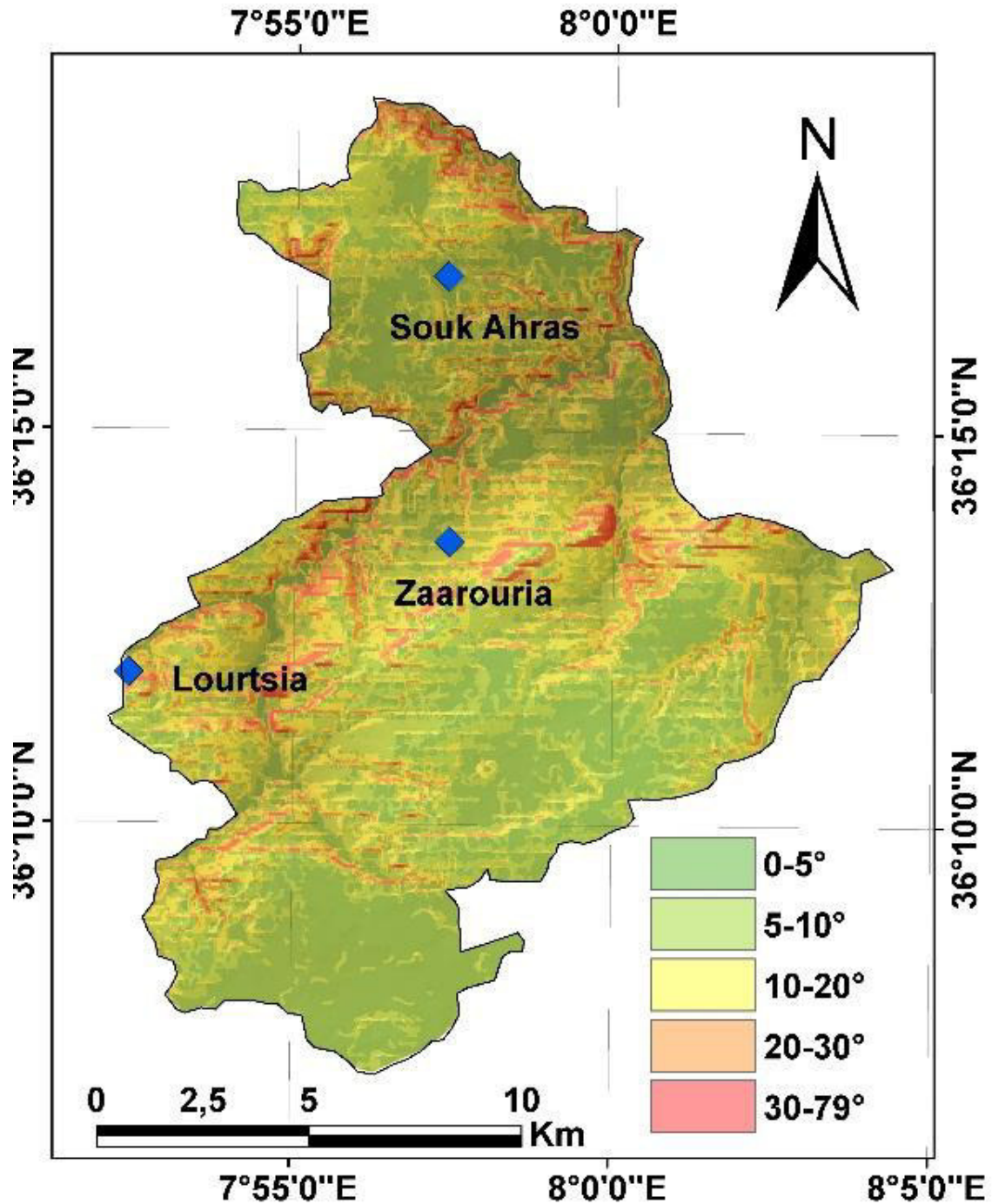


Figure VI-6 : Carte des classes de pente de la zone d'étude.

La carte d'élévations de la zone d'étude a été subdivisée en sept tranches hypsométriques comprises entre 480 et 1090m (Fig. VI-7). Les plus hautes altitudes (1000-1090m) se situent sur les sommets de Djebel Chouga et Djebel Zaarouria et occupent 1,776Km². Les plus basses (480-500m) se concentrent dans le lit de l'Oued Medjerda avec

1,041 Km². L'altitude moyenne est de 769,890m, avec une déviation standard de l'ordre de 116,14m. La classe 700-800m a la plus grande superficie, avec 75,526 Km².

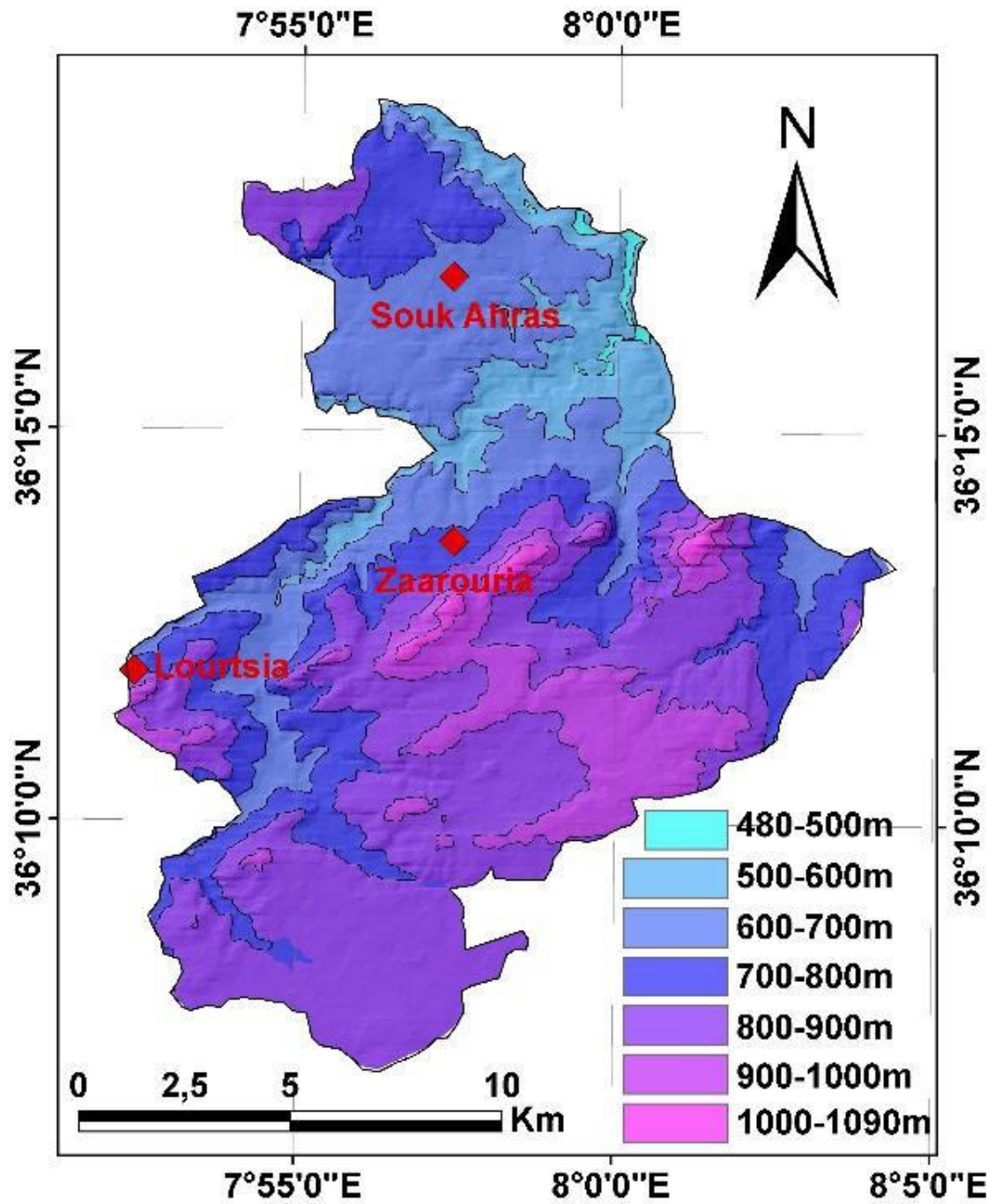


Figure VI-7 : Carte des classes d'élévation de la zone d'étude.

La carte d'exposition de la zone d'étude exprime l'orientation des pentes par rapport au Nord, suivant la direction des aiguilles de la montre, (Fig. VI-8). Elle dévoile les pentes les plus ombrées et par conséquent les plus humides (Pourghasemi et al. 2012). Cette humidité présente un facteur de prédisposition positif des ruptures de pente. Les pluies hivernales arrivent du NW, saturent les versants en eau et peuvent perturber leur équilibre.

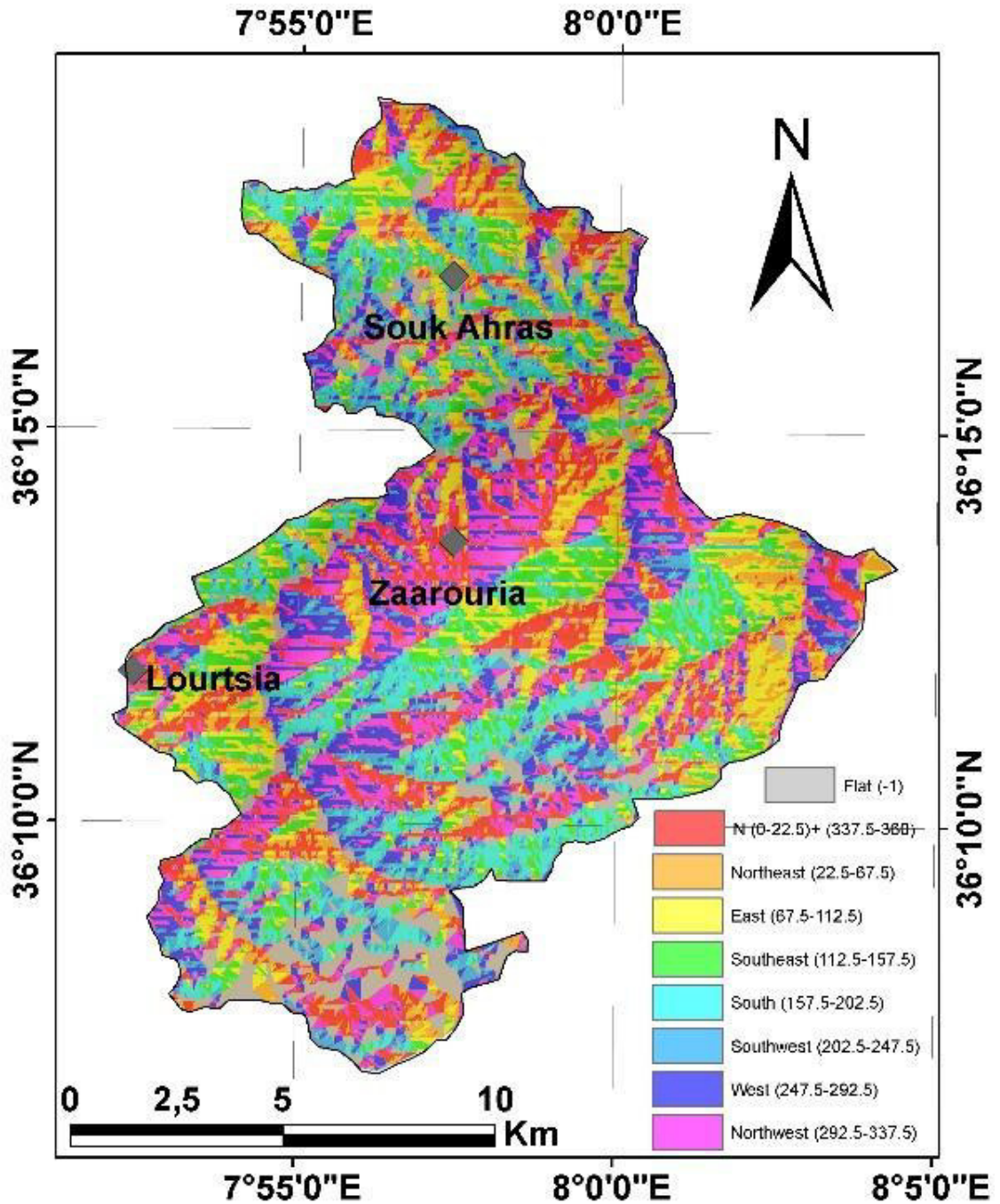


Figure VI-8 : Carte de l'exposition des pentes de la zone d'étude.

4.4. La carte pluviométrique

Les pluies sont connues pour leur principal rôle dans le déclenchement des glissements de terrain (Conforti et al. 2011). La carte des précipitations moyennes interannuelles de la zone d'étude a été échantillonnée de la carte pluviométrique de l'Algérie du Nord (ANRH 1993, Touazi et Laborde., 2000). Ce fond Raster a été vectorisé en polygones traduisant des isohyètes de précipitations. La carte résultante (Fig. VI-9) comporte cinq classes plus ou moins parallèles: la classe $< 550\text{mm}$ ($23,913\text{K m}^2$) couvre l'extrême Sud de la zone d'étude, l'isohyète $]550, 650\text{mm}]$ ($95,082\text{Km}^2$) se situe au Nord de la précédente; la classe $]650, 750\text{mm}]$ ($62,013\text{Km}^2$) se situe au centre de la zone d'étude; Celle de $]650, 750\text{mm}]$ ($15,923\text{Km}^2$) à son Nord et, la classe $>750\text{mm}$: ($9,215\text{Km}^2$) à l'extrême Nord.

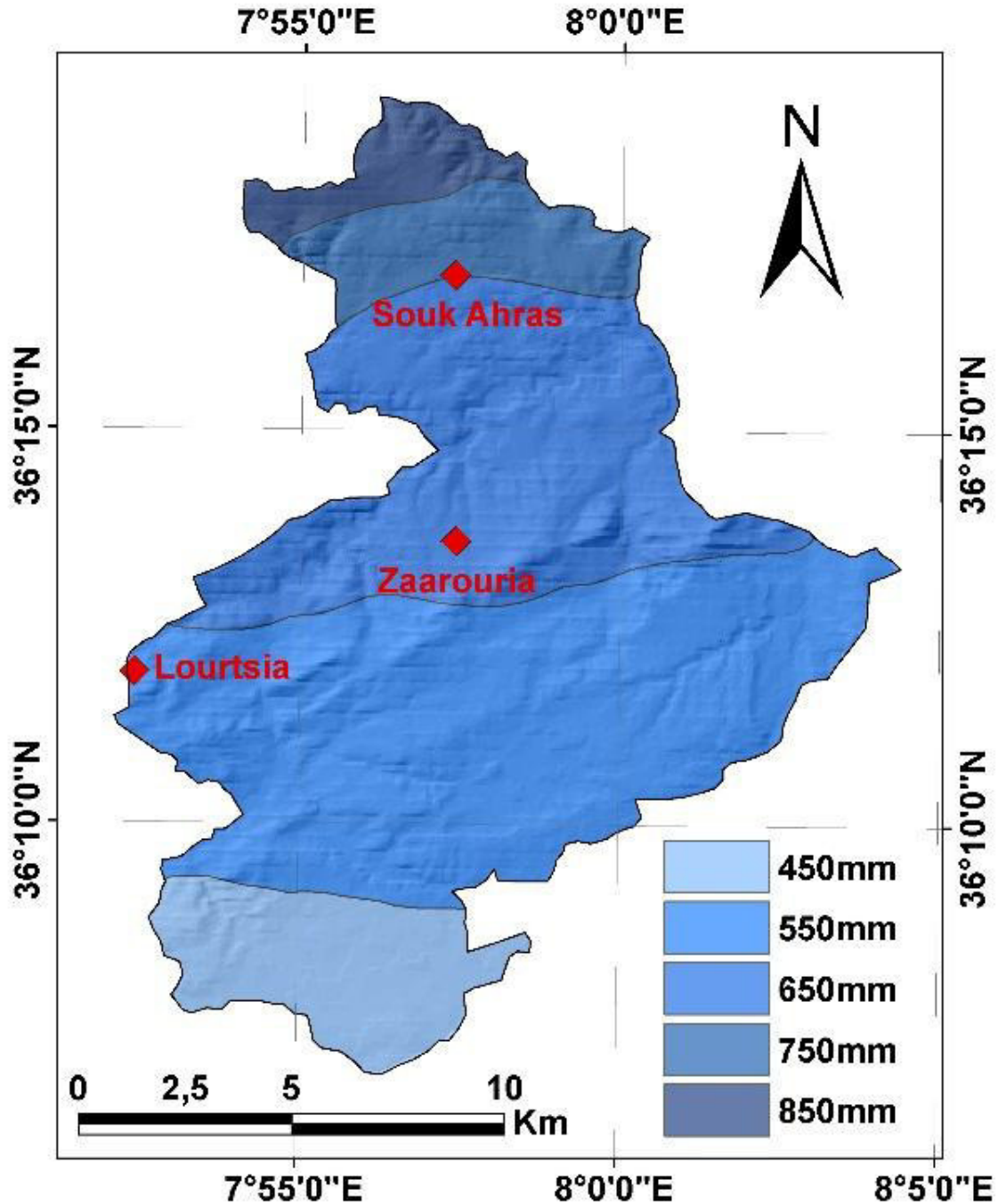


Figure VI-9 : Carte des précipitations annuelles de la zone d'étude.

4.5. L'occupation de sol

L'occupation de sol de la zone d'étude a été cartographiée en utilisant une base de données multi-sources comportant des images satellitaires, des cartes topographiques complétée par un travail de terrain. Ces informations ont servi pour digitaliser et indexer les thèmes réseau routier, bâti, champs agricoles, forêts et terrains nus, (Tableau VI-1), (Fig.

VI-10). Les routes ont été intégrée dans la modélisation en adoptant des buffers de <25m, de 25 à 50m et >50m autour des axes routiers et ferrés.

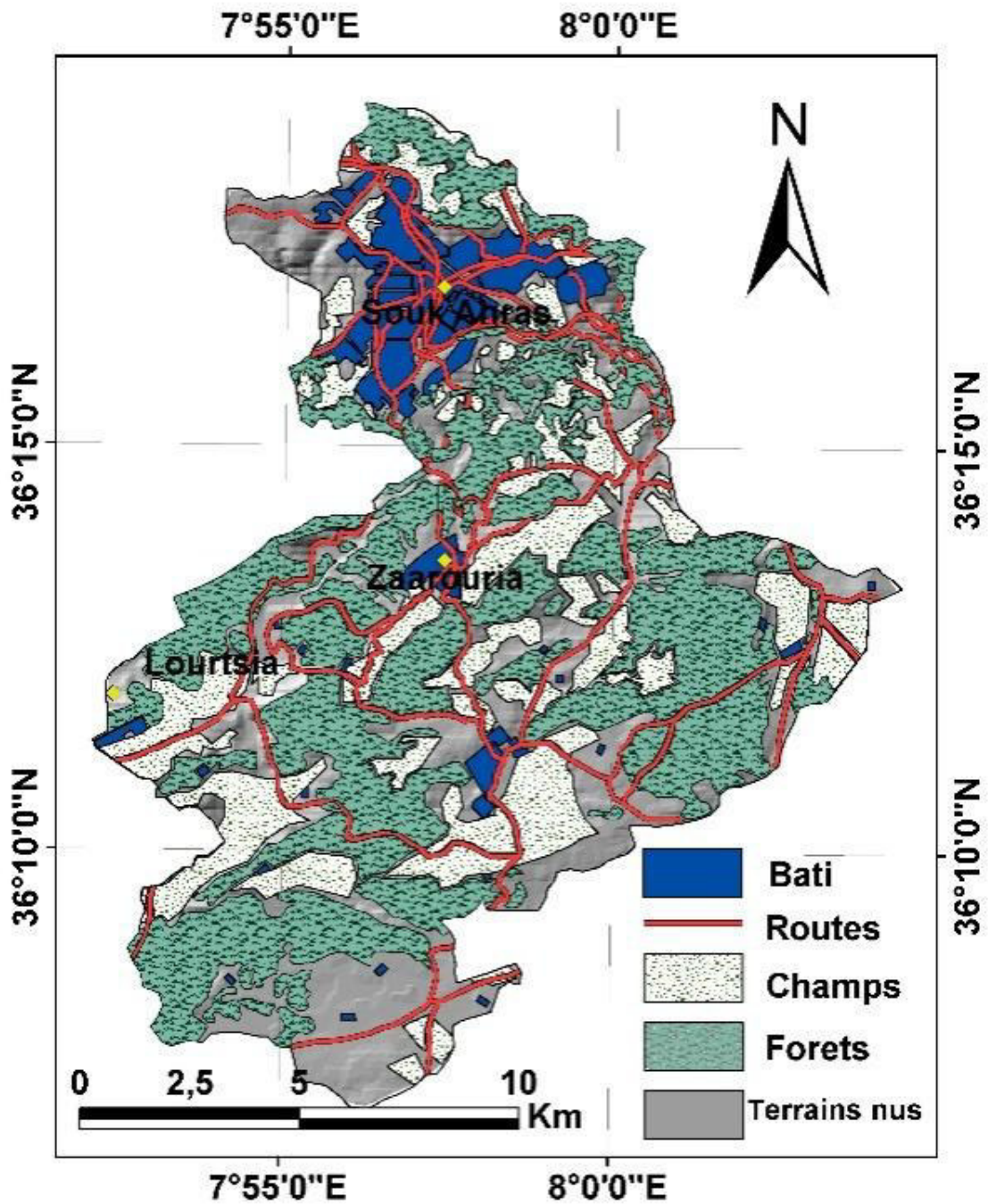


Figure VI-10 : Carte de l'occupation de sol de la zone d'étude.

Tableau VI-1 : Répartition des superficies forestières par commune et par type en (Ha)

Commune	Forêts	Maquis	Broussailles	Total (Ha)
Souk Ahras	490	270	120	880
Zaarouria	3200	4902	10	8112

4.6. Caractéristiques des glissements de terrain étudiés

Les mouvements de pente qui caractérisent notre zone d'étude sont majoritairement des glissements plans, rotationnels et complexes (Fig. VI-11). Les précipitations qui saturent les versants en eau sont le principal facteur déclenchant de ces glissements. Les sollicitations sismiques même mineures et les activités anthropiques peuvent également déclencher des ruptures de pente (Trustrum et al. 1988). L'utilisation de la visu-interprétation de photos satellitaires a permis d'analyser des grandes étendues de terrain, d'où 219 glissements ont été identifiés dans notre zone d'étude (Fig. VI-12).



Figure VI-11: Quelques glissements de terrain dans la zone d'étude.

Un travail de terrain a suivi cette opération, pour confirmer et identifier les glissements repérés. 70% des glissements ont été exploités pour la construction du model et 30% (sélectionnés par un processus aléatoire) pour sa validation.

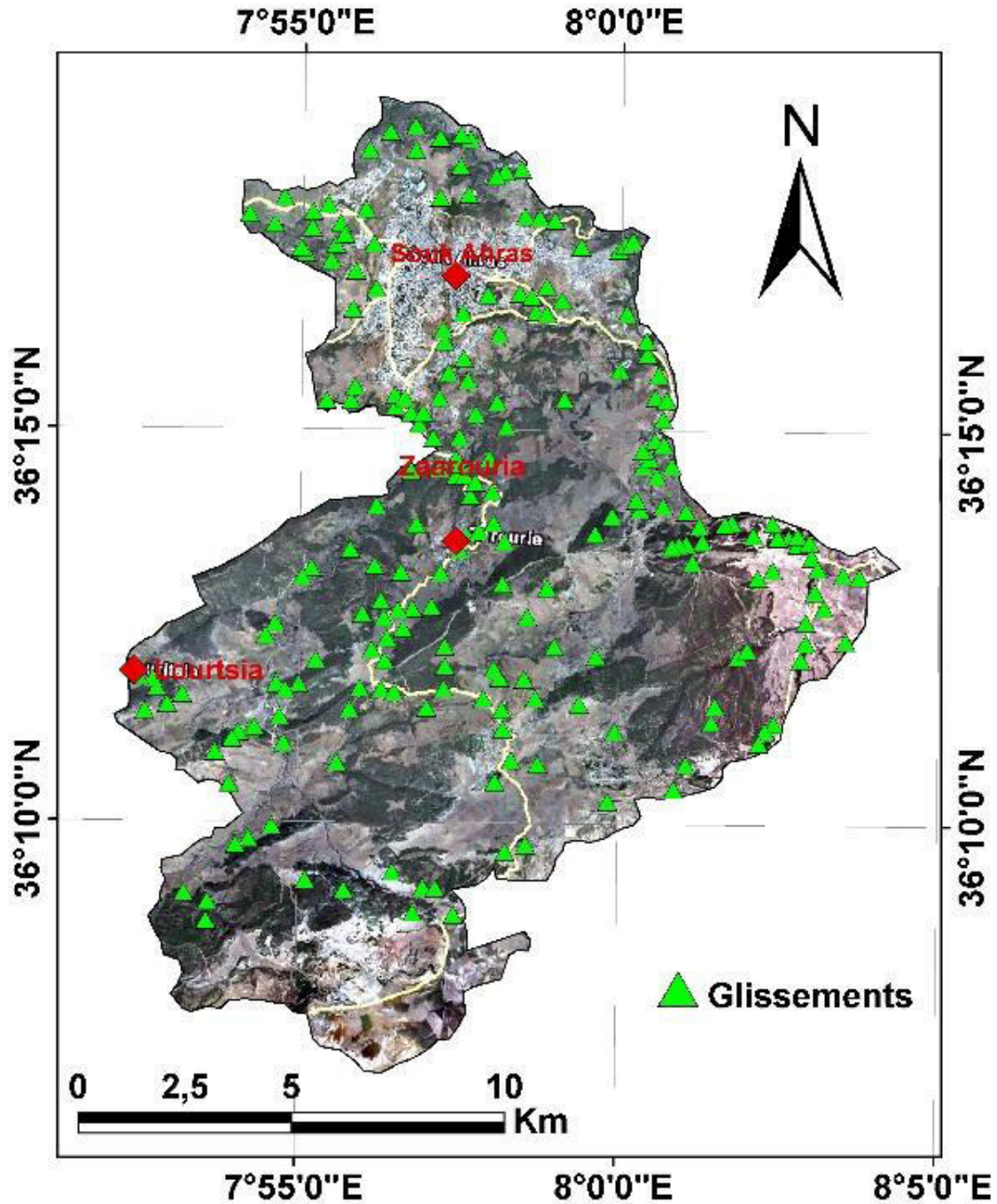


Figure VI-12 : Carte d'inventaire des glissements de terrain dans la zone d'étude.

5. Méthode d'estimation de l'aléa, vulnérabilité et risque glissement de terrain

5.1. Cartographie de l'aléa

L'approche adoptée par notre étude pour la cartographie d'aléa glissement de terrain suit cinq étapes :

- La visu-repérage des glissements à partir des photos satellitaires ;
- La cartographie des facteurs causatifs, supposés être responsables de l'occurrence des glissements dans la zone d'étude ;
- L'analyse de l'importance relative de chaque variable catégorique impliqué dans la genèse des glissements ;
- L'évaluation et la cartographie de l'aléa glissements de terrain dans la zone d'étude.
- La validation du model appliqué dans la modélisation.

On a opté pour la hiérarchisation de la carte d'aléa glissement de terrain en quatre classes (MATE/METL, 1999; Loat and Zimmermann, 2004) : aléa Fort, Modéré, Faible et Nul. Ces classes probabilistes sont définies en fonction de l'intensité du phénomène et de sa probabilité d'apparition. Chaque surface distinguée sur la carte d'aléa est matérialisée par une limite et une couleur.

Afin d'estimer la relation entre l'apparition des glissements de terrain, et les facteurs lithologiques, géomorphologiques et environnementaux, une corrélation entre les couches d'information interprétant ces différents thèmes SIG a été proposée (Dai et Lee.2002).

Toutes les couches d'information sont rastérisées dans le même format (5x5m) et leurs indices d'aléa sont établis à l'aide de données réelles de terrain. La superposition de chaque thème séparément sur la carte d'inventaire des glissements de terrain a permis d'affecter des coefficients à chaque classe élémentaire de toutes les couches en fonction de la densité des événements. Des zones tampons ont été dressées autours des thèmes à caractère linéaire (*polyline*) tel que les failles, les routes et le réseau hydrographique pour permettre leur intégration dans la modélisation avec les autres thèmes à caractère polygonale.

L'information géologique (la lithologie et tampons des failles (A, B)) L'occupation de sol (tampons des routes, bâtis, forêts et champs (C)); les données morphologiques (altitude, classes de pente et exposition (D, E, F)) et les données environnementales (précipitations, tampons duréseau hydrographique, et les séismes, (ce dernier facteur est mono-zonal) (I, J, K)) sont introduits dans l'évaluation de l'aléa. Des indices d'aléa (H_{ji} =nombre décimal

compris entre 0 et 1) interprétant la relation entre la distribution spatiale du phénomène et les différentes classes élémentaires des facteurs causatifs ont été calculés. Plusieurs essais de pondération (W_j =nombre entier compris entre 1 et 4) interprétant l'importance de chaque facteur dans la genèse des ruptures de pentes dans la zone d'étude ont été expérimentés. 25 courbes ROC (*Receiver Operating Characteristic*) ont été testés pour divers combinaisons de pondérations (par l'intégration des 30% (66 cas) d'événements omis de la modélisation par un processus aléatoire). La meilleure combinaison a été sélectionnée pour la génération de la carte d'aléa de la zone d'étude.

La valeur de l'aléa glissement de terrain à chaque point des 8234175 pixels (5x5m) constituant la zone est calculée suivant l'équation suivante :

$$\text{Aléa} = \frac{\sum_{j=i}^9 [W_j \cdot H_{ji}(x)]}{\sum_{j=i}^9 W_j} \dots \dots \dots (1)$$

La courbe ROC du model retenu montre la plus grande Aire Sous la Courbe AUC=0,79. Cette valeur est jugée par notre étude comme un assez satisfaisante (Fig. VI-13).

Dans le model retenu, Un facteur de pondération minimum égal à un ($W_B, W_{Det} W_E=1$) est affecté à la couche failles, élévations et exposition à cause de leurs faible corrélations avec l'occurrence du phénomène. Un facteur de pondération maximum, égale à quatre (W_F, W_I et $W_A =4$) a été attribué à l'inclinaison des pentes, précipitations et lithologie, à cause de leur rôle principal (corrélation élevée) dans la genèse ou le déclenchement du phénomène. Toutes les autres couches sont affectées avec une pondération égale à deux ($W_C, W_J, W_K =2$). La carte résultante a été hiérarchisée en quatre classes qualitatives en utilisant la méthode de classification prédéfinie de déviation standard (*Standard Deviation*) ce qui a permis d'obtenir la carte finale d'aléa glissement de terrain de la zone d'étude. Elle se divise entre la classe d'aléa nul 23,38% (48,192Km²), faible 31,53% (64,994Km²), modéré 36,97% (76,223Km²) et Fort 8,12% (16,736Km²),(Fig. VI-14).

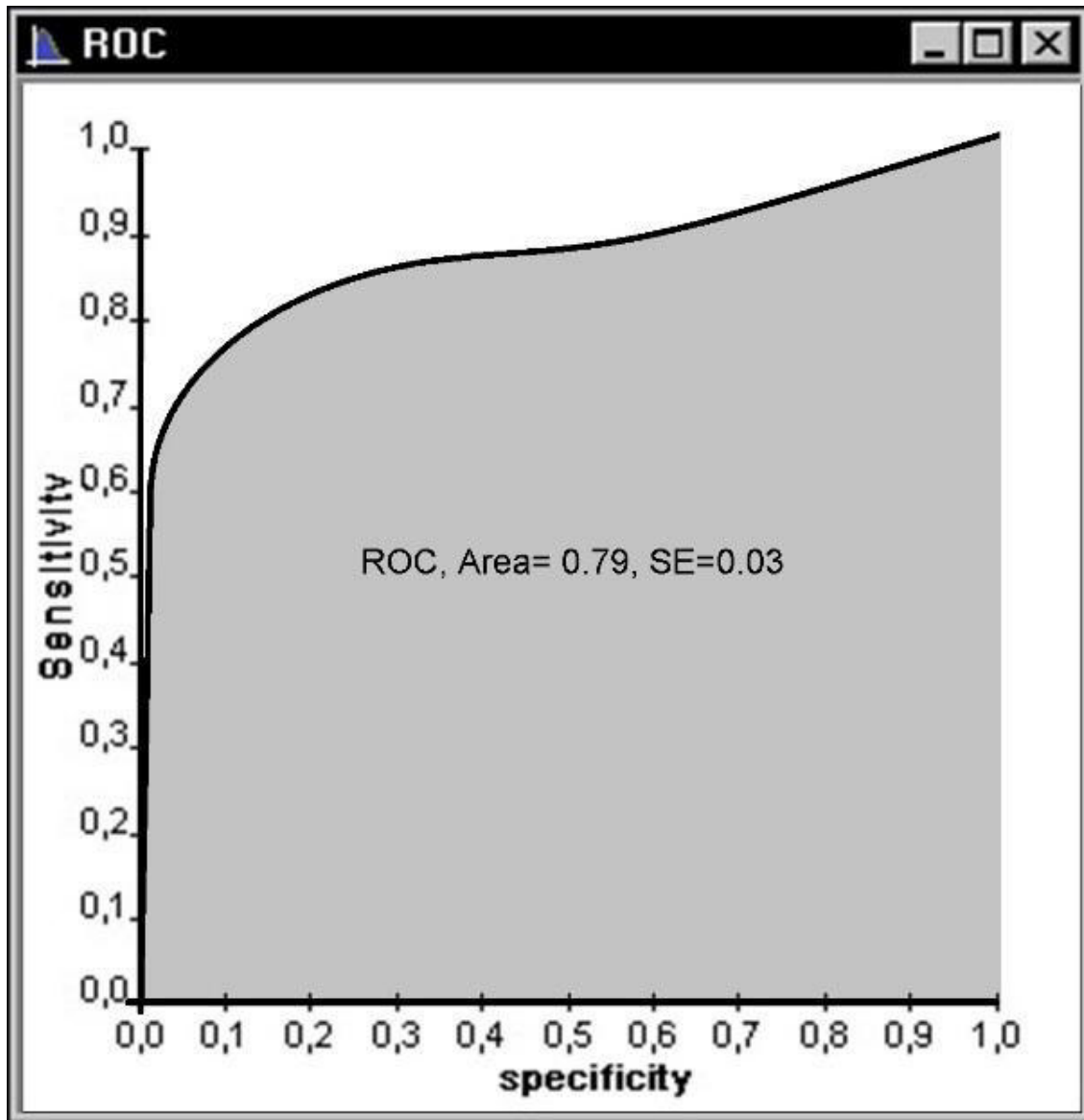


Figure VI-13 : Courbe ROC du model retenu, avec le plus grand AUC=0,79.

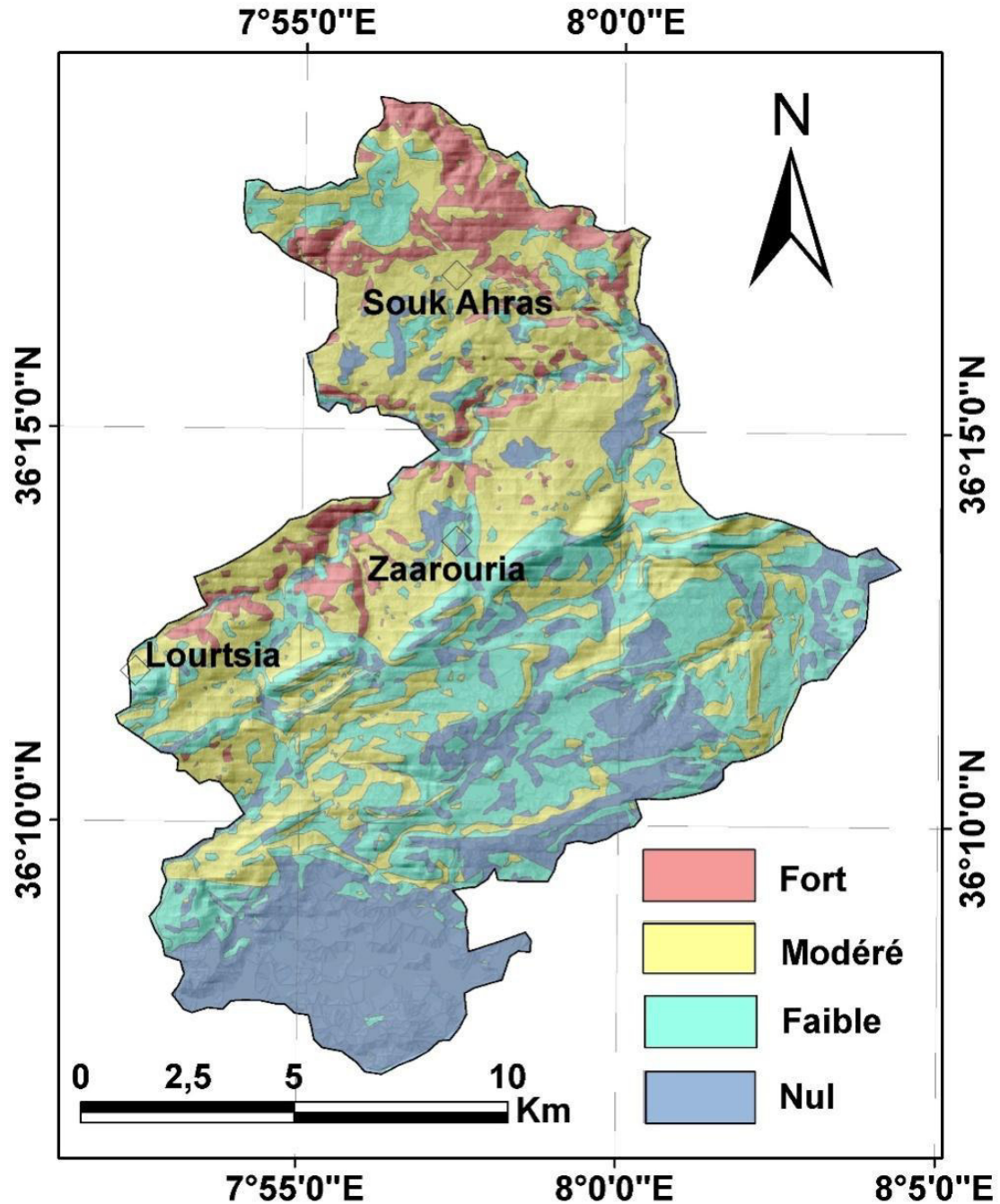


Figure VI-14: Carte d'aléa glissement de terrain de la zone d'étude.

5.2. Cartographie de la vulnérabilité

Pour la détermination de la vulnérabilité des éléments exposés aux glissements de terrain, une typologie des composantes de territoire en infrastructures de transport, constructions et fonctionnalité sa été opérée (UNDRO, 1991). Un travail de terrain, des

cartes topographiques et des photos satellitaires récentes ont été utilisées pour analyser, digitaliser et indexer ces thèmes. Des valeurs d'indice de perte (I_p =nombre décimal compris entre 0 et 1) sont attribuées aux différents éléments à risque. La carte thématique de vulnérabilité a été élaborée par la modélisation de quatre thèmes traduits par la carte d'urbanisme, la carte du réseau routier, la carte des champs agricoles et la carte du patrimoine forestier ; estimant les préjudices corporels, les dommages structurels, et les désordres fonctionnels relatifs à une éventuelle occurrence d'un glissement.

5.2.1. Le thème urbanisme

L'extension, le type et la qualité du tissu urbain est un critère de vulnérabilité structurelle et corporelle. Plus ce critère est élevé, plus la zone concernée est vulnérable. Dans notre travail on a attribué à ce thème un indice de perte maximal ($I_p=1$), (Fig. VI-15).

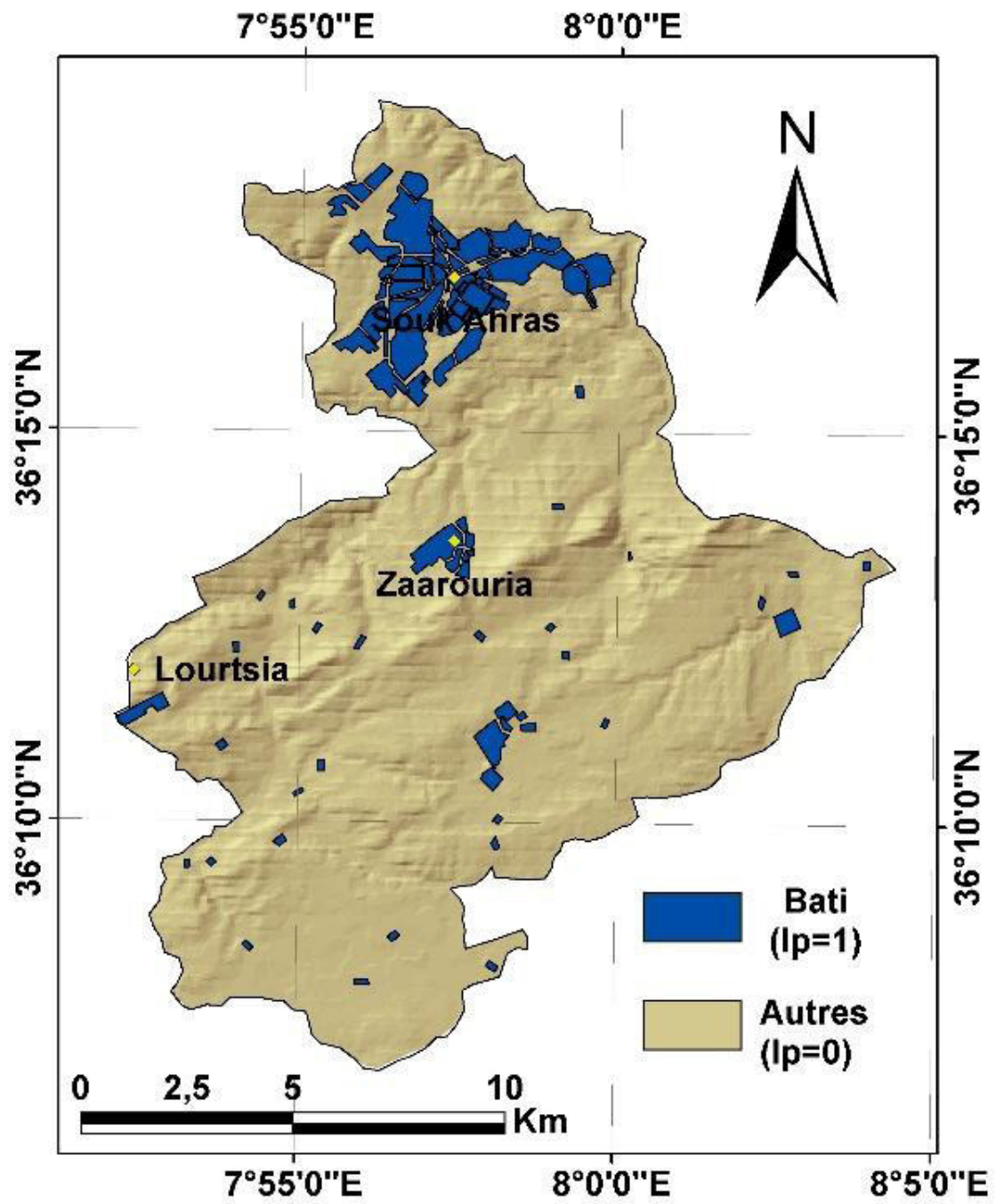


Figure VI-15 : Carte d'urbanisme de la zone d'étude.

5.2.2. Le thème réseau routier et ferré

L'importance d'une route et le nombre de personnes qui l'utilisent est un indicateur de vulnérabilité corporelle, structurelle et fonctionnelle. Si un glissement coupe un axe routier et le rend temporairement impraticable, les usagers de cet axe devront malgré eux emprunter un autre trajet (généralement indésirable). La valeur de l'indice de perte associé quantifie les difficultés engendrées par de tels changements d'itinéraire. On a attribué aux routes nationales (RN) et aux lignes de chemins de fer (CF) un indice de perte maximal ($I_p=1$), (à cause du caractère irremplaçable de ces axes). Tandis que pour les chemins de wilaya (CW) c'est plutôt une valeur modérée ($I_p=0,5$) (à cause des alternatives possibles), pour les usagers de ces routes lors d'une éventuelle coupure de ces axes (Fig. VI-16).

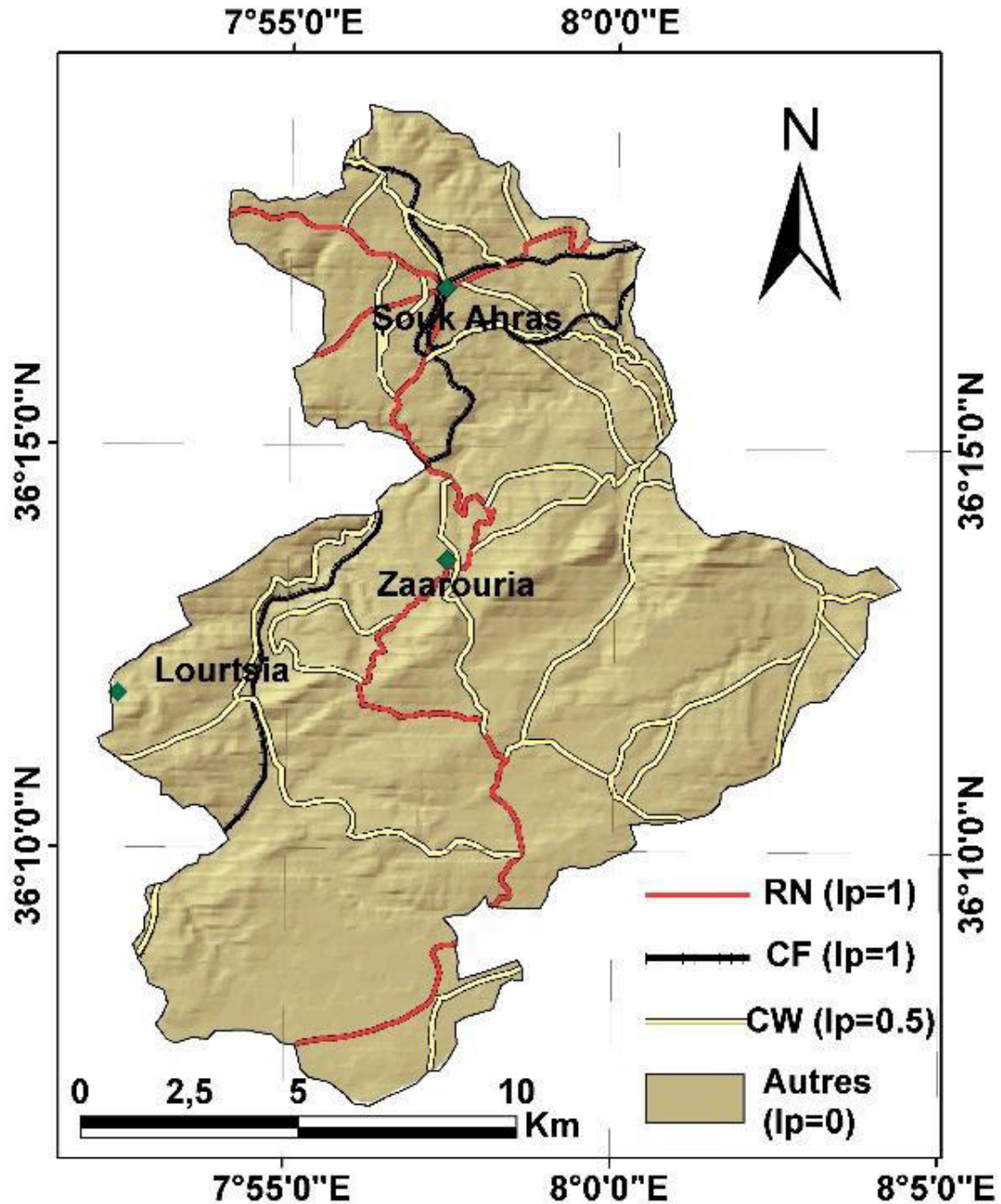


Figure VI-16: Carte du réseau routier de la zone d'étude.

5.2.3. Le thème champs agricoles et forêts

La végétation joue le rôle d'écran qui conditionne la rapidité du ruissellement superficiel et amortit son agressivité. Ainsi, les formes et l'importance de l'érosion hydrique sont directement liées, en plus d'autres facteurs, à la répartition de la couverture végétale dans le bassin. En plus des thèmes précédents, il paraît nécessaire d'interpréter

l'occupation de sol en termes de champs agricoles et de patrimoine forestier. Ces thèmes sont un intérêt économique (agriculture) et touristique (randonnée de montagne) pour les citoyens de la région. On a attribué un indice de perte modérée ($I_p=0,5$) aux champs (Fig. VI-17) et faible ($I_p=0,25$) aux forêts (Fig. VI-18). Un indice de perte nul a été attribué aux terrains nus.

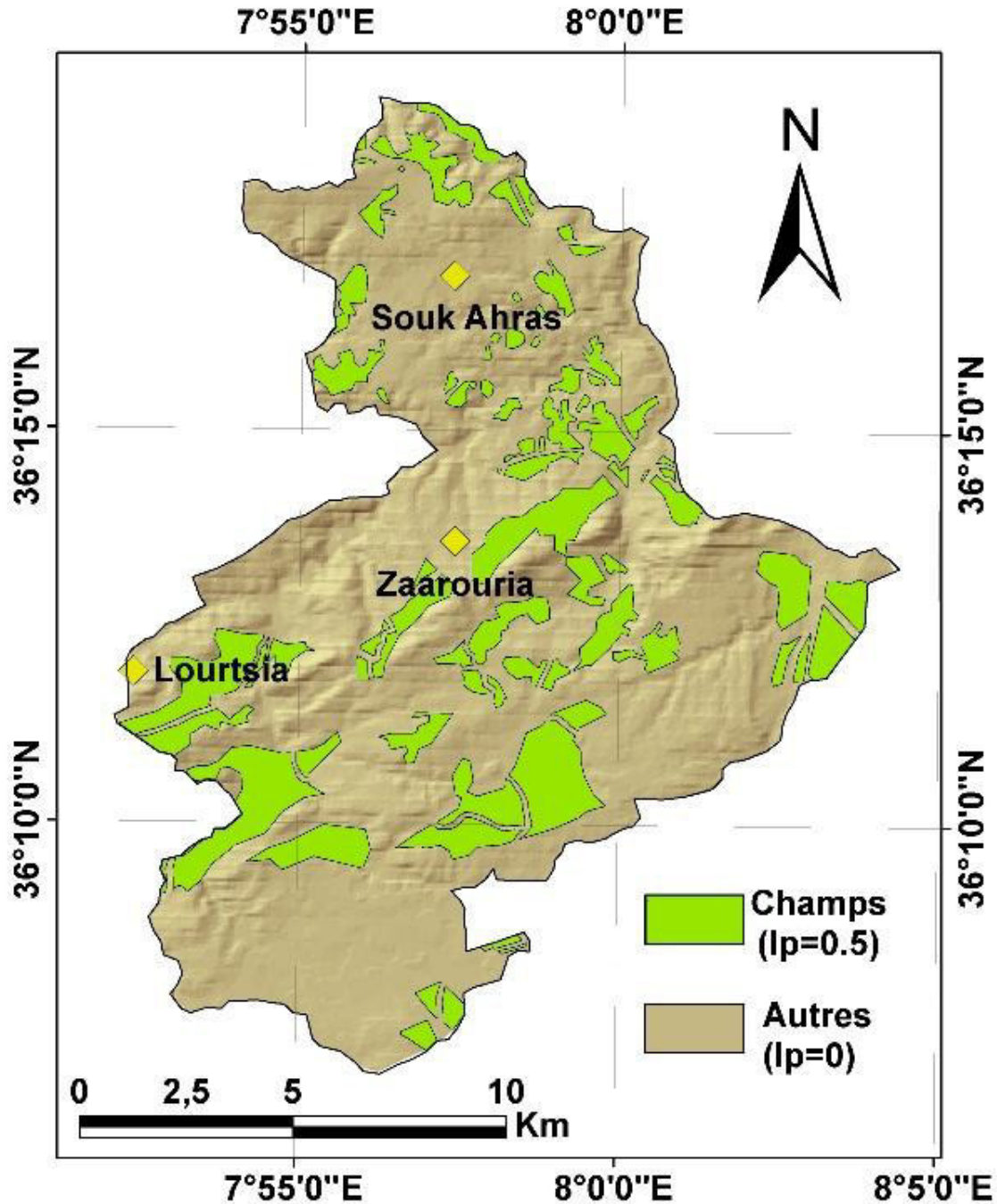


Figure VI-17: Carte des champs agricoles de la zone d'étude.

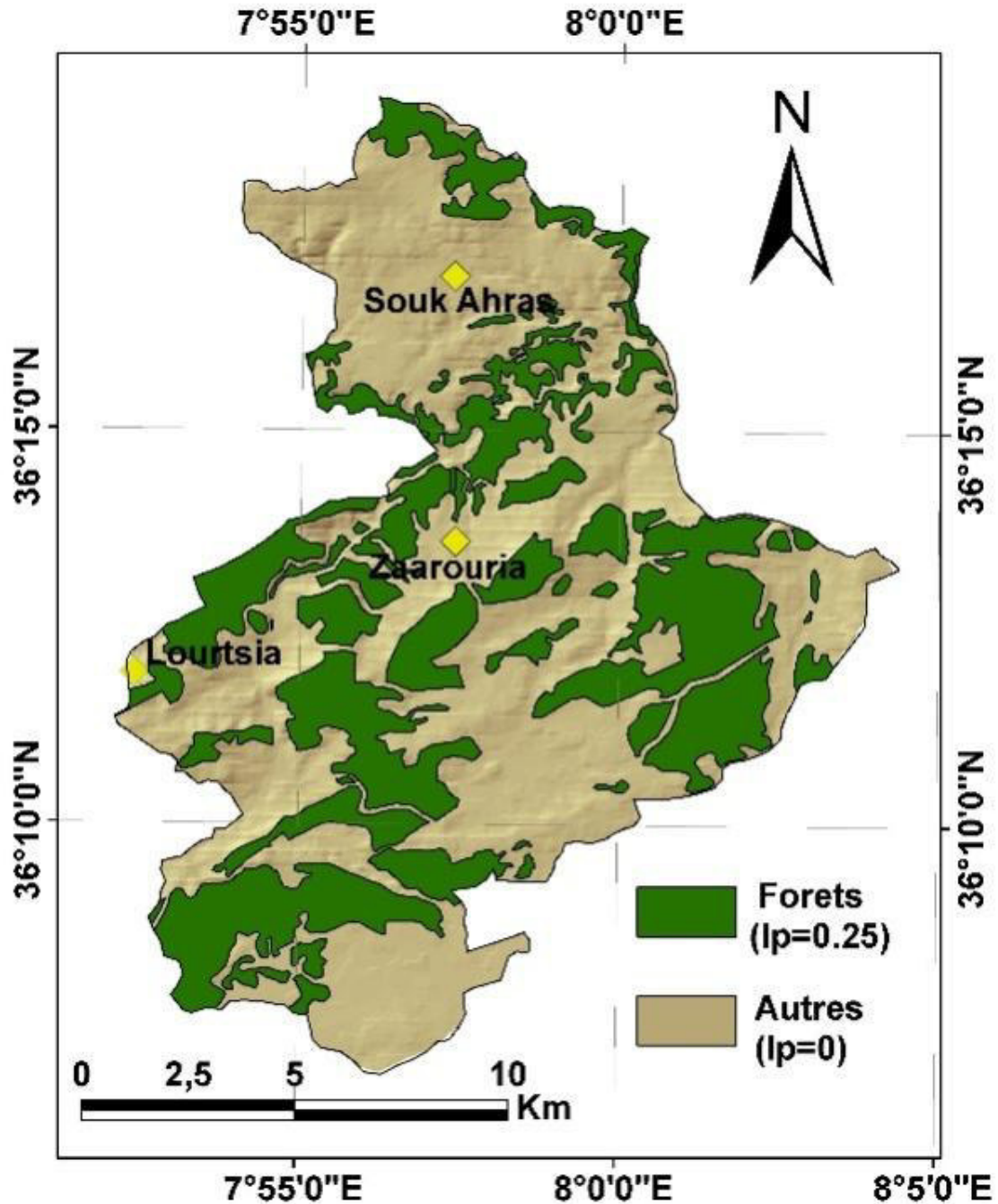


Figure VI-18 : Carte du patrimoine forestier de la zone d'étude.

Pour chaque point de l'espace, la valeur maximale des indices de pertes élémentaires des différents thèmes a été retenue. L'assemblage de ces valeurs a donné une carte des indices globaux de vulnérabilité. Les résultats ont été harmonisés sur une échelle de 0 à 1, puis hiérarchisés avec la méthode de déviation standard en quatre classes

cartographiques de vulnérabilité, Nulle = 26,41%, Faible = 36,81% ; Modérée = 26,83% et Forte = 9,95%, (Fig. VI-19).

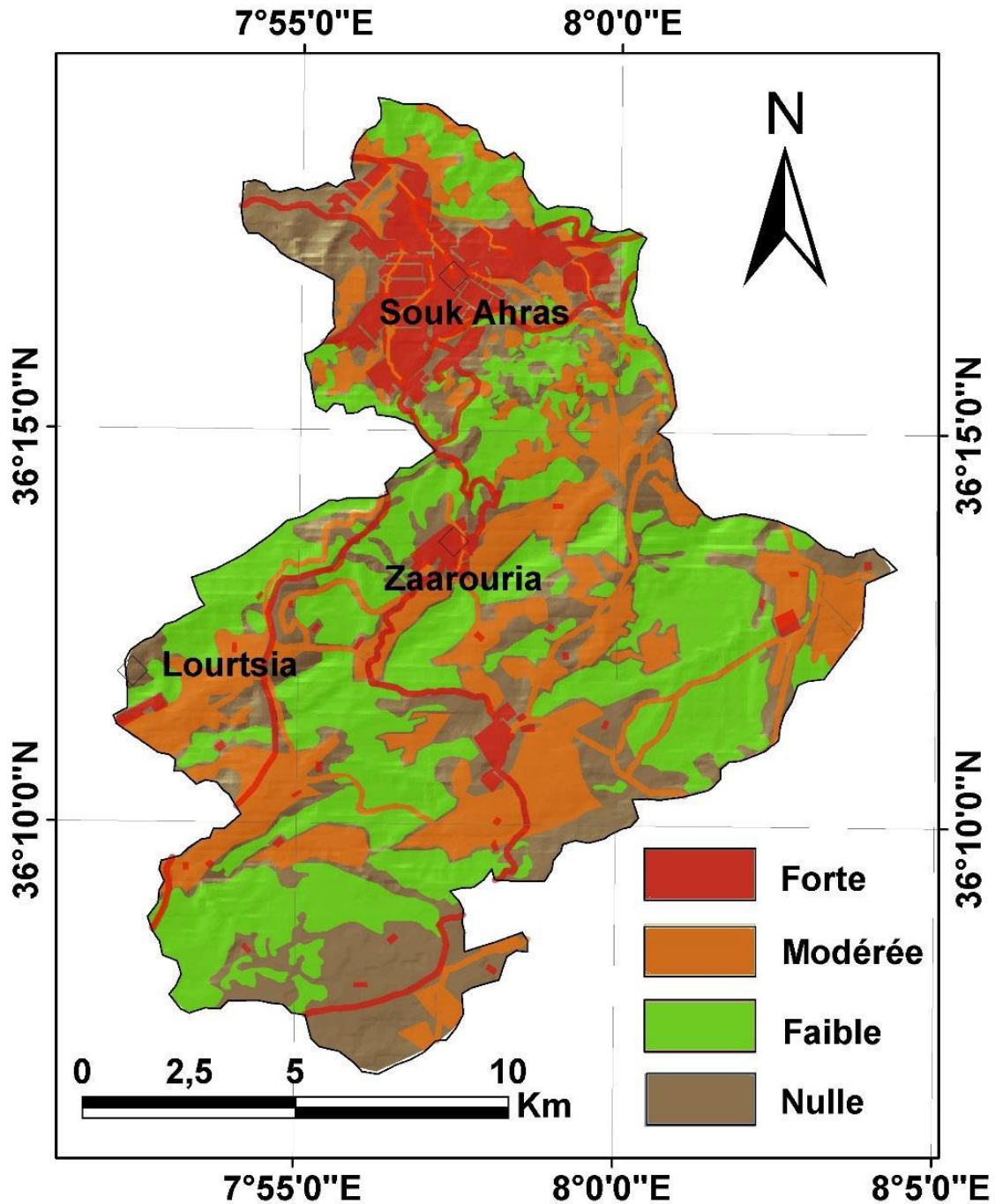


Figure VI-19: Carte de vulnérabilité de la zone d'étude.

5.3. Cartographie de risque total

Pour une évaluation graduée la menace des glissements de terrain sur l'homme, ses biens et ses activités, les catégories d'aléa et de vulnérabilité, sont traduites en classes de risque à l'aide d'une matrice à double entrée (4x4), (Tableau VI-2), (Ko Ko et al. 2004).

Il a été déterminé qu'un risque fort résultait de l'addition d'un aléa ou d'une vulnérabilité fort(e) avec un aléa ou une vulnérabilité fort(e), voire modérée, etc. L'application de ce tableau permet d'obtenir une carte de risque total des territoires de la zone d'étude aux glissements de terrain, (Fig. VI-20). Elle se répartit sur quatre classes hiérarchiques : risque Nul = 51,33%, Faible = 23,51%, Modéré = 17,90% et Fort = 7,26%.

6. Résultats et discussion

Notre approche basée sur la géomatique et la modélisation par SIG, a permis l'étude compréhensive de l'aléa, de vulnérabilité et du risque glissements de terrain dans les territoire des communes de Souk Ahras et Zaarouria. La comparaison entre les différentes courbes ROC testées a permis de sélectionner le meilleur model prédictif de l'aléa glissement de terrain dans notre zone d'étude. L'AUC a permis également de valider le model retenu à 79%. La méthode de déviation standard a été utilisée pour hiérarchiser des cartes d'aléa et de vulnérabilité en quatre classes qualitatives chacune.

La classe de d'aléa nul couvre 48,192Km² sur les 206,146 km² que comporte la zone d'étude. Elle se concentre dans le sud, et est occupée par des formations indurées et des pentes douces. La classe d'aléa faible se repartît sur 64,994 Km² et se concentre dans le centre de la zone d'étude faiblement arrosé en pluies. L'aléa modéré s'étend sur 76,223Km²et se repartît sur les terrains triasiques, au voisinage des reliefs montagneux au centre et au Nord de la zone d'étude. La classe d'aléa fort couvre approximativement 16,736Km². Dans cette zone les pentes et les précipitations sont importantes. Les formations géologiques sont représentées par des lithologies très sensibles s aux glissements.

La classe de vulnérabilité nulle couvre 54,443 Km² et domine l'extrême Sud de la zone d'étude, elle est représentée principalement par des terrains nus. La classe de vulnérabilité faible s'étale équitablement sur presque toute la zone d'étude et couvre 75,882 Km². Son occupation de sol est représentée par des forêts mal entretenues. Celle modérée

est présentée par les champs agricoles et couvre 55,308 Km², tandis que la classe de vulnérabilité forte renferme le bâti et les principaux axes routiers et ferré de la région. Elle se concentre dans le chef-lieu de wilaya au Nord de la zone d'étude et couvre 20,512 Km².

La classe de risque nul couvre 105,814Km². Elle se concentre sur les zones des plaines et les terrasses alluviales du Sud de la zone étudiée où les valeurs d'aléa et de vulnérabilité sont faibles à nulles. La classe de risque faible 48,465Km² occupe le centre de la zone d'étude côte à côte avec la classe de risque modéré 36,9Km². La classe de risque fort se concentre au Nord de la zone d'étude où les valeurs de l'aléa et de la vulnérabilité sont élevées, elle couvre 14,966Km². Malheureusement cette classe coïncide avec les principaux enjeux et menace fortement la plus grande localité de la zone d'étude. Le réseau routier assurant l'échange de cette dernière et les localités voisines est fortement menacé.

Les principaux facteurs de prédisposition des terrains de la zone d'étude aux glissements de terrain sont la lithologie et les pentes et, le principal facteur de leur déclenchement est les précipitations. Les autres facteurs n'ont pas la même importance. La répartition de ces classes d'Aléa, de vulnérabilité et de risque est en parfaite accord avec nos observations de terrain. Ce qui démontre que l'approche suivie par notre recherche peut fournir une estimation assez raisonnable du phénomène dans la zone d'étude. Certains résultats semblent inattendus ! Ainsi, les glissements sont plus abondants sur les pentes supérieures à 30° ! Cela est expliqué par le rôle tant néotectonique que lithologique du trias diapirique extrusif; qui en s'ascendant associe des conditions de pente aiguës avec une lithologie argilo-gypso-gréseuses très sensible aux mouvements de pente. Cette formation jugée par l'étude comme la plus responsable et la plus touchée par le phénomène constitue le plus grand affleurement de point de vue surface, avec 24,8% de la zone d'étude.

Tableau VI-2 : Matrice de qualification des classes de risque cartographique.

Aléa \ Vulnérabilité	<i>Fort</i>	<i>Modéré</i>	<i>Faible</i>	<i>Nul</i>
<i>Forte</i>	Fort	Fort	Modéré	Nul
<i>Modérée</i>	Fort	Modéré	Faible	Nul
<i>Faible</i>	Modéré	Faible	Faible	Nul
<i>Nulle</i>	Nul	Nul	Nul	Nul

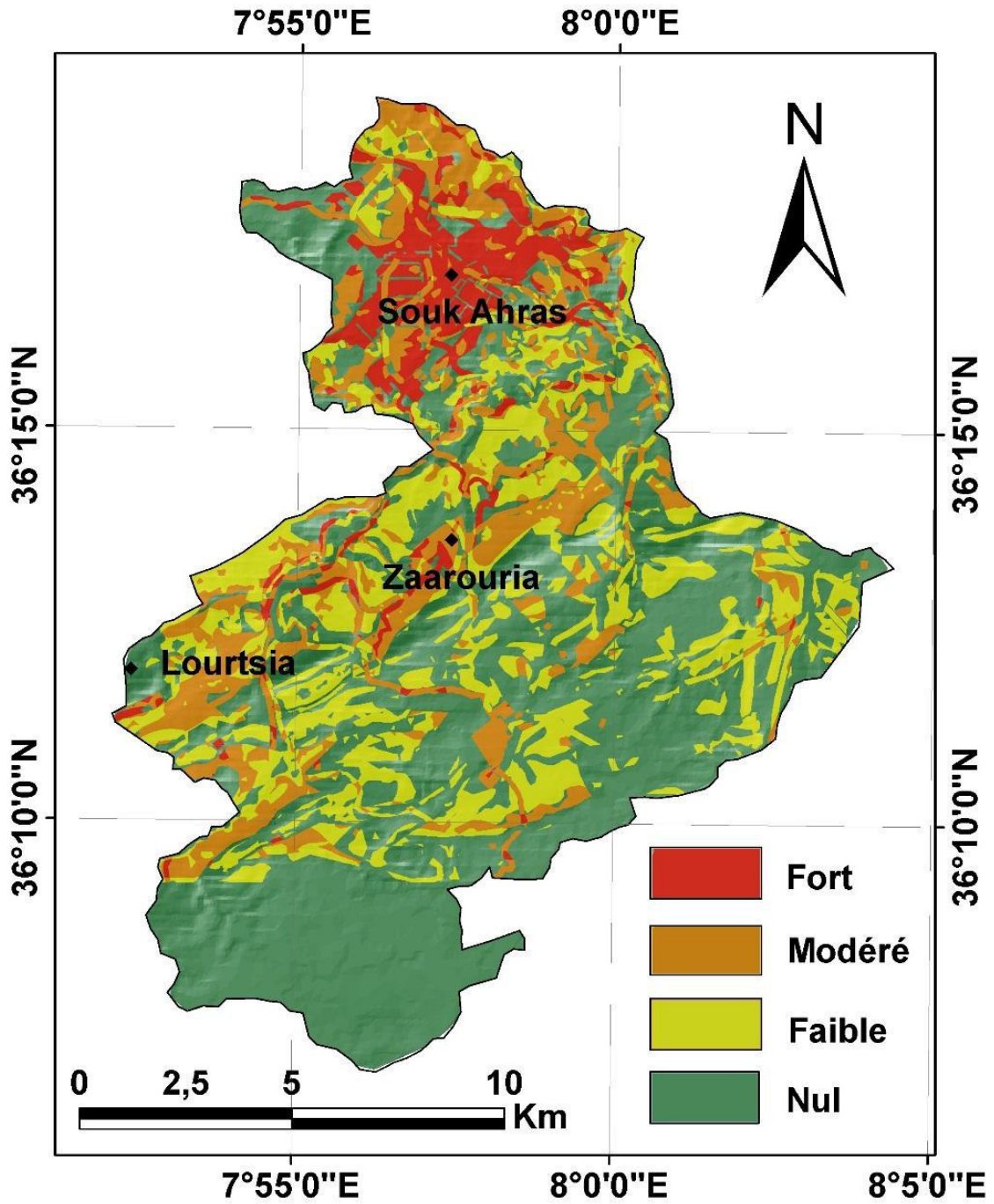


Figure VI-20 : Carte de risque aux glissements de terrain de la zone d'étude.

7. Conclusions

La présente recherche démontre les potentialités de la géomatique et des techniques d'analyse par SIG dans l'évaluation du risque glissement de terrain à partir d'une procédure à trois étapes, où le risque est identifié et cartographié en associant l'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité.

L'inventaire des glissements de terrain à travers la zone d'étude (1,06 événement/Km²) a permis d'évaluer qualitativement et quantitativement l'ampleur de ces instabilités : quantitativement par une visu-interprétation de photos satellitaires multi-dates ; et qualitativement grâce à la détermination des signes d'instabilités sur les versants de la zone d'étude. Différentes mesures ont été réalisées, afin de spécifier les facteurs locaux de contrôle de la dynamique de ces instabilités. Toutes ces informations ont été stockées dans une base de données sous Arcgis 10.

Le géo-traitement des facteurs causaux retenus (interprétant le contexte géologique, les conditions géomorphologiques, le réseau hydrographique, les précipitations, l'occupation de sol, les événements passés, etc.) a permis de modéliser les effets spatio-temporels des différents variables catégoriques impliqués dans la genèse des instabilités. Le calcul *Raster* a permis de réaliser des cartes de zonage de l'aléa, de vulnérabilité et de risque glissement de terrain. Le chef-lieu de wilaya (où se concentrent les enjeux) se trouve entouré de terrains fortement susceptibles au phénomène. Cette situation nécessite l'instauration de la culture des géo-risques chez les décideurs concernés par l'aménagement de territoire. Ce genre d'approches contribue à combler le vide technico-juridique de la considération intégrée de l'aléa glissement de terrain dans les plans d'occupation du sol. Cette méthode peut servir de système d'information pour la gestion du risque glissement de terrain dans la zone d'étude. Elle peut être reproduite par d'autres études pour estimer l'aléa, la vulnérabilité et le risque glissements de terrain dans des environnements similaires.



CHAPITRE V

METHODES DE CONFORTEMENT

1. Introduction

Les calculs de stabilité des pentes sont couramment réalisés par des méthodes d'équilibre-limite qui reposent toutes sur un certain nombre d'hypothèses et d'approximations (Durville et Sève, 1996; Faure, 2001). La modélisation numérique à l'aide d'un calcul en déformation permet une autre approche du problème; elle nécessite elle aussi des hypothèses, en particulier sur les lois de comportement des sols et sur les conditions aux limites (Duncan, 1996; Lane et Griffiths, 1997 ; Magnan et Mestat, 1999). L'objectif du présent chapitre est de comparer les résultats des approches par équilibre-limite et en déformation sur plusieurs configurations de remblais naturel et soutenu. En effet, on peut considérer que le calcul classique de l'ingénieur est bien validé en rupture circulaire, à la fois par comparaison avec des calculs en déformation, par quelques expérimentations en vraie grandeur et par la pratique de l'ingénieur.

L'évolution de la technologie amène l'ingénieur à réaliser des projets de plus en plus complexes, coûteux et soumis à des contraintes de sécurité de plus en plus sévères. Pour réaliser ces projets et vu la complexité des méthodes analytiques de la résistance des matériaux. L'ingénieur a recours aux méthodes qui lui permettent de simuler le comportement des systèmes physiques complexes. Suite aux progrès effectués dans le domaine informatique et les acquis des mathématiques dans la théorie de l'énergie, des méthodes de projection et des méthodes d'approximation... la méthode des éléments finis (MEF) est devenue éventuellement la plus performante des méthodes numériques vu son grand champ d'application où elle est utilisée dans de nombreux secteurs de l'industrie : aérospatiale, nucléaire, génie civile, travaux publics, construction, mécanique, technique off-shore, etc.

La méthode des éléments finis est donc une technique récente à caractère pluridisciplinaire car elle met en œuvre les connaissances de trois disciplines de base :

1. La mécanique des structures : élasticité, résistance des matériaux, dynamique, plasticité, etc.
2. L'analyse numérique : méthodes d'approximations, résolution des systèmes linéaires, des problèmes aux valeurs propres, etc.
3. L'informatique appliquée : techniques de développement et de programmation de grands logiciels.

Dans ce chapitre nous adoptons deux méthodes déterministes basées sur les analyses de stabilité de pente prenant en compte les paramètres physico-mécaniques de terrain (méthode d'équilibre limite, méthode des éléments finis, etc.). Ces méthodes sont précises et objectives et peut couteuses et leurs applications se limitent à des petites zones ou à l'échelle du site à cause de l'exigence de données physico-mécaniques comme "Input" requérant de grand moyens d'investigation.

2. Le site pilote de l'étude

Parmi les terrains les plus touchés par de glissement de terrain on note le secteur de Hammam Tassa commune de Zaarouria, wilaya de Souk Ahras. Notre étude a choisit le glissement du Pk 114 + 880 sur la route nationale numéro RN0°81 (8°14'28"N 36°14'19"E Alt 1590m) comme site pilote assez représentatif des glissements de terrain de notre zone d'étude. Une niche d'arrachement est bien individualisé, un escarpement est clairement spécifié et un affaissement de la chaussée est mesurable.

Un programme de reconnaissance, réalisé sur le site par la Société des études techniques d'Annaba (SETA) comporte des essais *in situ* et au laboratoire. Des sondages au pénétromètre dynamique atteignant les neuf mètres de profondeurs suivant un profil passant par l'axe du glissement, ont dévoilé une résistance de pointe entre 10 et 60 bars dans les colluvions et jusqu'à, 200 bars au refus marno-calcaire. Sur des carottes fraîchement extraites des trois sondages (SC1, SC2, SC3) passant par l'axe de la route (au niveau de la RN81, PK 144+880) dépassant 26 m de profondeur; des essais à la boîte de Casagrande (visant à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan de cisaillement imposé), des essais œdométriques, des analyses granulométriques, les limites d'Atterberg, VBS, des mesures de densité sèche et de la teneur en eau, etc. ont été réalisé au laboratoire.

9 échantillons intacts prélevés des sondages (SC 1, SC 2 et SC 3) ont été soumis à des essais d'identification. Les valeurs de W_L et I_p montrent une variation de la limite de liquidité de 34% à 60 % et de l'indice de plasticité de 13% à 36%, se qui décrit ces faciès comme des argiles inorganiques de plasticité moyenne à élevée composés essentiellement d'Illite. L'importante proportion de la granulométrie fine explique la diminution de l'angle de frottement interne et l'accroissement de la cohésion. Les travaux effectués par (Blondeau et Pilot 1971) ont montré que lors de la dominance de l'illite, l'indice de plasticité I_p avoisine les 20% et l'angle de frottement interne ϕ

dépasse les 15°. La présence de la kaolinite peut passer I_p de 20% à 35%, et décliner ϕ de 15° à 10°. Une forte proportion de montmorillonite peut descendre ϕ jusqu'à 6°. L'abaque de Casagrande (classification, LCPC) montre que le sol varie d'une argile sableuse à une argile plastique (Fig. V-1), (tableau V-1).

Tableau V-1: Classification des sols du secteur Hammam Tassa.

Sondage N°	N°	Prof (m)	W_L	W_p	I_p	I_c	Classe de sol
SC1	1	3-4	60	28	32	0,97	Argile Plastique
	2	5-7	34	19	15	1,03	Argile Sableuse
	3	8-13	38	22	15	1,57	Argile Limoneuse
SC2	4	5-6	64	23	36	1,05	Argile Plastique
	5	9-10	63	28	35	1,08	Argile Plastique
	6	12,5-13	62	28	34	0,85	Argile Plastique
SC3	7	1,5-3	58	28	30	1,30	Argile Plastique
	8	6-7	54	24	30	1,13	Argile Plastique
	9	12-13	36	23	13	1,20	Argile Sableuse

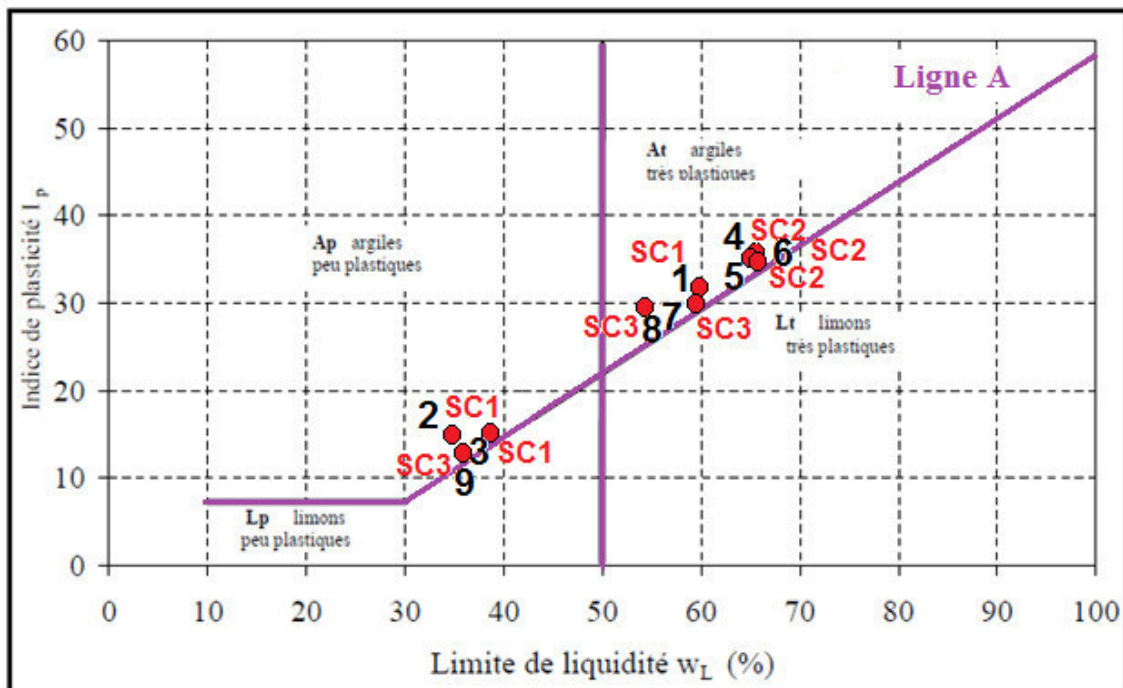


Figure V-1: Classification des sols suivant l'abaque de Casagrande du site de l'étude.

Les caractéristiques géotechniques des formations rencontrées par les trois sondages, montrent qu'à l'exception du poids volumique sec, les caractéristiques balancent en fonction de la profondeur, (Fig. V-2).

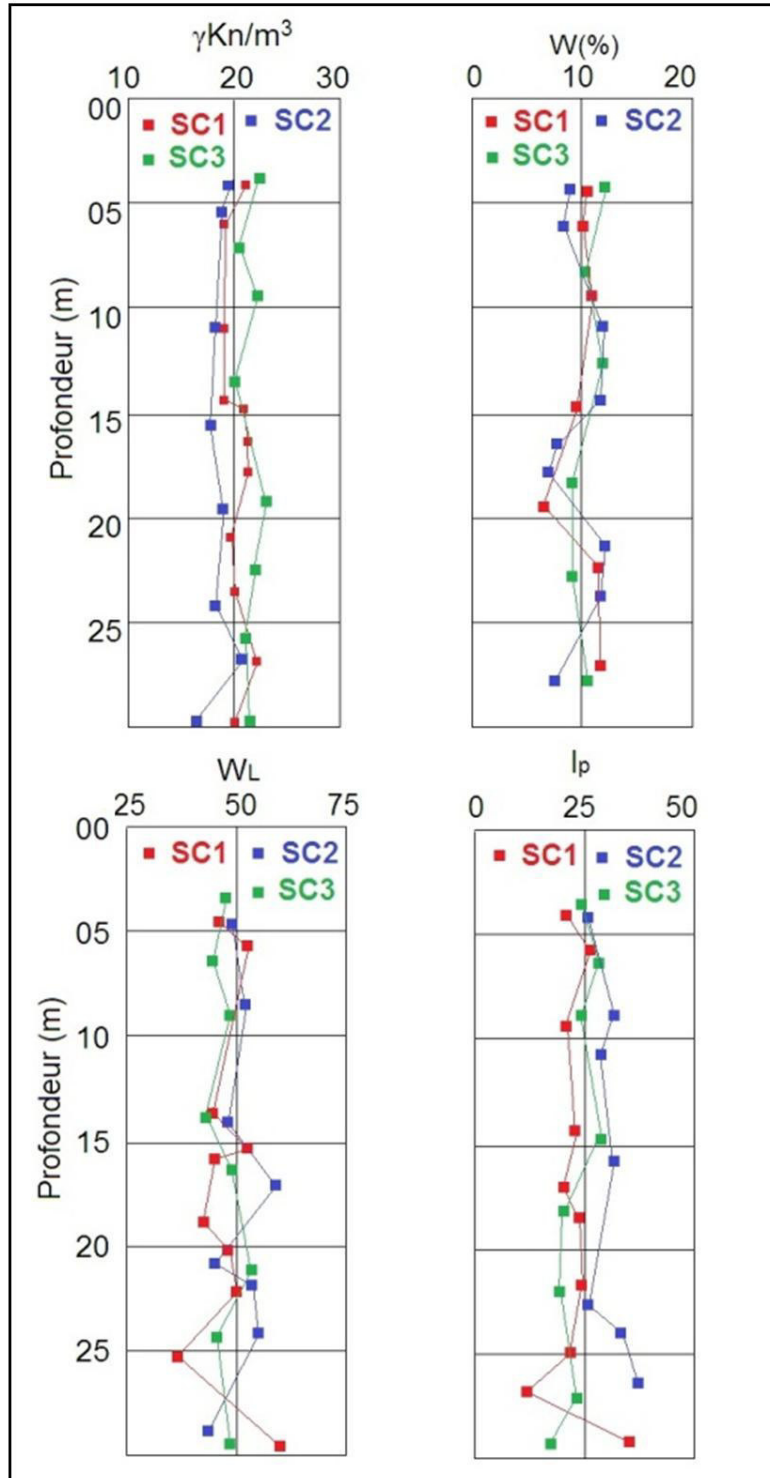


Figure V-2 : Caractéristiques géotechniques en fonction de la profondeur du site, (PK 144+880 RN°81).

2.1. Interprétation des données géotechniques

Les essais physico-mécaniques *in situ* ont donné des valeurs de l'angle de frottement interne comprises entre 16 et 34° et de la cohésion entre 0.51 et 1.20 bars. Ce large intervalle de valeurs témoigne la grande variabilité du comportement des sols constatée pendant la campagne d'investigation préliminaire.

Le traitement statistique de la variété de données issue des essais au pénétromètre dynamique sont représentée dans le (Tableau V-2). Les valeurs représentatives calculées pour chaque couche servant de donnée d'entrée dans le calcul de stabilité sont représentée dans ce tableau.

Tableau V-2: Paramètres issue des essais au pénétromètre dynamique.

	C (bars)	ϕ (°)
Nombre d'échantillons	9	9
Valeur moyenne	0.855	13.80
L'écart quadratique σ	0.141	8.13
Valeur minimale	0.51	4.00
Valeur maximale	1.20	24.00
Coefficient de variation	0.59	0.68

La géométrie de terrain dans le Pk 81+880 RN 81, décrit un profil avec une intercalation de trois formations lithologiques: une couche d'argile limoneuse, une couche d'argile marneuse et un substratum de marne compacte.

2.2. La solution de renfort suggérée

L'utilisation d'un géotextile de renfort s'est avérée indispensable pour stabiliser le talus Pk 81+880 RN 81, site Hammam Tassa, commune de Zaarouria, wilaya de Souk Ahras. Le renforcement est supposé être assuré avec un géotextile non-tissé en fibres de polyester marque "Bidim", avec un coefficient de sécurité vis-à-vis de la traction ($F_t \geq 6$). Les caractéristiques de l'ouvrage retenu par l'étude sont : une longueur de nappe de 4,5m à partir de l'extérieur, un espacement des lits dans le massif renforcé de 0,70m intercalées avec trois couche de remblai de 0,25m d'épaisseur chaque sur une hauteur totale de 13m. Le profil type du massif renforcé retenu était composé de 19 lits de renforcement avec un retour situé en partie inférieure d'un mètre de longueur. Les nappes en géotextile sont posées horizontalement à l'intérieur du remblai compacté

pendant sa construction. Une mise en œuvre précise des nappes sur une longueur de 50 m le long du tronçon; en assurant une bonne interaction avec le sol est exigée. Les performances d'un renforcement du sol par des géosynthétiques par rapport à une conception similaire non renforcée sont comparées. Le profil en travers du (Pk 240+847) a été pris comme modèle d'application pour notre étude.

Ce type de soutènement permet aux sols de soutenir des charges plus importantes et de résister à des angles plus prononcés. Un gain en durée de vie de l'ouvrage, une amélioration des caractéristiques géotechniques du sol tout en augmentant les caractéristiques mécaniques, et la possibilité de construction dans des milieux défavorables, sont aussi enregistrés.

La modélisation numérique s'avère indispensable pour pouvoir calculer le coefficient de sécurité avec les conditions réelles du terrain, et/ou d'effectuer une prévision de la stabilité en variant les forces relatives à l'ensemble de facteurs de prédisposition et de déclenchement des mouvements de pentes.

3. Concepts de base de la MEF

La méthode des éléments finis consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini d'éléments ou de composants discrets qui représentent un maillage. Ces éléments sont liés entre eux par un nombre de points appelés nœuds. On considère d'abord le comportement de chaque partie indépendante, puis on assemble ces parties de telle sorte qu'on assure l'équilibre des forces et la compatibilité des déplacements réels de la structure en tant qu'objet continu.

La MEF est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions de charges compliquées tel que les ouvrages d'art et les remblais routiers. Elle nécessite un grand nombre de calculs qui, cause de leur nature répétitive, s'adaptent parfaitement à la programmation numérique.

L'analyse de projets géotechniques est possible grâce à de nombreux codes éléments finis. L'ingénieur ayant de l'expérience en ce domaine sait que le poids des hypothèses permettant le passage de la réalité au modèle est difficile à évaluer. Il sait que le jargon éléments finis est parfois rebutant-il souhaiterait ne pas avoir à intervenir sur la numérotation des nœuds, des éléments, sur certains choix réservés au numéricien. Il voudrait disposer du code sur le PC gérant sa bureautique et sa technique quotidiennes, afin de faire une étude paramétrique des problèmes délicats. Il exige avant tout que ses journées ne soient pas encombrées par de laborieuses entrées de données et interprétations de

fichiers. Plusieurs logiciels intégraux et conviviaux pour la vérification d'un large éventail de solutions géotechniques incluant le tassement du terrain, palplanches etc. ont prouvé leur efficacité dans le domaine de Génie Civile et Travaux publics. On peut dénombrer Cesar, RFEM, GEO5, Géostudio et Plaxis (2D ou 3D)...

3.1. Le code éléments finis PLAXIS

Conçu par des géotechniciens numériques (logiciel hollandais développé par l'équipe du Pr. Vermeer), le code éléments finis PLAXIS représente certainement un optimum actuel sur les plans scientifique et pratique en l'analyse pseudo-statique 2D. Scientifiquement, c'est un outil d'analyse non linéaire en élasto-plasticité non standard (5 paramètres), avec prise en compte des pressions interstitielles (et même consolidation linéaire), doté de méthodes de résolution et d'algorithmes robustes, éprouvés, ainsi que de procédures de choix automatique évitant des choix délicats à l'opérateur peu averti. Bien que très fiable sur le plan numérique, le code fait appel à des éléments de haute précision (triangles à 15 nœuds), ainsi qu'à des processus de pilotage de résolution récents (méthode de longueur d'arc).

Plaxis fournit une masse imposante de résultats : Des résultats directement utiles au projeteur : déplacements, contraintes, pressions interstitielles à un stade donné du chargement, et des résultats plus mathématiques concernant le déroulement du processus de calcul proprement dit. L'ensemble de ces résultats est accessible, selon que l'on est intéressé par l'un ou l'autre aspect ; c'est également un système de menu arborescent qui permet de sélectionner les informations souhaitées.

Pour traiter un problème de soutènement de remblais routiers comme c'est le cas de notre sujet de thèse, il est tout à fait adapté de considérer le sol comme élastoplastique et le modèle de Mohr-Coulomb sera bien adapté dans ce cas ; on rejoint ici le calcul des soutènements par les méthodes élastoplastiques de coefficient de raideur. Mais pour traiter d'une construction de remblai sur sols mous, avec chargement par étapes et consolidation, il faut tenir compte de l'érouissage. Le matériau se consolide et il est plus adapté d'utiliser le *Soft Soil Model* qui prend en compte cette évolution du matériau. Pour un calcul d'écoulement, il suffit de prendre un matériau élastique, mais on peut avoir à coupler écoulement et déformation ; dans ce cas un modèle élastoplastique peut être justifié.

La détermination des paramètres géotechniques à entrer dans Plaxis n'est pas différente d'un choix de paramètres de calcul *manuel* pour un calcul de tassement ou de stabilité :

à partir d'essais, il est indispensable d'arriver à ce que l'on pourrait appeler un modèle géotechnique de terrain. Certains des paramètres sont différents dans leurs expressions, mais toujours reliés à des paramètres géotechniques classiques. Le paramètre le moins courant est vraisemblablement l'angle de dilatance.

Le choix du modèle de comportement dépend en fait du problème posé : soutènement, tassement de remblai, fondation sur sol en pente, tunnel : quel modèle de comportement utiliser pour quel problème géotechnique ?

La question n'est pas simple car il n'existe pas de modèle universel.

3.2. Le système d'options du code Plaxis

- **Le Maillage:** l'opérateur peut bien entendu spécifier un maillage très détaillé, mais si seules les grandes lignes de celui-ci importent de détail des éléments, agencé de manière optimale du point de vue numérique, sera entièrement généré par le logiciel à partir d'un petit nombre de nœuds, avec un contrôle permanent à l'écran.

- **Les conditions aux limites en déplacement:** si celles-ci sont complexes, l'ingénieur devra spécifier les subtilités d'une manière précise (le vecteur déplacement est nul à la base du domaine étudié, et le vecteur déplacement horizontal est nul sur ses faces latérales), l'application peut être réalisée automatiquement (par défaut) à partir du menu avec un contrôle immédiat du résultat à l'écran.

- **Les contraintes initiales dues au poids des terres:** peut être réalisée de manière exacte par activation du multiplicateur de chargement relatif au poids propre.

- **Les pressions interstitielles:** ont été l'objet d'un soin particulier dans Plaxis pour qui souhaite faire un calcul précis du champ de pressions interstitielles.

4. Méthodes d'équilibre limite

Encouragées par l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs et la diminution des coûts d'accès et de mise en œuvre, les méthodes numériques ont connu un essor très important dans l'étude de la stabilité des talus/assises et des remblais/déblais des infrastructures de transport. Leur utilisation est aujourd'hui très courante et la conception de grands projets passe forcément par des analyses de ce type de calcul afin de vérifier la stabilité des ouvrages en interaction avec leur environnement, de contrôler que les valeurs des déplacements et des contraintes soient admissibles et d'aider au dimensionnement des structures.

Les méthodes d'équilibre-limite (présentées dans le chapitre II) sont largement employées dans l'évaluation de la stabilité des pentes, et remarquablement bien validées

en rupture circulaire. Dans ce chapitre, nous comparons la méthode des tranches et un calcul aux éléments finis, dans des cas de rupture circulaire. Deux cas de figure sont étudiés, outre un cas simple de talus homogène, et un , talus avec quatre variantes de soutènement. Avec des géomateriaux qui ont un comportement élastoplastique parfait, avec dilatance variable. Dans la plupart des cas, les deux approches donnent des résultats très voisins en termes de coefficients de sécurité. Les zones de plasticité se localisent principalement en bas de la surface de rupture donnée par la méthode des tranches, mais une déformation plastique au sein de la masse glissée est également présente.

Le comportement des sols est régi par les propriétés du squelette ; il est donc nécessaire d'utiliser des contraintes liées aux charges et surcharges et d'écrire des lois de comportement en contraintes effectives. La pression interstitielle générée dans les ouvrages est une conséquence du non variation de volume ; celle-ci est-elle même dépendante de la perméabilité du sol. Un sol pulvérulent peut être non drainé in situ sous des sollicitations sismiques (rapides) de même qu'une argile est toujours non drainée à court terme. Les variations de volumes empêchées par les perméabilités créent des pressions interstitielles ; en fait, celles-ci dépendent des variations de volume. Des calculs en contraintes totales sont possibles. Ils permettent par exemple, des calculs de tassements et de stabilité de remblai après construction. Ces calculs ignorent la génération de pressions interstitielles. Ils présentent l'avantage d'être simples et de se recalculer par rapport à des calculs plus classiques de stabilité à court terme. Leur inconvénient majeur est d'ignorer les pressions interstitielles, quand on connaît leur rôle majeur sur la stabilité de remblai.

5 Evaluation de la stabilité du profil (PK 144+880, RN81)

Considérant les enjeux économiques et sociaux dont fait face l'Algérie; le domaine de transport est d'une grande importance dans son développement. La majorité de ce réseau connaît des perturbations au niveau de son sous-bassement surtout dans les zones montagneuses (Fig. V-3). L'évaluation de la stabilité des assises des voiries et l'amélioration de leurs performances géotechniques est essentiel pour assurer leurs fonctionnalités. L'avenant de l'alliage en géosynthétique comme une nouvelle technologie est très avantageuse dans le domaine de l'ingénierie des travaux publics. Il fournit l'avantage d'un bon rapport masses/performances/prix pour la majorité des projets notamment si les infrastructures de transport sont sujettes à de grandes

conditions de chargement (Tang et al. 2007). La littérature géo-scientifique reporte que le sol peut être renforcé avec des couches géosynthétiques, fibres ou géogrilles, etc. (Ling et Tatsuoka 1993; Vercueil et Billet 1997; Haeri et al. 2000; Boominathan et Hari 2002; Wang et al. 2007; Houston et al. 2008). Depuis les quatre dernières décades, les travaux de recherche basés sur des essais expérimentaux ont largement traité le problème (Gray et Al-Rafeai 1986; Ashmawy et Bourdeau 1998). Nous présentons dans ce chapitre l'évaluation de la stabilité des terrain en pentes par différentes approches et le confortement d'un glissement de terrain qui s'est manifesté sur un tronçon de la route nationale RN81 (Pk 114 + 880) près de la station thermale de Hammam Tassa , wilaya de Souk Ahras (8°14'28"N 36°14'19"E alt 1590m). En effet ce chapitre a pour but de d'évaluer et de comparer l'effet stabilisateur de quatre variantes de renforcement à savoir: des nappes de géotextile, des pieux, un mur de soutènement type poids, et des tirants précontraints; afin de soutenir le talus du site en remblais dressé sous chargement statique. Le comportement mécanique et la réponse contrainte-déformation ont été évalué pour les quatre variantes.

L'approche passe par cinq étapes: i) la reconnaissance géologique et géotechnique du site; ii) l'échantillonnage et des essais d'identification, *in situ* et au laboratoire; iii) la reconstitution du profil géotechnique du site étudié et l'évaluation de sa stabilité; iv) la modélisation numérique de quatre variantes proposées par un code de calcul en éléments finis; v) et enfin la discussion des résultats et des recommandations.

Le site d'étude se situe dans la zone de montagne, de pente naturelle entre 20° et 35°. L'altitude varie de 1530m à 1660m, et le dénivellement entre 20m et 60m. Le sol est recouvert par une mince couche superficielle de terre végétale et de cailloux limoneux d'environ 3m. Les fissures des diaclases millimétriques sont bien développées dans le corps de chaussée; avec une intercalation entre 20mm et 100mm. Le substratum est en mauvaise intégralité, avec des roches relativement molle, facilement altérable. Elles pourront ramollir, fragmenter et dégrader en contact avec de l'eau. Des berges se trouvent sur le site et les ravins sont bien développés.

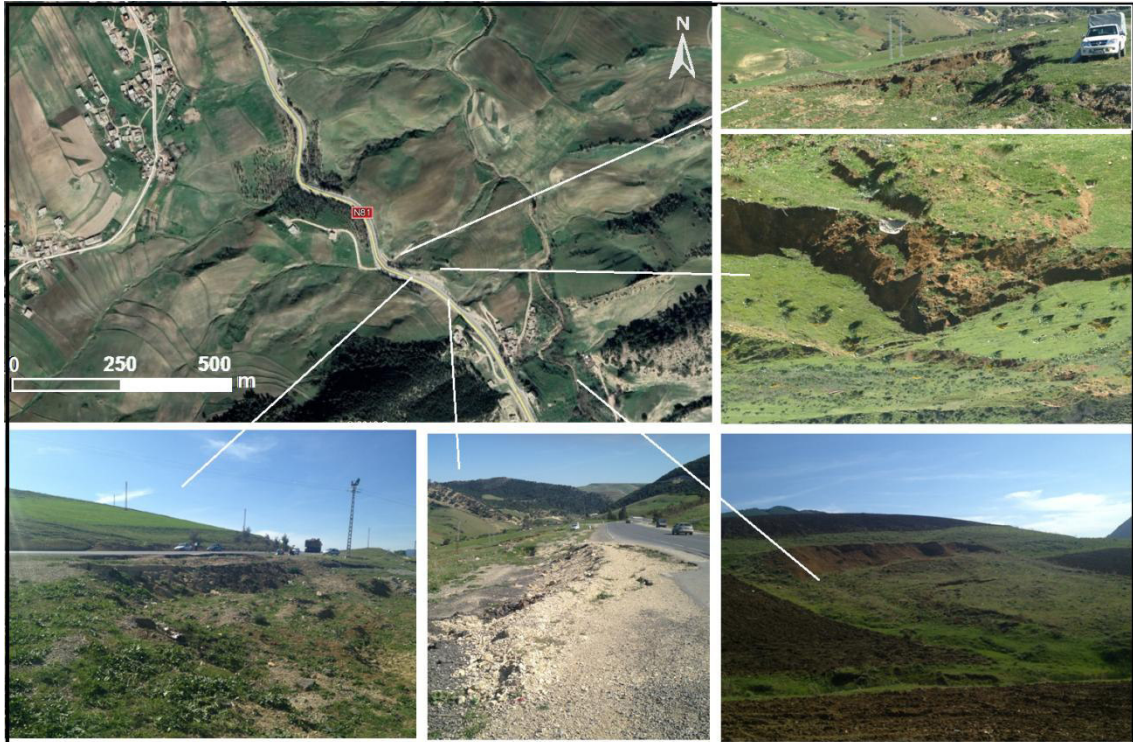


Figure V-3: Manifestation de différentes instabilités de terrain sur le site d'étude.

5.1. Méthodologie de l'approche

5.1.1. Reconnaissance géotechnique

Localement les formations géologiques observées lors de la campagne de reconnaissance sont de haut en bas: cailloux limoneux; argile limoneuse; argile marneuse, et marne grise altérée. L'analyse granulométrique et l'essai aux limites d'Atterberg sur les échantillons prélevés dans les puits de reconnaissances montrent que la formation des cailloux limoneux sont constitués par des résidus de l'altération des marnes. La classification GTR (guide des Terrassement Routiers), (Jullien, et al. 2007) range le substratum dans la classe "R34", et la couche d'argile limoneuse dans la classe "A2". Les essais de pénétromètre dynamique montrent que la couche du sol en surface est lâche. Le refus étant à la limite des marnes, le substratum marneux a une bonne capacité portante vis-à-vis du système de fondation. Les paramètres géotechniques et élastiques ont été déterminés à l'aide d'essais de cisaillement à la boîte de Casagrande (conditions non drainée) et les essais de résistance à la compression réalisés en laboratoire sur les échantillons prélevés dans les sondages géotechniques. Les valeurs sont résumées dans le tableau V-3.

Le profil géotechnique du site tel que déterminé par les reconnaissances révèle une coupe en pente d'environ de 19°. La nappe est de profondeur variable avec une moyenne autour de 5m et une tendance à l'écoulement dans le sens du talus (Fig. 3).

Tableau V-3: Caractéristiques géotechniques des formations rencontrées par les sondages SC1, SC2, SC3, au niveau de RN81, PK 144+880.

N°	Couche	γ_h (KN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)	E (kN/m ²)	ν
1	Cailloux limoneux	18	5	25	12000	0.30
2	Argile limoneuse	17,5	16	18	15000	0.32
3	Argile marneuse	18,7	25	20	45000	0.35
4	Marne grise altérée	21,4	30	25	95000	0.36

5.1.2. Analyse de la stabilité au glissement du talus

Nous avons utilisé la méthode d'équilibre limite (Bishop, Morgenstern et Price, Jumbu, Ordinaire), (Islam et Hooque, 2014) en considérant une surface de rupture circulaire afin d'étudier la stabilité au glissement du profil en travers du (Pk 114 + 880 RN81). Le calcul de stabilité a été effectué à l'aide du logiciel Geostudio-Slope/W-2012.

Les coefficients de sécurité retenus sont : $F \geq 1,5$ à long terme en période de service et $F \geq 1,2$ pour la combinaison accidentelle (sismique). Le séisme est pris en compte en procédant à un calcul en équivalent statique. Les coefficients horizontal et vertical sont: $K_h = 0,5A$ et $K_v = \pm 0,5K_h$.

Les résultats de l'évaluation de l'équilibre montrent que le talus n'est pas stable. Le coefficient de sécurité calculé est inférieur à 1 ($F_s = 0.932$ Bishop, $F_s = 0.934$ Morgenstern et Price, $F_s = 0.910$ Jumbu, $F_s = 0.916$ Ordinaire). Le cercle de glissement longe l'interface marne totalement altérée-marne altérée (Fig. V-4a). Le glissement concernerait une superficie de l'ordre de 4000m² et un volume d'environ 300000m³. Ceci nous conduit à supposer que la cause principale du glissement, en plus des conditions géomorphologiques et géotechniques du site est la présence de la nappe phréatique. Sur le même profil; la simulation numérique en utilisant le code de calcul en MEF (méthode des éléments finis) confirme le résultat obtenu par la méthode en équilibre limite. Un déplacement entre 0.4 et 0.6m est observé le long de la zone instable (Fig. V-4b). Les différentes valeurs du coefficient de sécurité du talus étudié sont montrées dans le tableau V-4.

Tableau V-4: Valeurs de coefficient de sécurité entre différentes méthodes classiques et la méthode des éléments finis

Méthode	Coefficient de sécurité
Bishop (équilibre limite)	$F_s=0.932$
Morgenstern et Price (équilibre limite)	$F_s=0.934$
Jumbu (équilibre limite)	$F_s=0.910$
Ordinaire (équilibre limite)	$F_s=0.916$
Phi reduction (MEF/Plaxis)	$F_s= 0.890$

Nous avons étudié l'influence de pendage de roche sur l'équilibre du talus suivant la combinaison des faces structurales obtenue avec la projection stéréographique. Cela a permis d'identifier les pendages favorables et défavorables et les risques du glissement local.

Suivant la projection stéréographique du talus, la pente du talus étudiée est parallèle à celle de la face défavorable; la stabilité locale du talus n'est assurée.

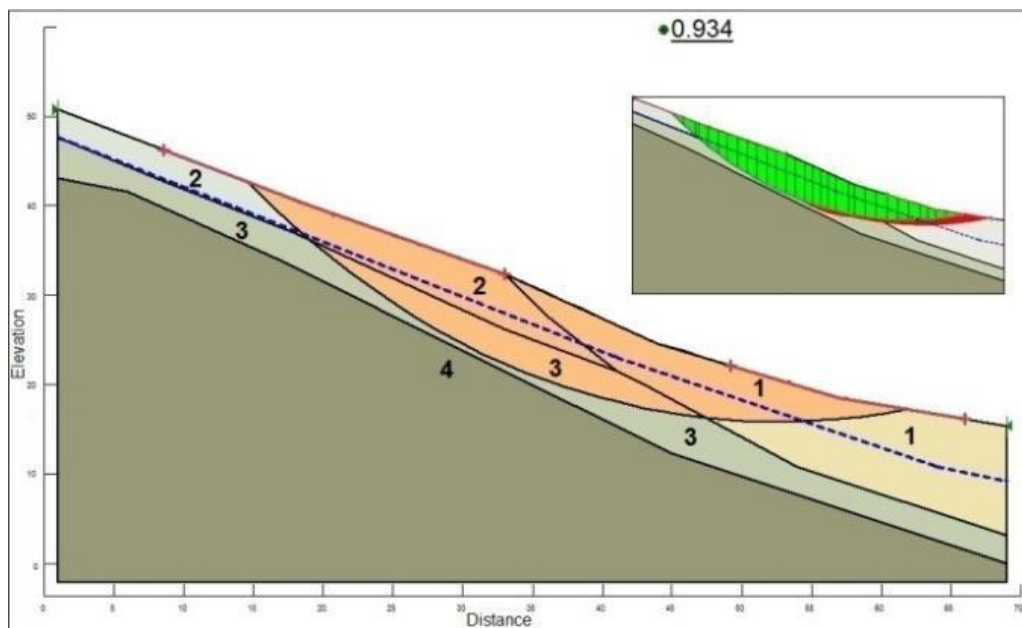


Figure V-4 a: Evaluation de la stabilité du profil en travers au PK 144+880 RN81, (Geoslope).

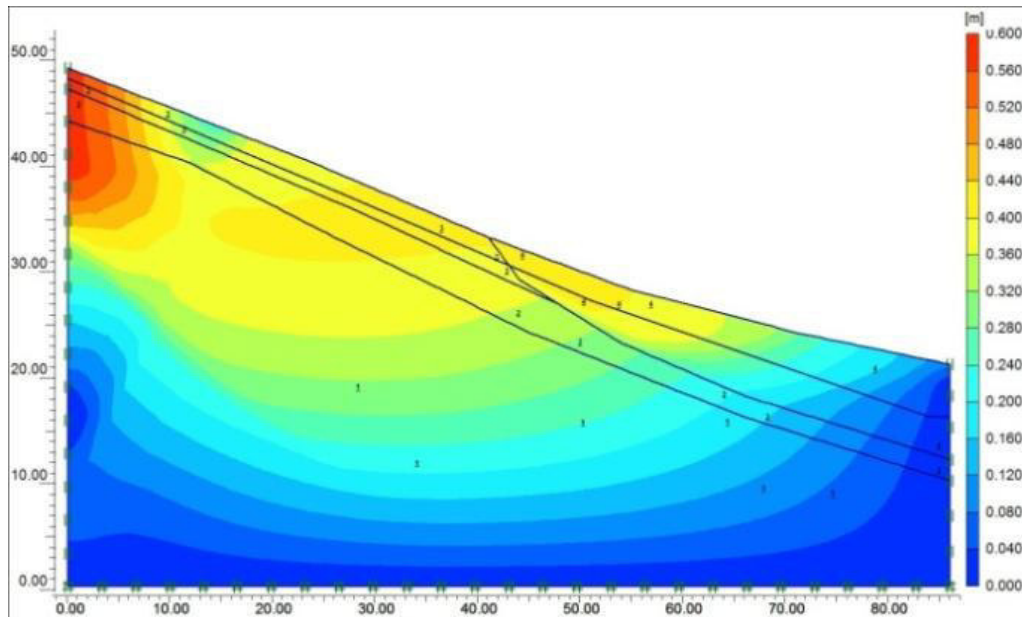


Figure V-4 b: les déplacements totaux (MEF) du talus du talus au PK 144+880, RN81, (Plaxis V8.6)

5.2. Amélioration de la stabilité par renforcement

La méthode des éléments finis est certainement l'approche la plus complète pour l'étude du comportement géotextiles-talus, murs-talus, tirants-talus et pieux-talus, parce que cette méthode résout simultanément la réaction des inclusions de renforcement et les contraintes-déformation développées dans le talus. Les résultats de cette modélisation sont exprimés par l'intermédiaire de figures de déplacement total (total displacement), contrainte de cisaillement (shear stress) et déformation de cisaillement (shear strain) et les points de déformation irréversibles (plastic points). Pour les conditions initiales, les déplacements sont nuls et les contraintes initiales sont égales aux contraintes provoquées par le terrain sous son propre poids. On utilise dans ce cas la loi de comportement élasto-plastiques de Mohr-Coulomb (5 paramètres avec la dilatance $\psi = \phi - 30$). L'analyse du comportement du talus est prise en mode drainé. Le modèle bidimensionnel est calculé en déformations planes dans le profil en travers d'une section de talus. Il est constitué de 4344 éléments triangulaires à 15 nœuds et à 12 points de Gauss et de 5-node line et 4-point Newton-Cote pour les géotextiles.

Dans notre étude quatre variantes sont proposées pour le confortement du glissement de terrain: Remblai renforcé par des nappes de géotextile, mur de soutènement poids, pieux et tirants précontraints. Trois types de paramètres sont pris en considération, à savoir : les paramètres de calcul (modélisation); les paramètres géotechniques; et les paramètres mécaniques des inclusions.

Pour les géosynthétiques on a utilisé des nappes à bases de fibres polymères de type BidimS72 avec une intercalation initiale de 1 m pour l'étude de l'effet des nappes de géotextiles sur la stabilité du talus. L'étude paramétrique sera ensuite exécutée sur le même modèle géotechnique du talus en augmentant le nombre des rangées de géotextiles.

Pour les pieux, le diamètre est pris égal à 0,8m sur une profondeur de 20m. Ils sont espacés de 2m d'intervalle dans le sens de la largeur et de 17 m dans le sens de la longueur. Une dalle de répartition des charges leur a été incorporée. La résistance nominale du béton utilisé pour les pieux, est de 35 MPa alors que le module de Young est de $E=36000$ MPa. Le poids volumique retenu pour le béton est de 25 kN/m^3 .

Pour les murs de soutènement type poids, les géométries proposées sont $3*8\text{m}$. Ces murs sont modélisés en comportement élastique, le module de Young est de $E=33000$ MPa, le coefficient de Poisson est pris égal à 0,3. La résistance nominale du béton utilisé est de 27 MPa.

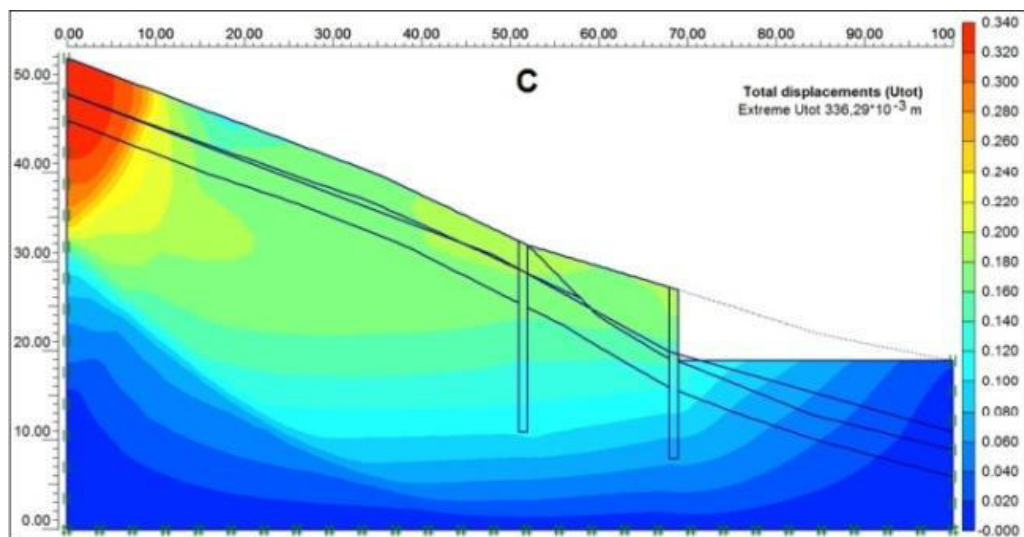
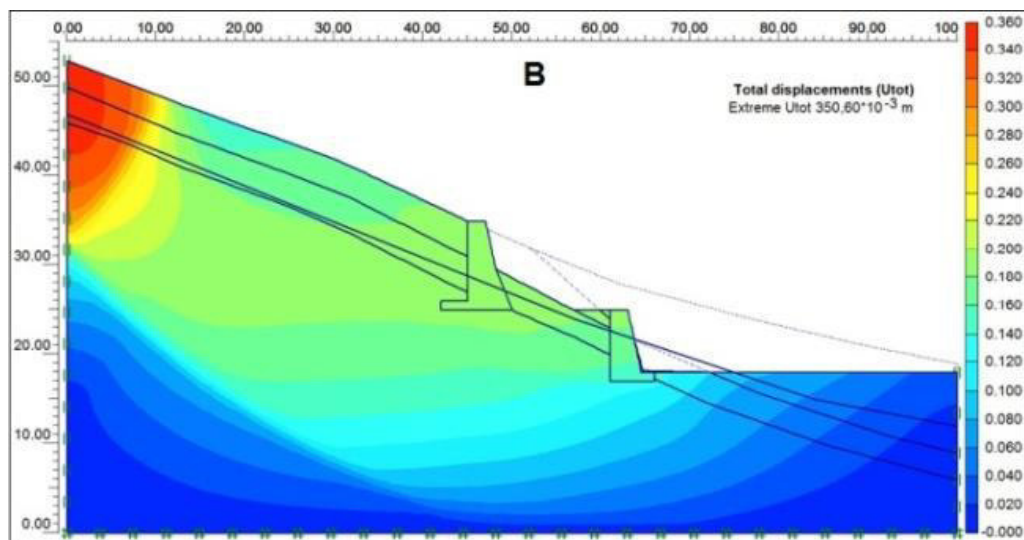
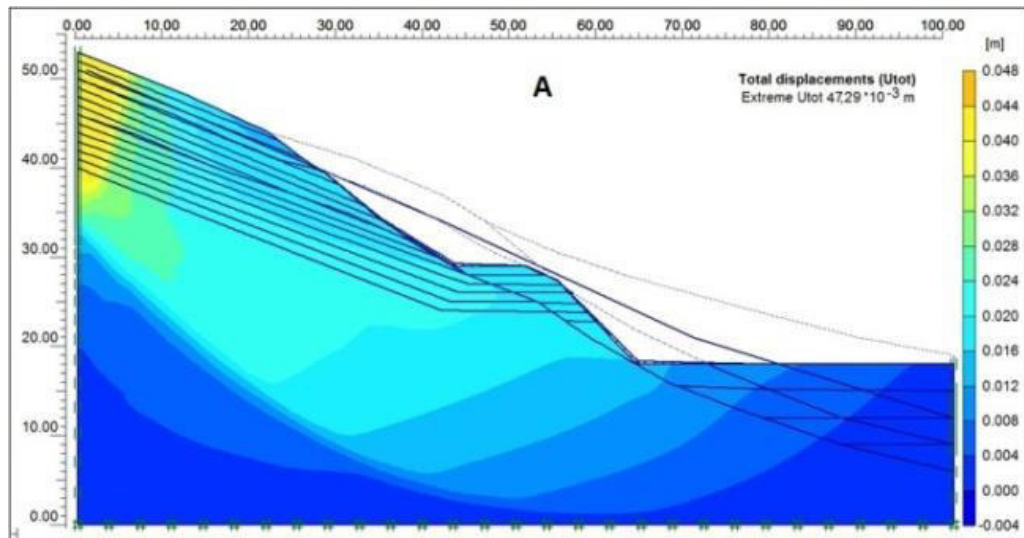
Pour les tirants d'ancrage, le dispositif est constitué par 8 armatures ordinaires, inclinés à 30° dans la direction de l'amont, espacé de 3m dans le sens vertical et de 8 m dans le sens latéral, ancrées à 10m dans le terrain. Ils permettent de transmettre les forces de traction qui leur sont appliquées par scellement à la couche de marne en prenant appui sur la structure à ancrer (parois du soutènement vertical). Une fois mis en place; ils sont ensuite mis en traction à 100kN/m . Les quatre propositions de confortement du talus ont fait l'objet d'une modélisation statique à l'aide du logiciel Plaxis V8.6. Elles ont été soumises à une charge permanente. Les surcharges d'exploitation des véhicules sur la chaussée sont prises égales à 10 kN/m^2 et sont disposées à 1,50 m du bord de la chaussée. Le chargement sismique appliqué est une PGA (Peak Ground Acceleration) de 0,2g. La comparaison entre les résultats de toutes ces combinaisons permet de sélectionner le confortement le plus efficace d'entre tous.

5.3. Résultats et discussion

L'analyse des résultats obtenus par la modélisation numérique par MEF en 2D et les graphes de déplacements, plusieurs constatations peuvent être déterminées.

Bien que diverses simulations ont été effectuées, nous ne présentons que les déformées des quatre configurations. Ces déformées sont données sur les figures V-5 et V-6. Nous donnons aussi les figures V-7 et V-8 représentant les déformations et les contraintes

tangentielles. Ces figures sont celles qui présentent le plus d'intérêt au niveau des comparaisons.



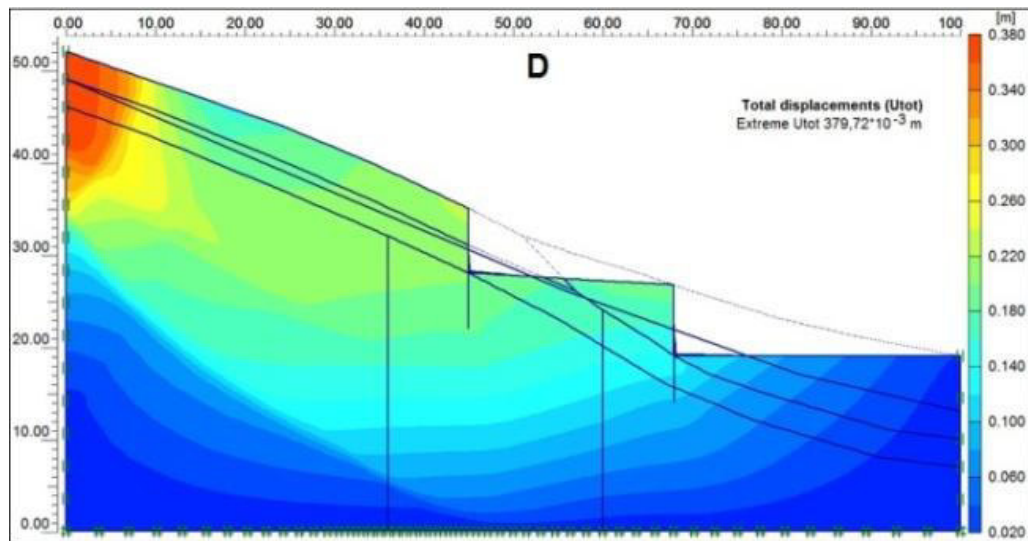
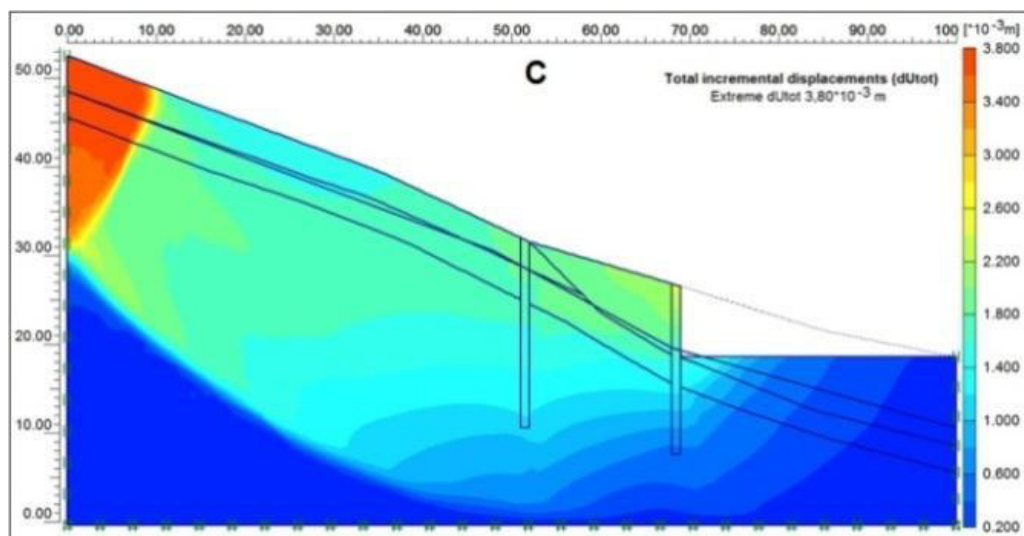
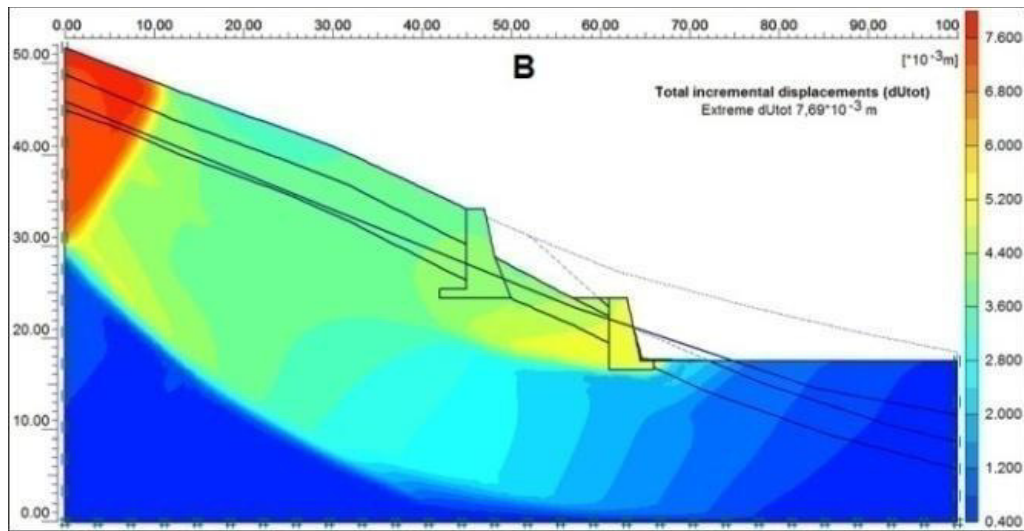
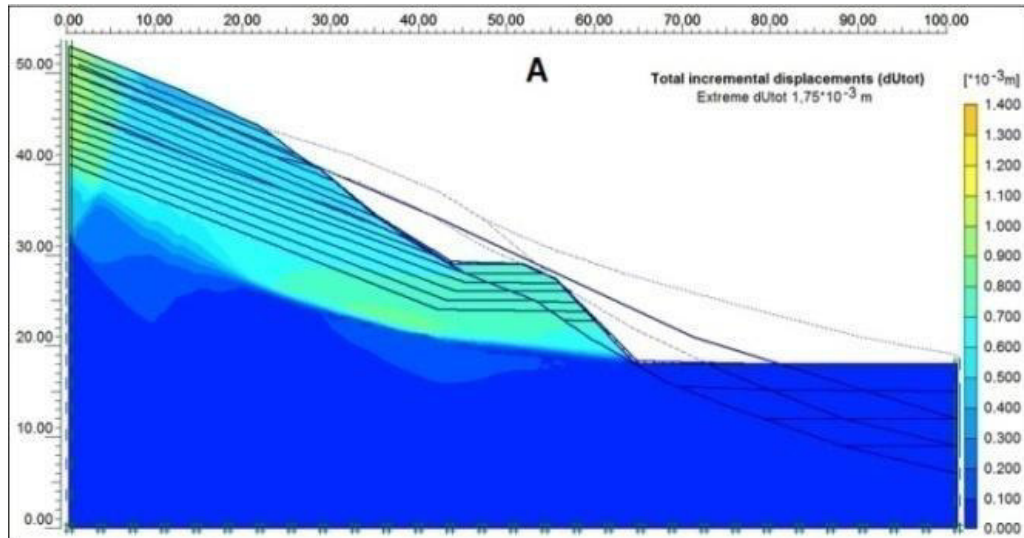


Figure V-5 a: Déplacements totaux de la configuration talus renforcé par des géotextiles, b: Déplacements totaux de la configuration mur de soutènement-talus. c: Déplacements totaux de la configuration pieux-talus. d: Déplacements totaux de la configuration tirants d'ancrage-talus.

Les résultats montrent que la valeur du déplacement total extrême (U_{tot}) atteint les $47,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pour la configuration talus renforcé par des géotextiles (Fig. V-5a). Il s'élève à $350,60 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pour la configuration talus soutenu par des murs type poids (Fig. V-5b); et à $336,29 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pour configuration talus renforcé par des pieux (Fig. V-5c); pour atteindre $379,72 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ pour la configuration talus soutenu par des tirants d'ancrage (Fig. V-5d). Ces résultats démontrent que les déplacements extrêmes et/ou moyens sont acceptables pour la configuration talus renforcée par des géotextiles. Les trois configurations restantes présentent des déplacements sept fois plus élevé que le renforcement par géotextiles. Les valeurs sont au voisinage de $350 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ ce qui constitue des déplacements inadmissible pour l'ouvrage.



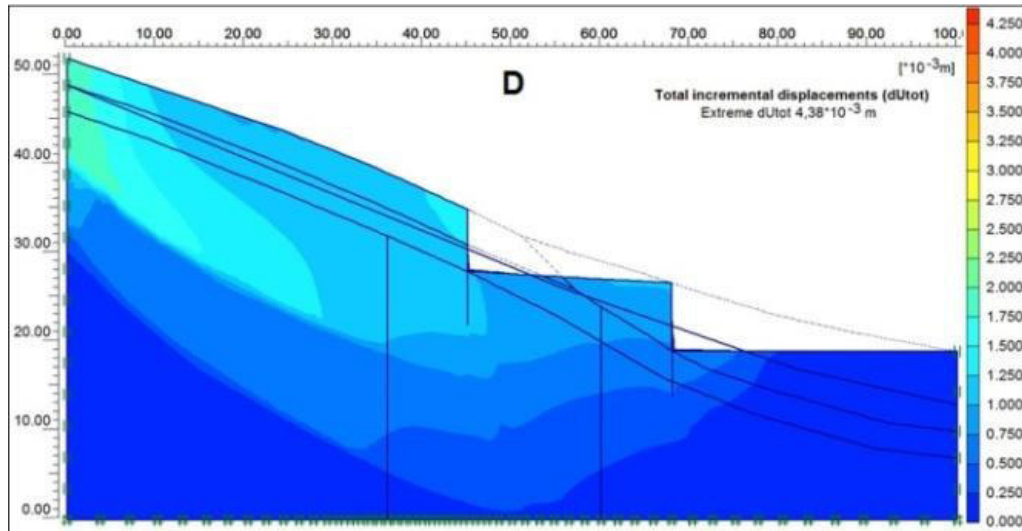
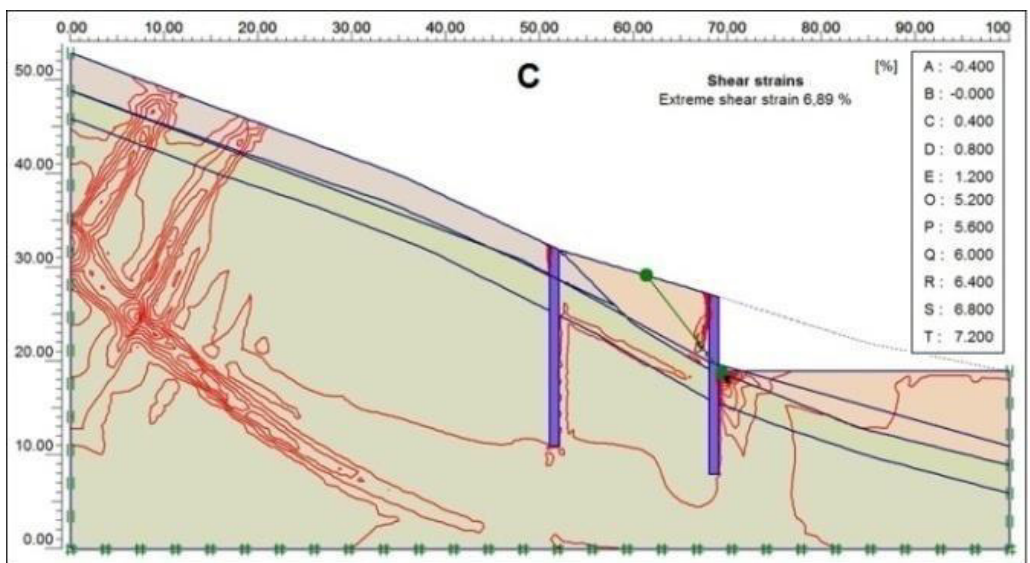
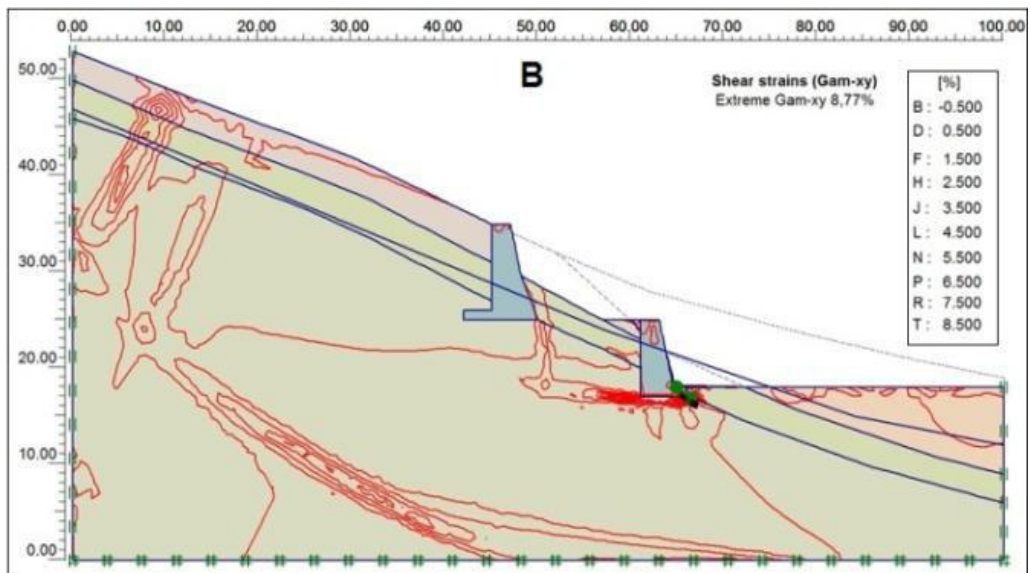
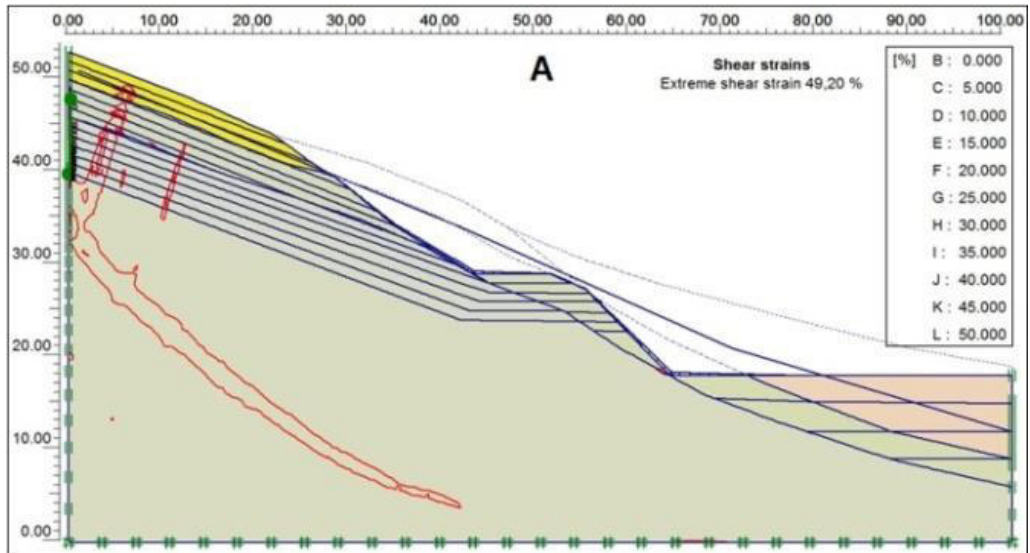


Figure V-6 a: Déplacements incrémentaux de la configuration talus renforcé par des géotextiles, b: Déplacements incrémentaux de la configuration mur de soutènement-talus. c: Déplacements incrémentaux de la configuration pieux-talus. d: Déplacements incrémentaux de la configuration tirants d'ancrage-talus.

Les résultats précédents sont soutenus par les incréments des déplacements totaux qui présentent des valeurs très admissibles ($dU_{tot}=1,75*10^{-3}m$) pour le talus renforcé par des géotextiles (Fig. V-6a) tandis que pour les trois configurations restantes ils atteignent $7,69*10^{-3}m$; $3,80*10^{-3}m$ et $4,38*10^{-3}m$ respectivement (Figs V-6 b, c, d). Ces valeurs sont jugées trop excessives pour assurer une stabilité à long terme du talus étudié. Les résultats de déplacement avancent la configuration renforcement par des géotextiles comme la solution la plus avantageuse pour le soutènement du talus du Pk 144+880, RN81.



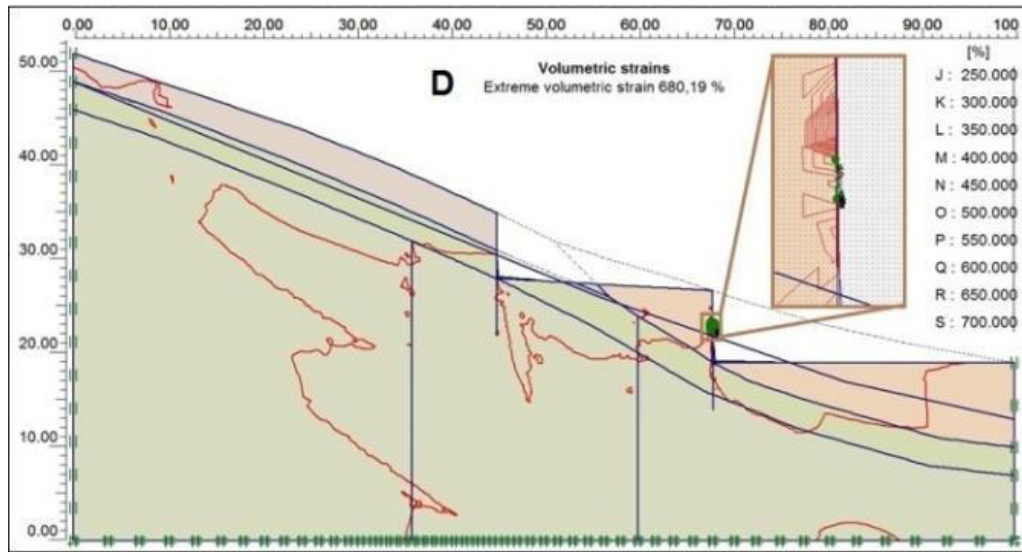
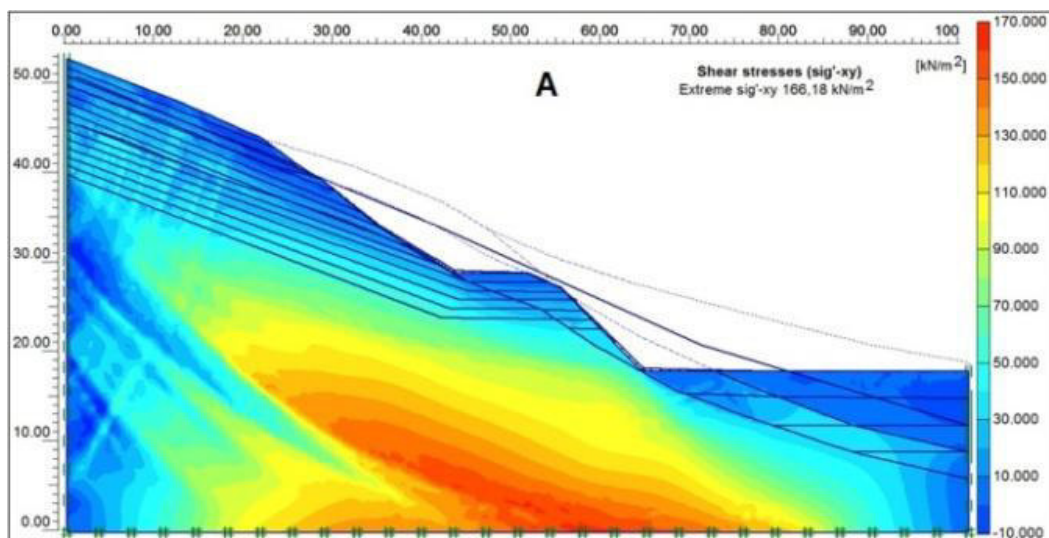


Figure V-7 a: La déformation tangentielle (Shear strains) de la configuration talus renforcé par des géotextiles, b: La déformation tangentielle de la configuration mur de soutènement-talus. c: La déformation tangentielle de la configuration pieux-talus. d: La déformation tangentielle (Shear strains) de la configuration tirants d'ancrage-talus.

Les résultats de la déformation tangentielle (Shear strains) montrent également des valeurs et des dispositions de cisaillement plus favorables pour les géotextiles que pour les autres configurations. La figure V-7,a montre clairement que les nappes de géotextiles sont parvenues à amoindrir les efforts de cisaillement le long du talus à l'inverse des autres configurations (Figs V-7 b, c, d). Dans le cas de renforcement par murs, tirants et pieux des déformations tangentielles trop importantes se développent le long du parement (angrine) aval.



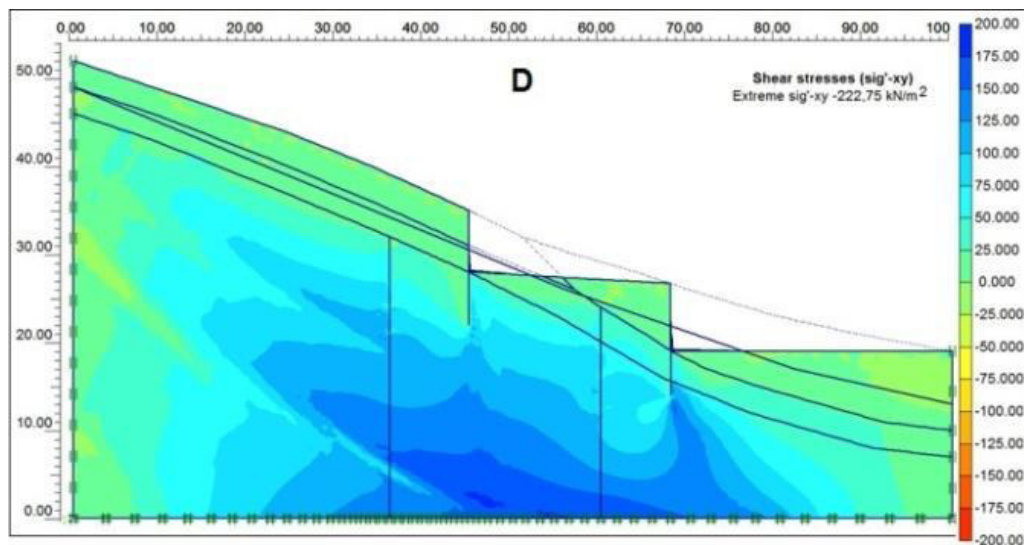
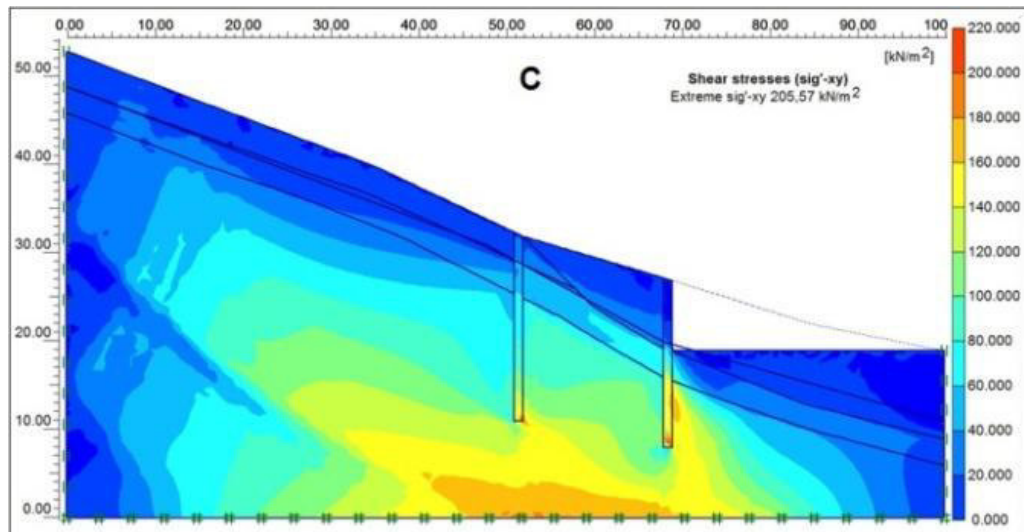
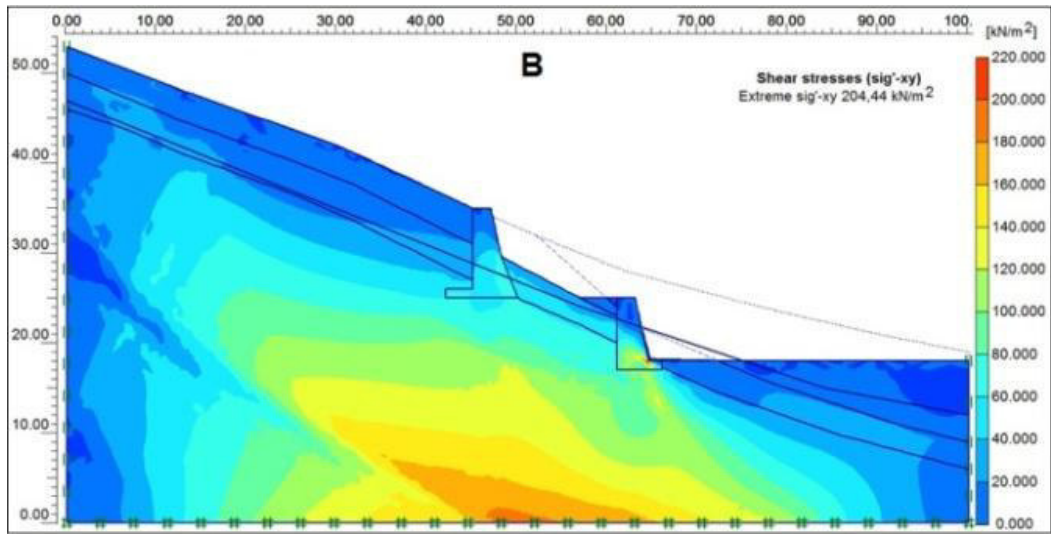
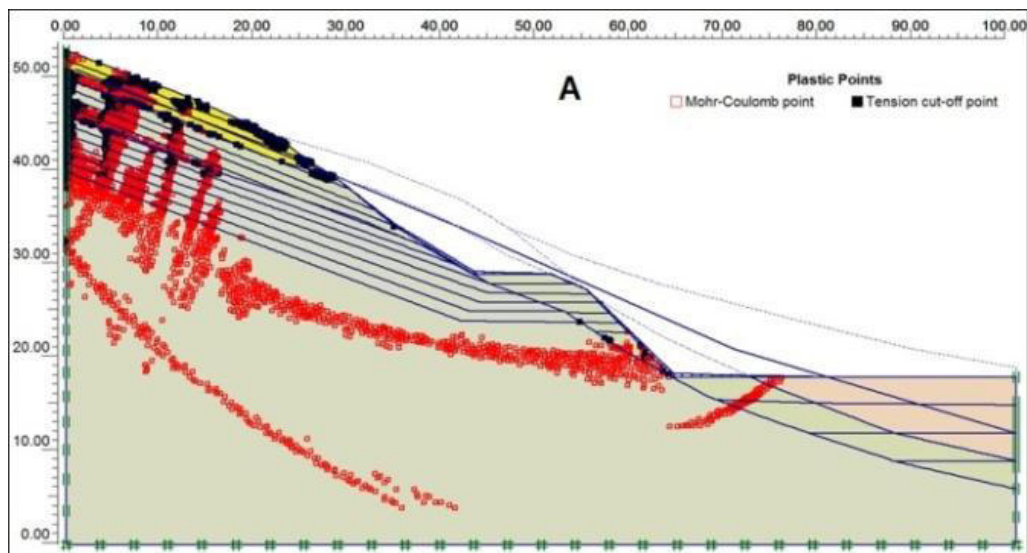


Figure V-8 a: La contrainte tangentielle (Shear stresses σ'_{xy}) de la configuration talus renforcé par des géotextiles, b: La contrainte tangentielle de la configuration mur de soutènement-talus. c: La contrainte tangentielle de la configuration pieux-talus. d: La contrainte tangentielle de la configuration tirants d'ancrage-talus.

Les contraintes tangentielles (Shear stresses σ'_{xy}) présentent également des valeurs de cisaillement plus admissibles pour les géotextiles de l'ordre de $166,18 \text{ kN/m}^2$ (Fig. V-8a). Elle s'élève à $204,44 \text{ kN/m}^2$ pour le deuxième cas, à $205,57 \text{ kN/m}^2$ pour le troisième cas et à $222,75 \text{ kN/m}^2$ pour le quatrième. On constate que les géotextiles réduisent les contraintes de cisaillement et par conséquent les déformations correspondantes vers des valeurs admissibles. Les figures montrent que les valeurs sont relativement proches de la rupture sauf dans les zones d'interface remblai-nappes où elles sont très proches de la limite plastique. Ceci est dû aux faibles paramètres d'interface (cohésion et frottement remblai-nappes) pris dans le calcul.



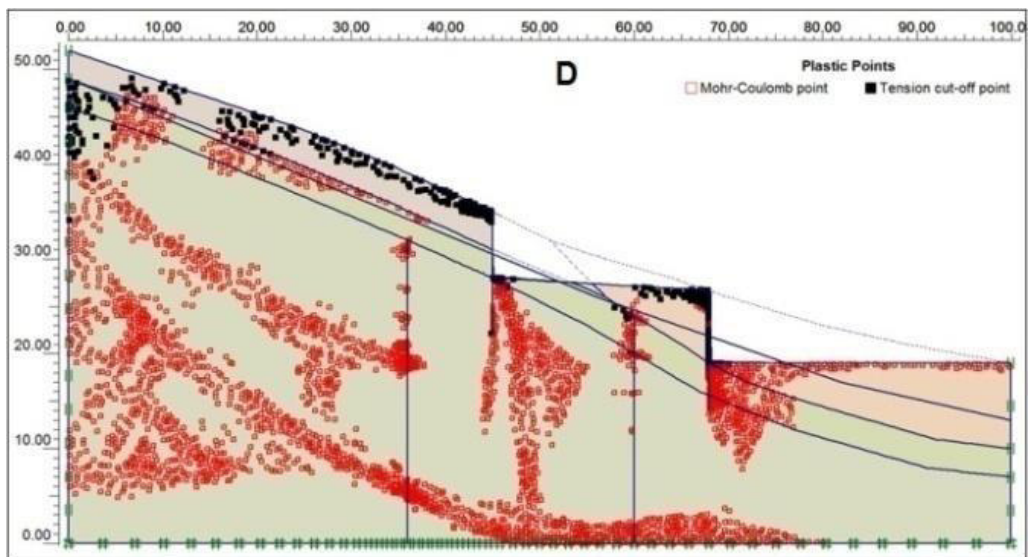
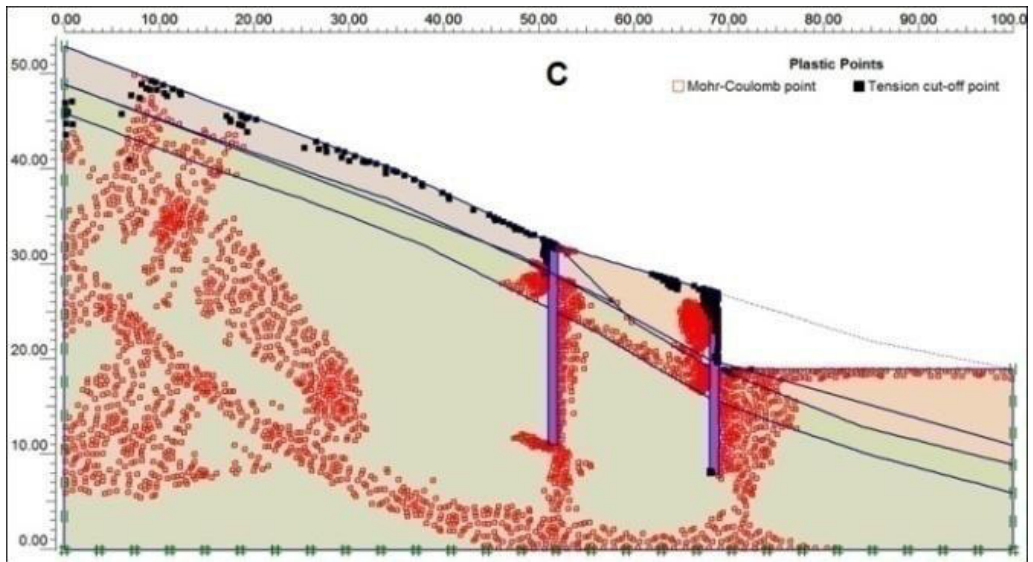
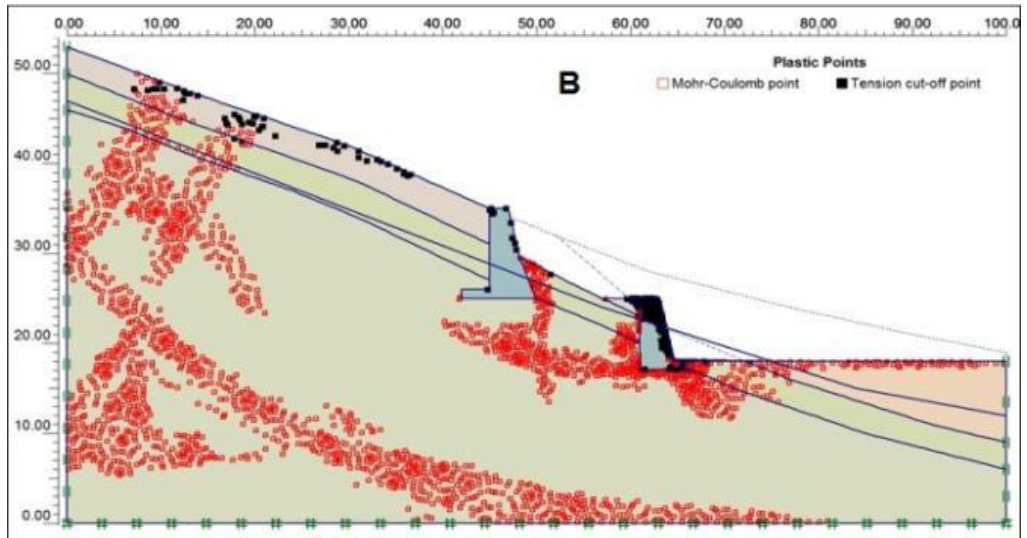


Figure V-9 a: Les points plastiques pour la configuration talus renforcé par des géotextiles, b: La Les points plastiques pour la configuration mur de soutènement-talus. c: Les points plastiques pour la configuration pieux-talus. d: Les points plastiques pour la configuration tirants d'ancrage-talus.

Les points plastiques sont dénotés comme des endroits de rupture irréversible. S'ils se situent juste au delà de l'enveloppe de Mohr-Coulomb, ils subissent des petites déformations qui ne sont pas toujours nettes. S'ils dépassent largement l'enveloppe ; les déformations deviennent plus perceptibles. Les tensions de cisaillement sont concentrées dans les extrémités supérieures et inférieures du talus (Fig. V-9). Les déformées des points plastiques que sa soit (Mohr-Coulomb points) ou (Tension cut-off points) sont moindres pour la première proposition, c'est-à-dire le cas d'un système talus-Géotextiles. Les autres configurations donnent des valeurs de déformations assez élevées. Ceci est dus au fait que l'ouvrage géotextiles est un ouvrage passif, sa résistance à la traction est importante et que son inertie est élevée. En faisant varier l'espacement des nappes de 200mm à 1000mm avec un pat de 200mm nous avons enregistré une variation significative dans le coefficient de sécurité et les déplacements totaux (tableau V-5).

Tableau V-5: Récapitulatif des résultats par l'analyse en MEF.

Espacement (m)*10 ⁻³	Déplacements totaux U _{tot} (m)*10 ⁻³	Shear stresses sig'-xy kN/m ²	Shear strains %	Coefficient de sécurité (Fs)
200	06,55	29,21	-2	1,84
400	07,13	71,89	-2	1,71
600	08,17	93,78	-3	1,60
800	19,95	125,6à	-3	1,46
1000	47.29	166,18	-5	1,12

Les résultats de la modélisation montrent que la présence de nappes de géotextiles influence d'une manière considérable la résistance au cisaillement du milieu. Les contraintes augmentent avec l'augmentation de l'espacement des nappes de géotextile. Tandis que le coefficient de sécurité (Fs) diminue quand l'espacement augmente avec une tendance polynomiale ($y = -0,803x^2 + 0,119x + 1,828$ donnant un coefficient de détermination $R^2 = 0,983$). Pour les grandes déformations axiales, le géotextile induit une augmentation quasi-linéaire du comportement contractant du sol.

Les déplacements totaux sont plus ou moins semblables lorsque l'espacement est inférieur à $600\text{m}\cdot 10^{-3}$. Par contre ils deviennent plus importants pour des espacements dépassant les $800\text{m}\cdot 10^{-3}$ avec des valeurs de l'ordre de $19,95\cdot 10^{-3}\text{m}$ et $47,29\cdot 10^{-3}\text{m}$. La valeur optimale pour l'espacement des nappes de géotextiles assurant une période de service à long terme du talus est de $720\text{m}\cdot 10^{-3}$, (Fig. V-10).

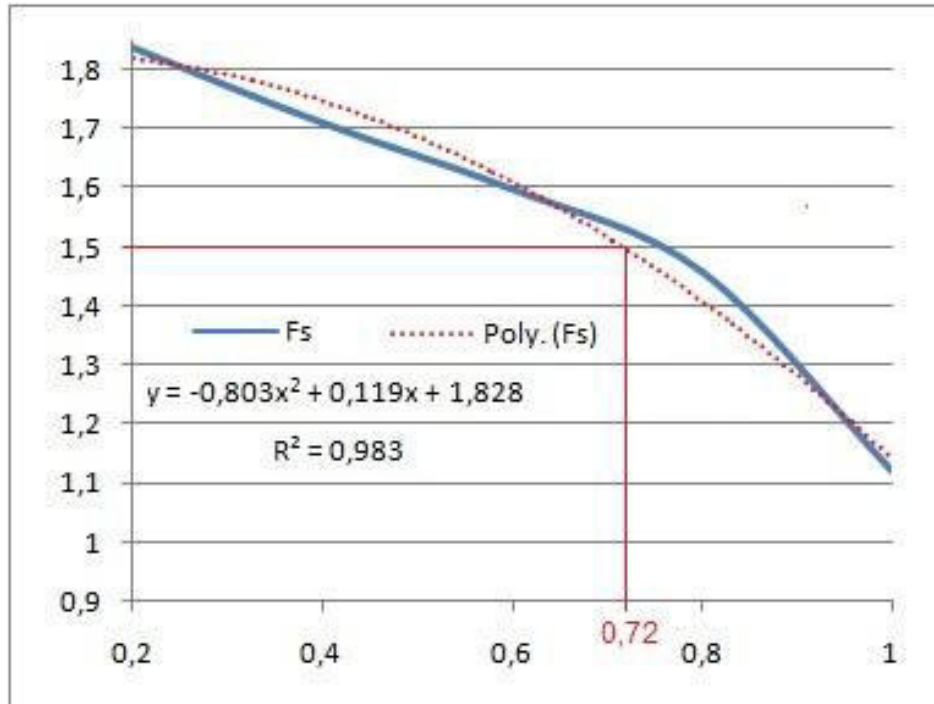


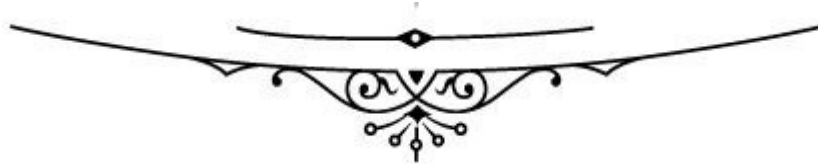
Figure V-10: Coefficient de sécurité (Fs) en fonction des espacements des nappes de géotextiles.

6. Conclusion

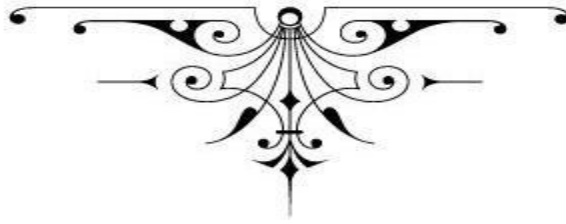
L'objectif de ce chapitre était de comparer, sur plusieurs configurations de talus, deux approches de la stabilité des talus, l'une par équilibre-limite (calculs très rapides et utilisés couramment par l'ingénieur) et l'autre par éléments finis (modélisation plus longue, encore très peu utilisée dans le domaine des pentes). Pour simplifier, nous avons traité uniquement des talus dépourvus de nappe.

En rupture circulaire, les méthodes en équilibre limite telles que la méthode de Bishop sont couramment utilisées; elles donnent des résultats satisfaisants et on peut les considérer comme très bien validées dans les terrains homogènes. Nos résultats confirment que les deux approches - à la rupture et en déformation - sont parfaitement concordantes.

Quatre variantes pour le soutènement du talus PK 144+880, RN81 ont été étudiés. Le calcul numérique par la méthode des éléments finis montre que le remblai renforcé par des nappes de géosynthétiques présente une meilleure stabilité comparativement aux autres propositions. Si on ajoute à cela les avantages que présente cette technique par rapport aux autres, notamment dans le coût, les quantités de matériaux et le délai de réalisation, les facilités dans la réalisation et la souplesse dans le comportement, le choix s'impose de lui même. La simulation du nombre et de l'espacement des nappes de géotextiles nous a permis de dégager le modèle du talus le plus stable avec une intercalation de 72cm. Si les pentes aigues sont plus associées aux glissements que celles douces. Le coefficient de sécurité s'améliore d'une manière sensible avec le renforcement du nombre de nappes de géotextile, notamment avec la réduction de l'espacement entre eux. L'étude paramétrique a permis de trouver le meilleur arrangement pour améliorer la stabilité du talus étudié. Il s'agit d'une combinaison nappes-mur de soutènement avec un intervalle de 0,8m entre les nappes sur une profondeur de 10m et un ancrage de 10m du mur.



CONCLUSION GENERALE



*L*a stabilité des pentes représente actuellement un axe de recherche très intéressant en géotechnique. Les confins Algéro-tunisiens sont réputés par les incidents de mouvements de pente de différents types et intensités. Ces phénomènes naturels provoquent des dégâts considérables au bâti et au réseau routier et ferré. Les facteurs géologiques, mécaniques et environnementaux ont un rôle déterminant dans la genèse et l'occurrence tant spatiale que temporelle de ces instabilités gravitaires. Pour ces raisons l'évaluation spatiale de risque de glissement de terrain est devenue une nécessité pour la mitigation de ces accidents dans cette région à relief abrupt.

Notre étude s'est intéressé à chaque facteur causatif en déterminant son implication dans le phénomène.

Tout d'abord nous nous somme intéressé aux aspects lithologiques, stratigraphiques, tectoniques, géomorphologiques et structuraux pour bien cerner l'implication du contexte géologique dans le surgissement des différents types des mouvements de terrain.

Pour mieux comprendre la relation entre le phénomène glissement et le climat, des données pluviométriques ont été analysées. Ce traitement a permis de comprendre le processus de déclenchement des glissements, par corrélation avec les évènements météorologiques recensés, leur amplitude et leur nature. Il est montré que la pluie est responsable de déclenchement des glissements de terrain.

L'étude de la répartition des différents types de mouvements de pentes dans la zone d'étude nous a permit de corréler chaque type de mouvement à un paquet de facteurs causatifs du phénomène mouvement de terrain. Elle a permit l'appréciation quantitative et qualitative de ces mouvements de masses: qualitativement grâce à l'analyse d'inventaires des événements passés et, quantitativement grâce à la combinaison multiparamétrique de données récoltés.

Pour une indentifications plus détaillée, plusieurs essais et de mesures ont été entrepris sur le terrain tel que prélèvement d'échantillons et géo-localisation des glissements,

cartographie géologique identification mécanique par pénétrométrie, etc. Ou dans le laboratoire et l'office tel que la visu-interprétation des photographies aériennes, et séquences satellitaires, l'analyse des données climatologiques et géotechniques, etc. Le traitement des données récoltées durant trois années consécutives de suivie rigoureux et continue dans un environnement SIG par un logiciel vigoureux (Arcgis 10) a permis de tirer l'essentiel des ces paramètres ayant servi à l'estimation et la cartographie de la susceptibilité et du risque glissement de terrain dans cette zone. Les 219 glissements de terrain identifiés à l'intérieur de la zone d'étude, et utilisés pour l'approche probabiliste, affectent fréquemment les mêmes faciès lithologiques sur des inclinaisons de pentes similaires et sous des conditions pluviométriques identiques.

Pour le traitement statistique de ces données à l'échelle communale nous avons adopté un model probabiliste multi-varié basé sur l'analyse de la relation entre les variables dépendants (les glissements de terrain) et les variables indépendants (les facteurs causatifs). La carte résultante des indices continus de danger glissement de terrain a été arrangée en quatre classes qualitatives en utilisant le classifieur "déviation standard". Cela a permis d'obtenir la carte finale de susceptibilité glissement de terrain de la zone d'étude. Cette carte de susceptibilité a été validée en utilisant une courbe ROC/AUC pendant la procédure de calcul, d'où 75% des données ont été utilisées pour le calibrage et 25% pour la validation.

Une carte de vulnérabilité impliquant les enjeux en réseaux routier et ferré de différents ordres, le bâti de divers types et qualités, et les fonctions de la population sur le territoire a été réalisé et hiérarchisé en quatre classes.

La carte de zonage du risque glissement de terrain constitue un outil fiable pour la planification et la gestion du territoire dans cette zone. Elle contribue à l'aide à la discision dans différents niveaux de responsabilités. Elle montre que la classe de risque fort se concentre au Nord de la zone d'étude où les valeurs de la susceptibilité et de la vulnérabilité sont élevées. Malheureusement cette classe coïncide avec les principaux enjeux et menace fortement le chef lieux de la wilaya. La validation a donnée des résultats s'avère très satisfaisants. La carte de risque glissement de terrain a été physiquement validée par comparaison avec les glissements de terrain survenus à posteriori à l'établissement de cette carte.

L'analyse déterministe des glissements de terrain actifs de la région de Zaarouria, a permis de rassembler des concepts et des constats tant sur le plan théorique et hypothétique que sur le plan pratique et expérimental. Les données géologiques,

mécaniques, géotechniques, et géométriques ont été d'une aide considérable pour réussir notre étude. Nous avons analysé le glissement de terrain du (Pk 114 + 880 RN81) situé à Hammam Tassa, commune de Zaarouria, wilaya de Souk Ahras pour évaluer son état de stabilité. Cette analyse a été menée à l'aide du logiciel Geostudio/Slope 2012 qui a permis de localiser la surface du glissement. En proposant une solution la plus adéquate entre quatre variantes, nous avons pu en tirer un système de confortement efficace pour résoudre le problème avec la proposition de massif renforcé par géotextiles. L'analyse des variantes a été faite par un logiciel (Plaxis 8.6).

On peut ainsi énoncer que dans une analyse de stabilité des pentes le plus important c'est de proposer un système de confortement très valide de point de vue technico-économique et qui assure la pérennité du site sujet de l'étude. Et cela après une investigation rigoureuse qui nous permettra de déterminer les causes du problème afin d'orienter les décisions vers la solution la plus efficace.

La technologie SIG offre de vrais avantages par rapport aux autres méthodes probabilistes. L'utilisation du logiciel ArcGis montre le privilège d'employer la méthode spatiales pour des problèmes de stabilité des pentes, à savoir pouvoir déterminer la susceptibilité, la vulnérabilité et le risque, en n'importe quel point du territoire

Suite à notre projet de thèse, il existe un certain nombre de problèmes qui méritent d'être étudié dans nos futures recherches:

- Utiliser des approches spatio-déterministes pour détailler l'évaluation et la cartographie du phénomène à grande échelle.
- Appliquer des approches volumiques sous éléments finis et élément distincts tel que la modélisation à trois dimensions avec Plaxis-3D ou Flac-Idéc; afin de comparer les résultats entre eux et tirer l'essentiel des toutes les simulations effectuées.
- Poursuivre de dénombrer les instabilités de terrain dans bassin versant la Medjerda amont et d'alimenter la base de données du projet en données; pour appuyer et valider le model adopté et pour orienter les prochaines recherches.
- La méthodologie utilisée, dans ce travail s'avère valide et, peut être utilisée pour cartographier la susceptibilité à d'autres types de mouvements de terrain tel que les coulées de boue, chutes de blocs, etc.



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



- A.B.H, (2001). Les cahiers de l'agence des bassins hydrographiques «A.B.H» ; « Le bassin versant Medjerda Mellegue », N° 6. 24p.
- A.N.R.H., Carte pluviométrique de l'Algérie du Nord au 1/500 000 (deux feuilles +une notice). Ministère de l'Equipement, Alger, Ed. I.N.C. 1993, 49 p.
- Abdelouahad EM., Hadji, R., & Chemseddine, F. (2017). Use of slope failures inventory and climatic data for landslide susceptibility, vulnerability, and risk mapping in souk Ahras region. *Mining Science*, 24.
- Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., & Bendaoud, E. A. (2017). Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8), 194.
- Achour, Y., Garcia, S., & Cavaleiro, V. (2018). GIS-based spatial prediction of debris flows using logistic regression and frequency ratio models for Zêzere River basin and its surrounding area, Northwest Covilhã, Portugal. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(18), 550.
- Anbalagan, R., (1992) Landslide hazard assessment and zonation mapping in mountainous terrain. *Engineering Geology*, 32, 1992, pp 269-277.
- ANRH., (1993). Rainfall map of North Algeria in scale 1/500 000 (two leafs, one notice 49 p). Ministry of Equipment, Algiers, Ed. I.N.C.
- Ashmawy, A.K., Bourdeau, P.L., 1998. Effect of geotextile reinforcement on the stress-strain and volumetric response of sand. *Proceedings of the Sixth International Conference on Geosynthetics*, Vol. 2, Atlanta, 1079-1082.
- Aubouin J. et M. Durand-Delga M. (1971). Aire méditerranéenne. In *Encyclopaedia Universalis*, 10, p. 743-745. Paris.
- Benabbas C. (2006) : Evolution Mio-Plio-Quaternaire de l'Algérie Nord orientale :
- Bonnard, C., (1984). Risques d'instabilités. Approche pluridisciplinaire dans la détection des glissements de terrain. - Colloque sur les mouvements de terrain, Caen, n°1, 309-316 pp.

- Boominathan A, Hari S. (2002): « Liquefaction strength of fly ash reinforced with randomly distributed fibers», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.22, pp.1027-1033.
- Bouillin, J. P., (1986). Le bassin Maghrébin: une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'ouest des Alpes. *Bull Soc. Géol. France*, 8^e serv., 2, 547-548.
- Bouillin, J.P., Drand-Delga, M., Gelard, J.P., Leikine, M., Raoult, J.F. ; Vila, J.M., (1970). Définition d'un flysch Massylien et d'un Flysch maurétanien au sein des flyschs allochtones de l'Algérie. *CRA cad, Sc., T.*, 270, pp 2249-2252, Paris.
- Bousnoubra H., (2002) : Ressources en eaux des régions de Skikda, Annaba, El Tarf, Guelma, Souk-Ahras (N-E Algérien) (Evaluation, gestion et perspective ; Vulnérabilité et protection), Thèse de doctorat d'état, 159p.
- Bouzenoune, A. (1993). Minéralisations périadiapiriques de l'Aptien calcaire: les carbonates de fer du gisement hématitique de l'Ouenza (Algérie orientale) (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Carrara, A., (1998). Landslide hazard mapping by statistical methods: a "black-box" model approach. *Proceedings of the International Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries: June 27–July 1- 205-224, Perugia.*
- CERG, (2000). Introduction a la Notion de Risque. Cours de Laurent Stieltjes, 7 p. de Lausanne, Département Génie Rural, Lausanne, 138 p.
- Cernica J. N. (1994). *Geotechnical Engineering: Soil Mechanics*, J. Wiley & Sons, New York
- Chabbi A. (2017). Les nappes telliennes de la région Nord de Souk Ahras (NE algérien): Etude géologique et structurale (Doctoral dissertation, Université Badji Mokhtar-Annaba).
- Chadi M., (1991). *Géologie structurale des monts d'Aïn M'Lila (Algérie orientale)*", Thèse de Doctorat de l'Université de Nancy I.191 pp., 1 carte géol. h. t., (1991).
- Chikhi-Aouimeur, F. (1980). Les rudistes de l'Aptien supérieur du Djebel Ouenza (Algerie-NE). These Troisieme Cycle, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 27.
- Conforti M., Aucelli Pp., Robustelli G., Scarciglia F. (2011), *Geomorphology and GIS analysis for mapping gully erosion susceptibility in the Turbolo stream catchment (Northern Calabria, Italy)*. *Natural hazards*, 56, 3,; pp881-898.
- D'ercole R. Et Metzger P. (2009), *Territorial vulnerability: a new approach of risks in urban areas*” Paper N 447 *European journal of geography Cyberge*o.,

- Daget, P. (1977). Le bioclimat méditerranéen: analyse des formes climatiques par le système d'Emberger. *Vegetatio*, 34(2), 87-103.
- Dahdouha N., 2012. Etude diagnostique des forages partie essai par pompage. Bureau d'étude. Rapport de fin de sondage . Forage nappe de Taoura, Wilaya de Souk Ahras. Algérie .
- Dai, F.C. and Lee C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modelling using GIS, Lantau Island, Hong Kong, *Geomorphology*, 42, 213–228.
- David, aJ. L. J. (1880). Le peintre Louis David, 1748-1825 (Vol. 2). V. Havard.
- De Martonne, E. (1923). Aridité et indices d'aridité. Académie Des Sciences. Comptes Rendus, 182, 1935-1938.
- De Martonne, E. (1926). L'indice d'aridité. Bulletin de l'Association de géographes français, 3(9), 3-5.
- Didon, J. Durand-Delga, M., Esteras, M., FeinBerg, H, (1984). La formation des grés nu,idiens de l'arc de Gibraltar. CRA cqd. Sc. T. 299, ser. II, n3, Paris.
- Djaba H., (2010) : Ressources en eau et perspectives se gestion intégrée dans le bassin versant de Medjerda (Souk-Ahras, Nord-Est d'Algérie) Mémoire de Magistère Universitaire BadjiMokhtar, Annaba. Algérie 150p.
- Djeddi M (2000). SEISMOTECTONICS AND SEISMOLOGY THE NORTH OF ALGERIA.
- Dubourdieu, C. (1959). Deformation recente de l'afrique du Nord. CRAC Sc., 249, 2799-2801.
- Dubourdieu, G. (1959). Exquise géologique du Dj. Mesloula. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, nouvelle série, Bull, (21).
- Dubourdieu, G. G. (1956). Étude géologique de la région de l'Ouenza:(confins Algéro-Tunisiens). 1. Texte. Service de la Carte Géologique de l'Algérie.
- Durand-Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-est de la Berbérie. Publ. Serv. Géol. Algérie, n°39, 89-Durozoy. G, (1960) : Etude géologique de la région de chateaudun du Rhumel. Pub. du serv de la carte géologique de l'Algérie. Nouvelle série. Bull n° 22.
- Duncan J.M. - « State of the art : limit equilibrium and finite-element analysis of slopes ». *J. of Geotechnical Eng.*, 1966, p. 577-596.
- Durville, J.L., Sève G. (1996). Stabilité des pentes : Glissements en terrain meubles. *Techniques de l'ingénieur*, C 254.

- EPOCH. (1993). The temporal occurrence and forecasting of landslides in the European community (Ed: Flageollet, J. C.). Contract No. 90 0025, 3 Volumes.
- Erismann, T. H. (1979). Mechanisms of large landslides. *Rock Mechanics*, 12(1), 15-46.
- Fehdi, C., (2008). Apport hydrogéochimique et isotopique dans la caractérisation des mécanismes d'acquisition de la salinité des eaux souterraines du complexe aquifère Morsott- el Aouinet (N.E. Algérien), thèse de doctorat, université de Tébessa, Algérie, 2008, 235p.
- Ficheur, E. (1890). Description géologique de la Kabylie du Djurjura. Etude spéciale des terrains tertiaires, thèse Paris. Ed. Fontana et Cie. Alger.
- Fredlund, D. G., & Krahn, J. (1977). Comparison of slope stability methods of analysis. *Canadian geotechnical journal*, 14(3), 429-439.
- Friane F., (2000) : Ressources et approvisionnement en eau dans la région de SoukAhras (Essai de synthèse). Mémoire d'Ingénieur en hydrogéologie. Université BadjiMokhtar, Annaba, Algérie. 82p
- Gadri, L., Hadji, R., Zahri, F., Benghazi, Z., Boumezbeur, A., Laid, B. M., & Raïs, K. (2015). The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(11), 8987-8997.
- Ghrieb, L. (2007). Impact des formations triasiques sur les eaux d'une plaine en zone semi-aride: Cas de la plaine Bekkaria-Tebessa (Extrême Est Algérien) (Doctoral dissertation, Université de Annaba-Badji Mokhtar).
- Global Seismic Hazard Assessment Program -GSHAP, (1999). Preliminary Earthquake Report U.S. Geological Survey, National Earthquake Information Center World Data Center for Seismology, Denver.
- Gray, DH, and Al-Rafeai, T., (1986). Behaviour of fabric versus fibre-reinforced sand, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 112 (8), pp 804-820.
- Grozavu A., Plescan S., Patriche Cv., Margarint Mc., Rosca B., (2013) Landslide Susceptibility Assessment: GIS Application to a Complex Mountainous Environment. *The Carpathians: Integrating Nature and Society towards Sustainability, Environmental Science and Engineering*, , pp 31-44.
- Guasmi I., (2005) : Dégradation de la qualité de l'eau dans le bassin versant de L'Oued Medjerda « Souk-Ahras ». Mémoire de Magister. Université El Hadj-Lakhdar, Batna, Algérie. pp 90.

- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31(1-4), 181-216.
- Haddoum, H., Guiraud, R., & Moussine Pouchkine, A. (2001). Hercynian compressional deformations of the Ahnet–Mouydir Basin, Algerian Saharan Platform: far field stress effects of the Late Palaeozoic orogeny. *Terra Nova*, 13(3), 220-226.
- Hadji, R., Boumazbeur, A., Baghem, M. Chouabi, A., (b), (2013) Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: A case study of Souk Ahras region, NE Algeria. *Quaternary International* 302,2013, pp224-237.
- Hadji R, Chouabi A, Gadri L, Raïs K, Hamed Y, Boumazbeur A (2016) Application of linear indexing model and GIS techniques for the slope movement susceptibility modeling in Bouselam upstream basin, Northeast Algeria, *Arabian Journal of Geosciences* 9:192.
- Hadji R, Raïs K, Gadri L, Chouabi A, Hamed Y (2017) Slope failures characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeastern of Algeria, *Arabian Journal for Science and Engineering, Arab J Sci Eng* 42:281–300.
- Haeri, S.M., Noorzad, R., Oskourouchi, A.M., 2000. Effect of geotextile reinforced on the mechanical behavior of sand. *Geotextiles and Geomembranes* 18, 385-402.
- Houston, L.S., Perez-Garcia, N., Houston, W.N., 2008. Shear strength and shear induced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE* 134 (11), 1619-1632.
- Islam, M. S., & Hoque, F. (2014). River Bank Erosion of the Surma River Due to Slope Failure. *International Journal of Research and Innovations in Earth Science*, 1(2), 54-58.
- Jullien, A., François, D., Kerzreho, J. P., & Legret, M. (2007). Retour d'expérience sur le comportement de matériaux alternatifs en construction routière. 18ème Congrès Français de Mécanique (Grenoble 2007).

- Karim, Z., Hadji, R., & Hamed, Y. (2019). GIS-based approaches for the landslide susceptibility prediction in Setif Region (NE Algeria). *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), 359-374.
- Ko Ko C., Flentje P., Chowdhury R., (2004) Landslides qualitative hazard and risk assessment method and its reliability, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63, 2, , pp149-165.
- Lane P.A., Griffiths D.V. - « Finite element slope stability analysis: why are engineers still drawing circles ? » Proc. NUMOG VI. Balkema, 1997, p. 589-593.
- Lemoy, C., (1969). Contribution à l'étude du massif de Filifila (Algérie nord orientale). Stratigraphie des unités allochtone, structure et métamorphisme du massif. Thèse Doct. 3eme cycle, Univ. Nancy, pp.95.
- Léone, F., Asté, J. P., & Leroi, E. (1996). L'évaluation de la vulnérabilité aux mouvements de terrains: pour une meilleure quantification du risque/The evaluation of vulnerability to mass movements: towards a better quantification of landslide risks. *Revue de géographie alpine*, 84(1), 35-46.
- Ling, H.I., Tatsuoka, F., 1993. Laboratory evaluation of a nonwoven geotextile for reinforcing on site soil. *Proceeding of Geosynthetics 93* (2), 533-546.
- Loat, R., Zimmermann M., (2004). La gestion des risques en Suisse, Risques Naturels et Aménagement en Europe, Paris, Armand Colin, p. 108-120.
- LTPE, 2016-2018 Rapports internes d'étude.
- Madre, M. (1969). Contribution à l'étude géologique et métallogénique du Djebel Ouenza (Est algérien) (Doctoral dissertation).
- Magnan J.P., Mestat P. - «Modélisation des ouvrages en terre ». *Ouvrages en interaction*, Hermès, 1999, p. 127-225.
- Malet, J.P., Laigle, D., Remaitre, A. and Maquaire, O. (2005). Triggering conditions and mobility of debris flows associated to earthflows. *Geomorphology*, n°66, 215–235 pp.
- Manche, Y. (1999). Analyse spatiale pour la prise en compte de la vulnérabilité dans l'étude des risques naturels. Les quatrièmes rencontres de Théo-Quant, Besançon, 11-12 février 1999. – 8 p.
- MATE/METL., (1999). Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR): Risques de Mouvements de terrain, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de

- l'Environnement (MATE), Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (METL), Paris, La Documentation Française.
- Otmanine, A. (1987). Les mineralisations en fluorine, barytine, pb, zn et fe sideritique autour du fosse de tebessa-morsott: relations entre paleogeographie albo-aptienne, diapirisme, structure et metallogenie (Doctoral dissertation, Paris 6).
- Perrin C., (1969). Contribution à l'étude géologique du Massif du Filifila (Algérie Nord-Orientale). Stratigraphie et sédimentologie de la série mésozoïque de l'unité inferieur. Thèse 3ème Cycle, Univ. Nancy.
- Pierson, T. C., Janda, R. J., Thouret, J. C., & Borrero, C. A. (1990). Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41(1-4), 17-66.
- Raoult J.-F. (1974). Géologie du centre de chaine numidique, Thèse de doctorat Sc., Paris, Mem, S.G.F. N. S. n 121, p.1-163, 62, fig., 9pl. h. t. Paris.
- Raoult J.-F. (1968). Chevauchement d'âge Eocène dans la dorsal de Dj. Bou-Abed. *C.R. Acad. Sc., (D)*, t, 266, p, 861-864, 2 fig., Paris.
- Regmi Ad, Devkota Kc, Yoshida K, Pradhan B, Pourghasemi Hr, Kumamoto T, Akgun A., (2014) Application of frequency ratio, statistical index, and weights-ofevidence models and their comparison in landslide susceptibility mapping in Central Nepal Himalaya. *Arab J Geosci* 7, 2, , pp 725–742.
- Rouaibia F (2017) Caractéristique hydrogéologique et hydrochimique de la partie aval d'Oued Medjerda, Thèse de Doctorat en Sciences Option Hydrogéologie, Université Badji Mokhtar Annaba
- Rouaibia, F., et Djabri, L. (2017). Caractéristiques chimiques des eaux de la nappe du synclinal de Taoura, Souk Ahras (Nord-Est de L'Algérie). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 35(1), 124-139.
- Rouvier, H., (1977). Géologie de l'extrême-nord tunisien. Tectoniques et paléogéographies superposées à l'extrémité orientale de la chaîne nord maghrébine. *Annales des Mines et de la Géologie de Tunisie* 29, 427p.
- Salaj J. et Stranik Z., (1970). Rhétien dans l'Atlas tunisien oriental. *Not. Serv. Géol., Tunisie*, 32, pp. 79-82.
- Soussi M., (2000). Le Jurassique de la Tunisie atlasique : Stratigraphie, dynamique sédimentaire, paléogéographie et intérêt pétrolier. In: Thèse Doctorat ès Sciences, Université de Tunis-2, 1-6.

- Tang, C., Shi, T., Gao, W., Chen, F., Cai, Y., (2007). Strength and mechanical behavior of reinforced and cement stabilized clayey soil. *Geotextiles and Geomembranes* 25 (3), 194-202.
- Thibieroz, J., & Madre, M. (1976). Le gisement de sidérite du Djebel Ouenza (Algérie) est contrôlé par un golf de la mer aptienne. *Bull. Soc. Hist. at. Afrique du ord*, Alger, 67, 3-4.
- Touazi M. et Laborde J-P., (2000). Cartographie des pluies annuelles en Algérie du Nord. Publications de l'Association Internationale de Climatologie, vol 13, pp. 191-199.
- Toubal A. W., (1993) : Etude du forage T1 dans le synclinal de Taoura. Mémoire d'Ingénieur I.S.T Université Badji-Mokhtar, Annaba
- Trustrum, N.A. De Rose, R.C. (1988) Soil depth–age relationship of landslides on deforested hillslopes, Taranaki, New Zealand. *Geomorphology*, 1,; pp143-160.
- UNDRO, Mitigating Natural Disasters. Phenomena, Effects and Options. United Nations, New York, 1991, 164 p.
- Van Westen, C. J. (2004). Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent developments. *Landslides: evaluation and stabilization*, 1, 39-56.
- Vandine, D. F., Moore, G., Wise, M., Vanbuskirk, C., & Gerath, R. (2004). Technical terms and methods. *Landslide risk case studies in forest development planning and operations*. BC, Ministry of Forests, Forest Science Program, abstract of land management handbook, 56, 13-26.
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In: *Special Report 176: Landslides: Analysis and Control* (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- Varnes D. J. and IAEG (1984). International Association of Engineering Geology Commission on Landslides and other mass movements on Slopes Commission on Landslides: Landslide hazard zonation – a review of principles and practice, UNESCO, France, pp. 1-63.
- Vercueil D, Billet P. (1997): « Study of the liquefaction resistance of saturated sand reinforced with geosynthetics», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol.16, pp.417-425.

- Vila J.-M (1972). Les témoins méridionaux de mole néritique Constantinois au sud de Hammam Meskhoutine et de Guelma (Algérie) BSHN. Afrique nord 63, fasc. 1-2, p 29-37; 4 fig., Alger.
- Vila J.M., et Magne J., (1969). Le cadre structural du Djebel Debbagh (Nord Constantinois, Algérie), Bull. Soc. Géol. Fr. 7, pp. 75-81 t.
- Vila J-M. Busnardo R., Devries A., Magne J. et Sigal J. (1968). Données stratigraphiques sur la série renversée et charriée de Dj Bou Sba (région de Guelma, constantinois, Algérie) BSG F(7), X, p, 206-212, 4 fig., Paris.
- Vila J-M. (1969). Relations paléogéographiques et structurales entre le flysch de penthièvre et les unités externes de la dorsale Kabyle dans la région de Jemmapes (constantinois) B.S.G. Français (7) XII, p ; 805-812, 5 Fig., Paris.
- Vila, J.M (1980). La chaîne alpine nord-orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse Doctorat, Université; P. et M. Curie, Paris VI.
- Vila J.M, (1994). Mise au point des données nouvelles sur les terrains triasiques des confins Algéro-tunisiens : Trias allochtone, "glaciers de sel" sous marin et vrais diapirs. Mém. Serv. Géol. Algérie, n06, pp.105-152.
- Voute C. (1968). Essais de synthèse de l'histoire géologique des environs d'Aïn Fakroun et des régions limitrophes PSCG Algérie NS Bull. n36 ; 3 vol., Alger.
- Wang, G-H., Sassa, K., Fukuoka, H., Tada, T., (2007). Experimental study on the shearing behavior of saturated silty soils based on ring-shear tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 133 (3), 310-333.
- Zăvoianu, I. (1978). Morfometria bazinelor hidrografice. Ed. Acad. Republicii Socialiste România.



USE OF SLOPE FAILURES INVENTORY AND CLIMATIC DATA FOR LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY, VULNERABILITY, AND RISK MAPPING IN SOUK AHRAS REGION

Abdelouahad EL MEKKI¹, Riheb HADJI²
Fehdi CHEMSEDDINE^{1*}

¹ Department of Geology, Water and Environment Lab, Tebessa University, Algeria.

² Department of Earth Sciences, IAST, Setif 1 University, Algeria.

Abstract: Slope failures (SF) in mountainous terrain often occur during or after heavy rainstorms, resulting in the loss of life and damage to the natural and/or built environment. Assessing areas susceptible to SF is essential for land use planning in threatened areas. This article presents an didactic based-analysis of the potential contribution to geo-spatial approaches for predicting SF qualitative exposure in mountainous environment. Its main aim is to assess the impact of the geologic, geomorphic, rainstorms, and anthropogenic factors in the initiation of SF in Zaarouria region. 219 events (1996–2016) were inventoried through images interpretation and field surveys and were compared to the physical parameters of the terrain to give a SF susceptibility index value using a simplified model. Vulnerability and risk maps are also established. The Standard deviation classification was used to delineate various susceptibility, vulnerability and risk zones, namely, nil, low, moderate and high. Field data on SF were employed to evaluate and validate the susceptibility zonation map. The results of this study demonstrate that SF are largely governed not only by geoenvironmental conditions but also by human activities, mainly roads and construction.

Keywords: *risk, GIS, vulnerability, slope failures, landslide susceptibility*

* Corresponding author: hadjirihab@gmail.com (H. Riheb)

1. INTRODUCTION

Natural hazards are present in all continents, and play an important role in the landscapes evolution. In many countries they pose a serious threat to the population (Hadji et al. 2013). Between all morphogenetic phenomenon, slope failures (SF) are the most injurious to man and his physical environment in the Northeastern areas of Algeria (Guettouche et al. 2013; Bourenane et al. 2014; Gadri et al. 2015; Mokadem et al. 2016; Zahri et al. 2016; Mouici et al. 2017; Achour et al. 2017; Dahoua et al. 2017). They affect and damage mainly the transportation infrastructures. Every year, the same types of instabilities occurs, especially after the winter rainstorms. This situation has become a real constraint to any development in this region. The area chosen for our study suffers from the recurrence of SF of several types (Hadji et al. 2017). This situation is aggravated by the glaring lack of a regulatory mapping providing a general framework for the SF risk management. The investigation method depends on several parameters such as: the work scale, the physical characteristics of the terrain, the data availability, the administrative management framework and the existing cartographic background. These methodes are divided between direct and indirect approaches (Grozavu et al. 2013; Hadji et al. 2016). The adopted approach by our research is based on an expert statistical model defining the relationship between SF and their causative factors. This modeling allows for a reasonable assessment of the SF threats encountered by the study area using thematic susceptibility, vulnerability and risk maps. Such documents makes it possible to identify potentially unstable areas, requiring special treatment during land-use planning operations. The fluctuation of meteorologic variables such as precipitations, snow melting, and temperature changes influence the slopes equilibrium and may cause landslides. At this stage, no consensual evidence exists on the real effects of climate change on the geo-hydrological hazards. The landslides occurrence remains a subject of scientific debate. Their precise estimates is complicated to determine, and to predict (El Gayar and Hamed 2017). However there is the need to evaluate how climate variability affect landslide hazards. Several reseachs have argued that their changes influences slope stability at different temporal and geographical scales (Gariano and Guzzetti 2016; Besser et al. 2017; 2018). Guzzetti et al. (2005) agree that the frequency, probability, density and size of landslides increases significantly in a decadal period. However the intrinsic characteristics of the slope materials do not change in the considered period.

2. STUDY AREA CHARACTERISTICS

The study area occupies the central part of Souk Ahras province, between 36°06'04.97" to 36°19'26.69"N latitudes, and 07°51'11.38" to 8°04'19.52"E longi-

tudes. It includes two municipalities Zaarouria and Souk Ahras and covers a total area of 206.145 km² (Fig. 1). It is bounded from the North by Machroha and Ouled Driss, from the East by Ouilen and Mrahna, from the West by Hanancha and Tifech and from the South by Dréa and Taoura municipality. The residential population is estimated at 166,493 inhabitants (ONS 2008). Its climate is semi-arid with a warm and dry summer and a cold and humid winter. The average precipitation is around 840.74 mm/year (Hadji et al. 2014a; Hamad et al. 2018). Its altitudes vary between 480 m and 1090 m a.s.l. Two major structural directions characterize the region; an NE–SW Atlasic direction and an NW–SE to WNW–ESE Miocene tectonic bound. The hydrographic network is well developed, and is represented by temporary streams on the slopes flanks, plunging into the Medjerda valley (Hamed et al. 2014; 2017).



Fig. 1. Geographic location of the study area

3. METHODOLOGY

3.1. FACTORS DATABASE

Slope failures (SF) involve flowing, sliding, toppling, falling, or spreading, and many landslides exhibit a combination of different types of movements (Rouabhia et al. 2012). The Landslides of the study area are predominantly mudslides and both rotational and translational slides affecting clayey and silty–clayey formations. Precipitation that saturates slopes with water is the main triggering factor of these mass wasting (Hadji et al., 2014b). In some areas, human actions may also triggers landslides. A chronology of landslides, has been reconstructed from technical reports, field surveys, Sentinel-2 + Landsat8 satellite images and Aerial View – Bing Maps for rapid operational inventory mapping. The precipitation conditions responsible for triggering and reactivating landslides have been deduced by analysis of rainfall records. The correlation between SF and precipitations show a strong relationship between rainfall events and the occurrence of landslides.

Even seismic stresses and anthropogenic activities can also trigger SF. The visual-interpretation satellite images and aerial photographs allowed us to make an inventory of 219 events (1996–2016), (Fig. 3a). Landslides were detected by interpreting all the

typical geomorphic characteristics of landslide scars. Field reconnaissance followed this operation to confirm and identify the recognized SF. Different measurements have been made to specify the local factors controlling the dynamics of these instabilities. These landslides were then classified and sorted out based on their modes of occurrence with respect to the existing landslide inventory.

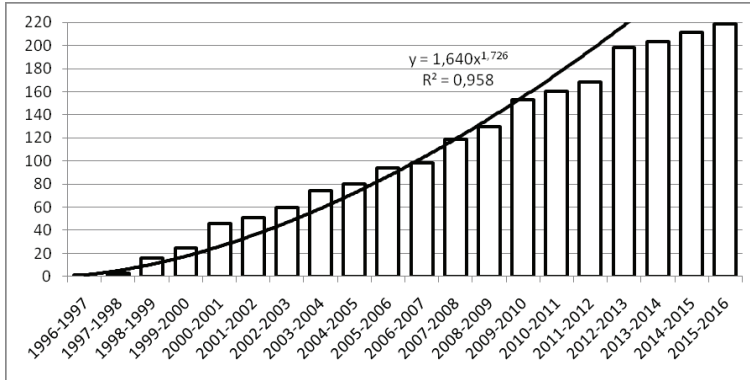


Fig. 2. Landslide occurrence between 1996 and 2016

The inventoried landslides displays many behaviors styles, including long-term creep, sudden brutal movement with no creep phase. Rotational landslide are characterised by the downward and outward movement of a mass on top of a concave upward failure surface. Whereas ranslational landslide are characterised by a mass that slides downward and outward on top of an inclined planar surface.

In this study, at first, the total landslides observed in the study area were split into two parts (70%) landslides were randomly selected from the total 219 landslides as the training data and the remaining (30%) landslides were kept for validation propose. Then the rate curves were obtained by comparing the landslide training data and validation data with the susceptibility maps and the areas under the curve were calculated.

The lithology and lineament were digitized on the basis of three geological map (namely Souk Ahras N° 77, M'daourouch N° 100 and Taoura N° 101, in 1/50000 scale). All formations were vectorized in polygons. An attribute database has been created, containing for each lithological unit the facies name, age and symbol, etc. The facies renowned for their weakness to SF are very abundant in the study area. Pliocene red clays, Eocene yellow marls, Cretaceous clay and Triassic gypsum-clay constitutes the majority of the study area facies (Fig. 3b). Lineaments were separately digitized into polylines from the same cartographic background. They have been integrated into the modeling by adopting buffers of: <500 m, 500 to 1000 m and >1000 m around the faults axis (Fig. 3c).

Slope is the main predisposing factor of SF (Pradhan and Lee 2010). It ranges in the study area between 0° and 79°, with an average of about 8.34° and a standard de-

viation of 7.26° (Fig. 3d). On the basis of field observations, the slope map was ranged in five classes: $<5^\circ$, $[5-10^\circ]$, $[10-20^\circ]$, $[20-30^\circ]$ and $\geq 30^\circ$. The first and the second classes are hardly favorable to the SF genesis. The third class is not very stable; the fourth shows clear indices of instability. Finally, most of the slopes belonging to the fifth class are almost unstable.

The elevation map of the study area was subdivided into seven hypsometric belts between 480 and 1090 m (Fig. 3e). The highest elevations (1000–1090 m) are located on the peaks of Jebel Chouga and Jebel Zaarouria and occupy 1.776 km^2 . The lowest elevations (480–500 m) are concentrated in the valey of Medjerda wady with 1.041 km^2 . The 700–800 m class has the largest area, with 75.526 km^2 .

The aspect map expresses the slopes orientation toward the North (Fig. 3f). It reveals the shadiest slopes and therefore the most humid ones (Pourghasemi et al. 2012). This moisture has a positive predisposition to sliding. Thus, slope, elevation and slope orientation map was prepared using the DEM ($30 \times 30 \text{ m}$).

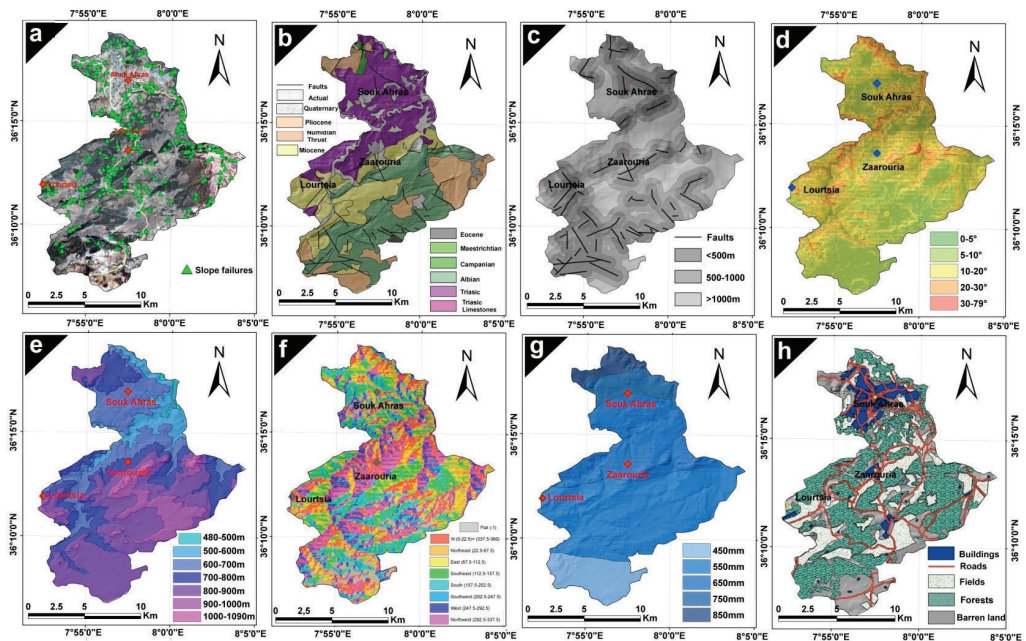


Fig. 3. a – SF inventory map of the study area, b – simplified lithologic map of the study area, c – buffer lineaments map of the study area, d – slope map of the study area, e – elevation map of the study area, f – aspect map of the study area, g – precipitations map of the study area, h – landuse map of the study area.

Rainfalls are well known for their role in triggering SF (Lee and Pradhan 2007). The precipitation map of the study area was clipped from the rainfall map of Northern

Algeria (Awadallah and Foda 2011). The resulting map (Fig. 3g) has five classes: the class <550 mm (23.913 km²) covers the extreme South of the study area, the isohyet $[550, 650$ mm] (95.082 km²) is top of the previous one; The class $[650, 750$ mm] ($62,013$ km²) is in the middle of the study area; That of $[650, 750$ mm] ($15,923$ km²) to its North while the class >750 mm: (9.215 km²) is in the extreme North.

Land use of the study area was mapped using a multi-source database with satellite imagery, topographic maps supplemented by fieldwork. This information has been used to digitize and index road networks, buildings, agricultural fields, forests and bare land (Fig. 3h). The roads were integrated into the modeling by adopting buffers of <25 m, from 25 to 50 m and >50 m around the road and rail axes.

3.2. METHODOLOGY

3.2.1. SUSCEPTIBILITY MAPPING

The susceptibility assessment follows four steps:

- The SF inventory based on satellite images interpretation by using Landsat8 images;
- The mapping of causative factors, which are supposed to be responsible for the appearance of SF in the study area;
- The estimation of the relative importance of each categorical variable involved in the SF genesis;
- The SF susceptibility assessment in the study area and the validation of the model.

All layers were rasterized in the same pixel format (5×5 m). Susceptibility index were established by the overlaying of each factor separately on the SF inventory map. Buffer zones have been established around linear themes such as faults, roads and the hydrographic network to allow their integration in modeling. Geological information (lithology and fault buffers (A, B)) Land use (road buffers, buildings, forests and fields (C)); Morphological data (altitude, slope classes and aspect (D, E, F)) and environmental data (rainfall, hydrographic network buffers, and earthquakes (the latter factor is mono-zonal)) Are introduced into the evaluation of the susceptibility map. The susceptibility index (H_{ji} , = decimal number between 0 and 1) interpreting the relationship between the spatial distribution of SF and the different elementary classes of the causative factors were calculated. Several weighting trials (W_j = integer between 1 and 4) interpreting the importance of each factor in the genesis of slope breaks in the study area have been tested. 25 Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were tested for various weight combinations (by integrating the 30% (66 cases) of events omitted by a random process). The best combination has been selected for generating the susceptibility map of the study area. The value of the SF susceptibility at each point of the 8234175 pixels is calculated according to the following equation:

$$\text{Susceptibility} = \frac{\sum_{j=1}^9 [W_j, H_{ji}]}{\sum_{j=1}^9 W_j} \tag{1}$$

The ROC curve of the selected model shows the largest area under the curve AUC = 0.79. This value is judged by our study as quite satisfactory (Fig. 4 a).

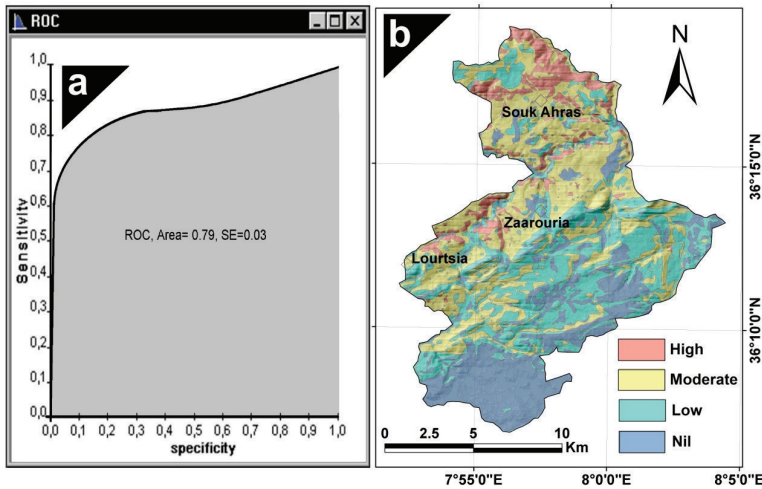


Fig. 4. a – ROC curve of the retained model (AUC = 0.79),
 b – SF susceptibility map of the study area

In the adopted model, a maximum weighting equal to four (W_F, W_I and $W_A = 4$) was attributed to slope, precipitations and lithology, due to their primary role (high correlation) in the genesis and the initiation of the phenomenon. A minimum weight equal to one (W_B, W_D and $W_E = 1$) is assigned to the fault, elevation and aspect layer. All other layers are assigned a weighting equal to two ($W_{C,J,K} = 2$). The resulting map was prioritized into four qualitative classes using the Standard Deviation classifier, which resulted in the final SF susceptibility map of the study area. It is divided to nil 23.38% (48.192 km²), low 31.53% (64.994 km²), moderate 36.97% (76.223 km²) and High class 8.12% (16.736 km²) (Fig. 4b).

3.2.2. VULNERABILITY MAPPING

In order to determine the vulnerability of property and people to SF, a typology of the territory's components in transport infrastructures, buildings and functionalities has been carried out. Topographic maps, satellite images and field work were used to analyze these themes. Loss index values I_p (decimal number between 0 and 1) are assigned to the various elements to estimate damage, loss or other adverse effects to

those attributes valued by mankind. The vulnerability map was elaborated by modeling the consequences account values of four themes represented by the building, road, agricultural fields and the forests; Estimating the physical injuries, structural damages, and functional disorders related to a SF possible occurrence.

Several approach considers that main damage to the exposed elements is structural, corporal and operational (Leone et al. 1996). Vulnerability is the degree of loss of an element within the landslideaffected area (Fell 1994). The type and the quality of the buildings is a criterion of structural and corporal vulnerability. If this criterion is high, the concerned area is more vulnerable. In our work we have attributed to this theme a maximum loss index ($I_p = 1$) (Fig. 5a).

The importance of a road and the number of its users is an indicator of vulnerability. If a SF cuts off a road and makes it temporarily obstructed, the The traveler on this axis will have to take another path. The value of the associated loss index quantifies the difficulties caused by such changes. National highways (RN) and railway lines (CF) have been assigned a maximum loss index ($I_p = 1$), (due to the irreplaceability of these axes). Whereas for provincial roads (CW) it is rather a moderate value ($I_p = 0.5$) (because of the possible alternatives for the users of these roads in the event of a cut-off of these axes) (Fig. 5b).

In addition to the previous themes, it seems necessary to interpret the land occupation in terms of agricultural fields and forests. These themes have an economic interest (agriculture) and tourism (mountain hiking) for the citizens of the region. A moderate loss index ($I_p = 0.5$) was assigned to the fields (Fig 5c) and low ($I_p = 0.25$) to the forests (Fig. 5d). A nil loss index was assigned to the bare lands.

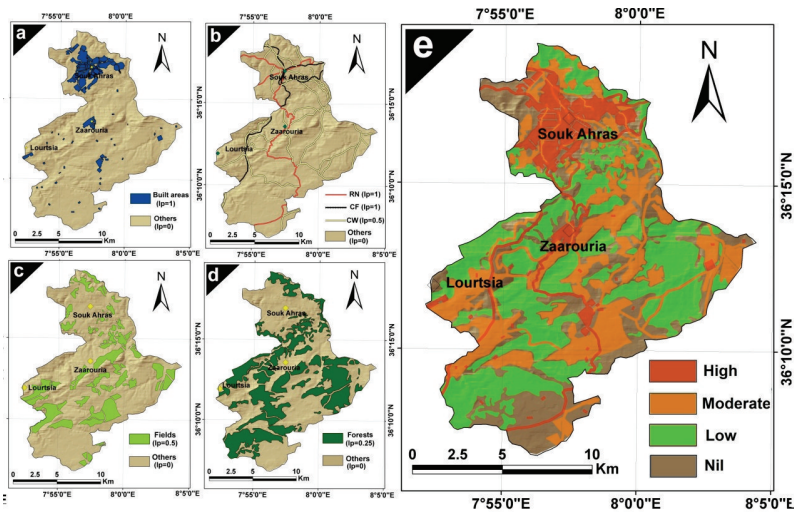


Fig. 5. a – build area map of the study area, b – roads network, c – agricultural fields, d – forest map, e – SF vulnerability map of the study area

The maximum value of the loss indexes of the different themes was retained. The assembly of these values gave a map of the global vulnerability indices. The results were harmonized on a scale of 0 to 1 and then hierarchized with the standard deviation method into four vulnerability cartographic classes, Nil = 26.41%, Low = 36.81%; Moderate = 26.83% and High = 9.95% (Fig. 5e).

3.2.3. RISK MAPPING

The risk is the intersection of two components: the likelihood of something adverse happening and the consequences if it does (Crozier and Glade 2006). The level of risk thus results from the combination of susceptibility with the value of the elements at risk by way of their vulnerability. For the assessment of the SF risk to property and people, susceptibility and vulnerability categories, are translated into risk classes using a pairwise matrix (Fig. 6, Table 1) (Ko et al. 2004).

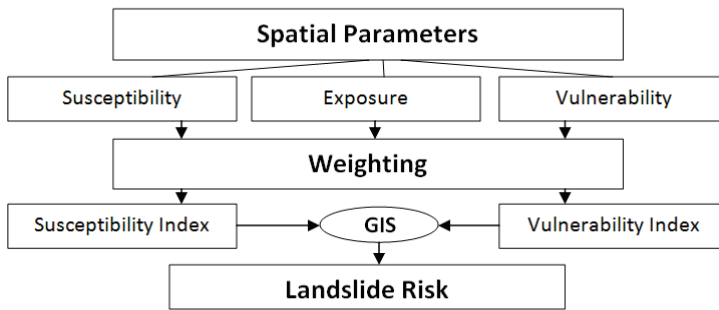


Fig. 6. Methodological flowchart of the study

It was determined that a high risk resulted from the combination of a high susceptibility with a high or moderate vulnerability, etc. The application of this table makes it possible to obtain a total risk map of the studied territories (Fig. 7). It is divided into four hierarchical risk classes: Nil = 51.33%, Low = 23.51%, Moderate = 17.90% and High = 7.26%.

Table 1. Qualification matrix of the cartographic risk classes

Susceptibility	High	Moderate	Low	Nil
Vulnerability				
High	High	High	Moderate	Nil
Moderate	High	Moderate	Low	Nil
Low	Moderate	Low	Low	Nil
Nil	Nil	Nil	Nil	Nil

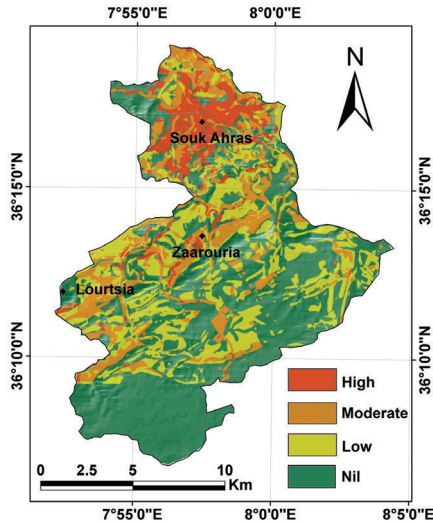


Fig. 7. SF risk map of the study area

4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Our simplified approach allowed the comprehensive study of SF susceptibility, vulnerability and risk in the Zaarouria and Souk Ahras region. The AUC validated the model at 79%. The standard deviation method was used to prioritize susceptibility and vulnerability maps in four classes each. The nil susceptibility class covers 48.192 km² of the total 206.145 km² of the study area. It is concentrated in the South part, and is characterized by gentle slopes. The low-susceptibility class is 64.994 km² and is concentrated in the middle of the study area with little rainfall. The moderate susceptibility stretches over 76.223 km² and is spread over Triassic terrains in the vicinity of the mountainous reliefs in the middle and North of the study area. The high susceptibility class covers approximately 16.736 km². In this zone, slopes and precipitations are important. The geological formations are represented by sensitive lithologies to sliding.

The Nil vulnerability class covers 54.443 km² and dominates the extreme south of the study area, it is represented mainly by bare lands. The low vulnerability class spreads over most of the study area and covers 75.882 km². It is represented by poorly maintained forests. The moderate one is presented by the agricultural fields and covers 55.308 km², while the high vulnerability class includes the building national roads and rail axes. It is concentrated in the chief town territory and covers 20.512 km².

The nil risk class covers 105.814 km². It is concentrated on the plains and alluvial terraces of the southern part of the study area where the susceptibility and vulnerabil-

ity values are low to nil. The low risk class 48.465 km² occupies the middle of the study area side by side with the moderate risk class 36.9 km². The high risk class is concentrated in the North of the study area where the values of the susceptibility and the vulnerability are high, it covers 14.966 km². Unfortunately this class coincides with the concentration of the main issues.

The most important predisposing factors of the study area to SF are lithology and slopes, and the main triggering factor is precipitations. The other factors do not have the same importance. The distribution of SF susceptibility and risk is in perfect agreement with our field observations. This demonstrates that the approach taken by our research can provide a reasonable estimation of the phenomenon in the study area. Some results seem unexpected! Thus, the SF are more abundant on slopes greater than 30 °! This is explained by the lithological and neotectonic role of the Triassic diapir.

5. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATION

This research demonstrates the performance of GIS-based approaches in assessing SF risk from a three-step process where risk is identified and mapped by combining susceptibility and vulnerability.

The SF inventory (1.06 events/km²) allowed to assess qualitatively and quantitatively the magnitude of these instabilities: quantitatively by means of an interpretation of multi-date satellite images; And qualitatively by determining the signs of instability on the slopes of the study area.

The processing of the selected causal factors (interpreting the geological context, geomorphological conditions, hydrographic network, precipitations, and land use, etc.) allowed to model the spatio-temporal effects of the various categorical variables involved in the genesis of SF. The Raster linear summation made it possible to calculate SF susceptibility, vulnerability and risk maps.

The chief town of the province (where people the and property are concentrated) belong to a highly susceptible terrains to SF. This situation requires the promotion of a geo-risk culture among population and decision-makers.

This method can be used as an referential information system for managing SF risk in the study area. It can be replicated by other studies to estimate the susceptibility, vulnerability and risk of SF in similar environments.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the anonymous reviewers for their criticism of the paper. Thanks to E3G laboratory, Seti 1 university, Algeria for their help.

REFERENCES

- ACHOUR Y., BOUMEZBEUR A., HADJI R. et al., 2017, *Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria*, Arab J. Geosci., 10, 194.
- AWADALLAH A.G., FODA R., 2011, *Approche statistique régionale pour l'estimation des caractéristiques pluviométriques: Etude de cas au Nord Est de l'Algérie*, Canadian Journal of Civil Engineering, 38 (10), 1060–1071.
- BESSER H., MOKADEM N., REDHAOUNIA B., HADJI R., HAMAD A., HAMED Y., 2018, *Groundwater mixing and geochemical assessment of low-enthalpy resources in the geothermal field of southwestern Tunisia*, Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration, 3 (1), 16.
- BESSER H., MOKADEM N., REDHOUANIA B., RHIMI N., KHLIFI F., AYADI Y., ... and HAMED Y., 2017, *GIS-based evaluation of groundwater quality and estimation of soil salinization and land degradation risks in an arid Mediterranean site (SW Tunisia)*, Arabian Journal of Geosciences, 10 (16), 350.
- BOURENANE H., BOUHADAD Y., GUETTOUCHE M.S., BRAHAM M., 2015, *GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria)*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 74 (2), 337–355.
- CROZIER M.J., GLADE T., 2006, *Landslide susceptibility and risk: issues, concepts and approach*, Vol. 802, CROZIER.
- DAHOUA L., SAVENKO V.Y., HADJI R., 2017, *GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-west highway, North Algeria*, Mining Science, 24, 81–91.
- EL GAYAR A., HAMED Y., November 2017, *Climate Change and Water Resources Management in Arab Countries*. In: Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Springer, Cham., pp. 89–91.
- GADRI L., HADJI R., ZAHRI F., BENGHAZI Z., BOUMEZBEUR A., LAID B.M., RAÏS K., 2015, *The quarries edges stability in opencast mines: a case study of the Jebel Onk phosphate mine, NE Algeria*, Arabian Journal of Geosciences, 8 (11), 8987–8997.
- GARIANO S.L., GUZZETTI F., 2016, *Landslides in a changing climate*, Earth-Science Reviews, 162, 227–252.
- GROZAVU A., PLEȘCAN S., PATRICHE C.V., MĂRGĂRINT M.C., ROȘCA B., 2013, *Landslide susceptibility assessment: GIS application to a complex mountainous environment*. In: The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability, Springer, Berlin–Heidelberg, pp. 31–44.
- GUZZETTI F., REICHENBACH P., CARDINALI M., GALLI M., ARDIZZONE F., 2005, *Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale*, Geomorphology, 72 (1–4), 272–299.
- HADJI R., ACHOUR Y., HAMED Y., November 2017, *Using GIS and RS for Slope Movement Susceptibility Mapping: Comparing AHP, LI and LR Methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria*. In: Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration, Springer, Cham., pp. 1853–1856.
- HADJI R., CHOUABI A., GADRI L., RAÏS K., HAMED Y., BOUMAZBEUR A., 2016, *Application of linear indexing model and GIS techniques for the slope movement susceptibility modeling in Bous-selam upstream basin. Northeast Algeria*, Arabian Journal of Geosciences, 9 (3), 192.
- HADJI R., ERRAHMANE BOUMAZBEUR A., LIMANI Y., BAGHEM M., EL MADJID CHOUABI A., DEMDOUM A., 2013, *Geologic, topographic and climatic controls in landslide susceptibility assessment using GIS modeling: a case study of Souk Ahras region, NE Algeria*, Quaternary International, 302, 224–237.
- HADJI R., LIMANI Y., DEMDOUM A., 2014b, *Using multivariate approach and GIS applications to predict slope instability susceptibility case study of Machrouha municipality, NE Algeria*. In: IEEE 2014 1st International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM), pp. 1–10.

- HADJI R., LIMANI Y., BOUMAZBEUR A.E., DEMDOUM A., ZIGHMI K., ZAHRI F., CHOUABI A., 2014a, *Climate change and its influence on shrinkage–swelling clays susceptibility in a semi-arid zone: a case study of Souk Ahras municipality, NE-Algeria*, *Desalination and Water Treatment*, 52 (10–12), 2057–2072.
- HADJI R., RAIS K., GADRI L., CHOUABI A., HAMED Y., 2017, *Slope failure characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machroha municipalities, Northeast Algeria*, *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42 (1), 281–300.
- HAMAD A., BAALI F., HADJI R., ZERROUKI H., BESSER H., MOKADEM N., ... and HAMED Y., 2018, *Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundry basin)*, *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3 (1), 7.
- HAMED Y., REDHAOUNIA B., BEN SÂAD A., HADJI R., ZAHRI F., ZIGHMI K., 2017, *Hydrothermal waters from karst aquifer: Case study of the Trozza basin (Central Tunisia)*, *Journal of Tethys*, 5 (1), 33–44.
- HAMED Y., AHMADI R., HADJI R., MOKADEM N., BEN DHIA H., ALI W., 2014, *Groundwater evolution of the Continental Intercalaire aquifer of Southern Tunisia and a part of Southern Algeria: use of geochemical and isotopic indicators*, *Desalination and Water Treatment* 52 (10–12), 1990–1996.
- KO C.K., FLENTJE P., CHOWDHURY R., 2004, *Landslides qualitative susceptibility and risk assessment method and its reliability*, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 63 (2), 149–165.
- LEE S., PRADHAN B., 2007, *Landslide susceptibility mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models*, *Landslides*, 4 (1), 33–41.
- MOKADEM N., DEMDOUM A., HAMED Y., BOURI S., HADJI R., BOYCE A., LAOUAR R., SAAD A., 2016, *Hydrogeochemical and stable isotope data of groundwater of a multi-aquifer system: Northern Gafsa basin e Central Tunisia*, *Journal of African Earth Sciences*, 114, 174–191.
- MOUICI R., BAALI F., HADJI R., BOUBAYA D., AUDRA P., FEHDI C.É., ... and ARFIB B., 2017, *Geophysical, Geotechnical, and Speleologic assessment for karst-sinkhole collapse genesis in Cheria plateau (NE Algeria)*, *Mining Science*, 24, 59–71.
- POURGHASEMI H.R., PRADHAN B., GOKCEOGLU C., 2012, *Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran*, *Natural susceptibilities*, 63 (2), 965–996.
- PRADHAN B., LEE S., 2010, *Regional landslide susceptibility analysis using back-propagation neural network model at Cameron Highland, Malaysia*, *Landslides*, 7 (1), 13–30.
- ROUABHIA A., DJABRI L., HADJI R., BAALI F., FAHDI Ch., HANNI A., 2012, *Geochemical characterization of groundwater from shallow aquifer surrounding Fetzara Lake NE Algeria*, *Arabian Journal of Geosciences*, 5 (1), 1–13.
- ZAHRI F., BOUKELLOUL M., HADJI R., TALHI K., 2016, *Slope Stability Analysis in Open Pit Mines of Jebel Gustar Career, NE Algeria – A Multi-Steps Approach*, *Mining Science*, 23, 137–146.

Table 1: Températures mensuelles durant la période 2000-2018

Année	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Août	Total	Moyenne
2000	22,6	16,6	13,6	10,5	5,7	8,9	11,7	14,5	20,1	22	26,3	26,6	199,1	16,59
2001	22,5	21,1	12,2	7,8	8,9	8,1	14,6	12,4	17,1	22,7	26,8	26,2	200,4	16,70
2002	21,7	18,3	12,8	9,8	7	9,7	11,6	14	18,3	24,2	25,9	25,6	198,9	16,58
2003	20	17,2	10,6	8,4	7,5	10	8,7	11,2	20,3	2,1	26,5	28,7	171,2	14,27
2004	21,7	20,3	10,9	8,8	8,2	10,4	11,1	12,4	15,3	21,1	25,7	27,2	193,1	16,09
2005	24,3	21,6	17,6	10,3	5,8	5,3	11,1	14	18,9	22,7	26,4	24,8	202,8	16,90
2006	24,4	22,2	17,35	11,25	5,7	5,95	11,15	14,8	19,75	23,05	26,5	25	207,1	17,26
2007	25	16,8	12,7	5,2	7,1	8,3	10,5	11,1	14	25	28	31	194,7	16,23
2008	21	14	11,5	8,9	8,95	9,4	13	13,4	22	20,4	29,3	27,05	198,9	16,575
2009	21,85	16,95	13,9	10	7,9	12	14,85	18	21,1	27,4	29	31,5	224,45	18,704
2010	21,85	20,35	14,5	12,9	11,04	6,75	11,65	15,55	18,6	21,9	27,25	27,4	209,74	17,478
2011	21,8	19,3	14,2	10,6	8,8	5,4	11,05	14,7	17,85	23,5	27,01	27,9	202,1	16,84
2012	21,7	18,2	13,8	8,4	6,6	4	10,5	12,8	17,1	25,1	26,7	28,5	193,4	16,12
2013	21	17,5	11,4	9,6	7	5,4	9,2	14	18,1	21,5	26,7	25,4	186,8	15,56
2014	23,7	19,2	14,5	7,6	8,4	9,1	8,2	13,6	16,4	22,1	24,5	25,9	193,2	16,1
2015	21	17,5	11,4	9,6	7	5,4	9,2	14	18,1	21,5	26,7	25,4	186,8	15,56
2016	20,1	18,9	12,5	9,4	9,2	9,5	9,5	14,6	16,6	21,2	24,9	23,7	180,6	15,05
2017	21,5	18,1	13,9	8,7	6,7	4,7	10,9	13	17	25	27	28	194,5	16,21
2018	22	18	12	10,1	7,2	5	9,9	14,3	18,6	22	27	25,4	191,5	15,96

Vitesses du vent moyennes mensuelles et interannuelles (1990-2006) .Ain Dalia

Année Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Moy Annuel
1990 1991	2.40	22	5.83	4.78	5.72	11.41	7.08	11.1	8.17	1.93	2.34	2.49	7.10
1991 1992	1.70	2.83	6.17	7.66	3.14	4.75	4.61	5.68	3.40	10.27	7.64	3.35	5.18
1992 1993	1.72	11.29	6.68	10.03	9.32	11.42	19.4	13.48	3.67	11.54	14.62	2.58	9.64
1993 1994	10.62	4.62	11.31	10.03	10.41	11.10	3.48	3.21	1.97	11.46	2.40	9.25	7.49
1994 1995	5.02	11.49	4.16	10.58	9.12	4.63	11.6	10.17	8.98	11.25	11.46	3.39	8.49
1995 1996	5.56	8.70	8.36	13.59	4.23	8.93	11.44	8.14	11.35	11.44	8.09	10.36	9.18
1996 1997	10.62	8.93	11.45	10.21	8.22	8.92	11.36	3.49	3.05	11.43	8.25	5.35	8.44
1997 1998	8.12	11.29	11.57	11.43	11.42	10.38	11.12	11.23	11.56	11.47	10.88	14.52	11.25
1998 1999	6.93	7.9	9.54	11.34	1.85	1.00	11.46	9.36	3.40	10.52	11.43	11.43	8.01
1999 2000	11.42	10.51	11.55	11.47	9.24	11.46	10.20	10.59	10.57	9.48	6.87	1.20	9.55
2000 2001	5.09	7.04	10.32	23.13	11.38	11.54	11.54	9.34	10.54	1.12	5.71	9.34	9.67
2001 2002	6.79	4.71	9.04	9.34	11.38	11.54	11.54	9.34	10.54	1.12	5.71	9.34	8.36
2002 2003	324	1030	113	113.8	1.09	8.02	3.22	4.83	3.36	1.30	5.98	3.36	134.33
2003 2004	31.83	31.31	21.18	26.28	28.98	28.53	31.29	31.39	26.03	25.05	27.97	28.50	28.19
2004 2005	4.38	00.43	4.41	00.38	3.85	4.38	3.76	4.76	00.49	11.23	11.47	3.79	4.44
2005 2006	1.10	10.62	11.23	13.19	02.90	0.88	3.61	1.21	1.56	00.10	1.75	1.05	4.10

ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Titre : ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS

Localisation : SC : 01

Chantier : -

Date : -

Dossier N° : -

Opérateur : -

Norme : -

No de l'échantillon : 01

Nature du sol : -

Profondeur : 1.60 / 1.85

Type D'essai : UU

Coef.dynamométrique : 0.12

Comparateur. No1 : 0.01

* Comparateur. No2 : 0.01

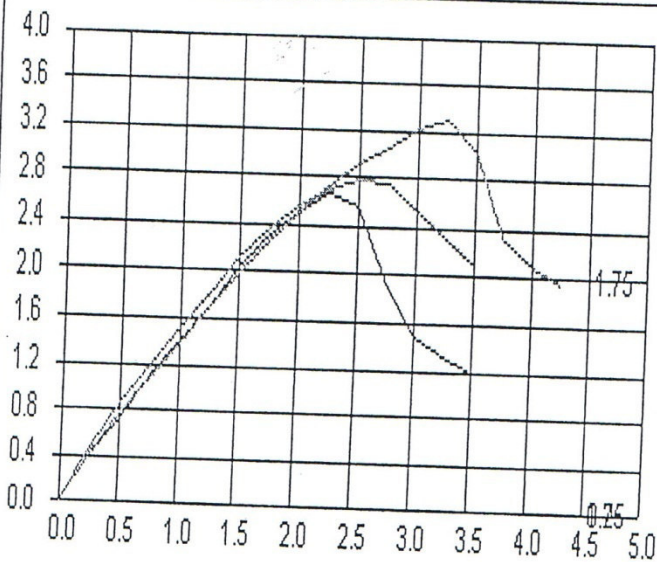
Vitesse de cisaillement : 1.2

Teneur en eau et densité

		B1	B2	B3	B4
w	I	17.8	17.8	17.8	
	F				
γ	H	01.97	01.97	01.98	
	S	01.87	01.87	01.88	

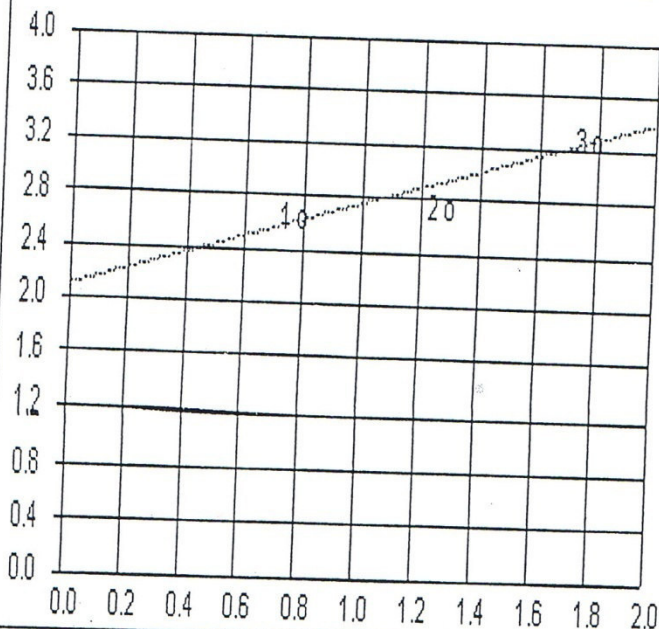
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinsèque

Affichage des résultats



Angle de frottement=33

Cohesion=2.102

σ	τ
0.75	2.661
1.25	2.779
1.75	3.314



ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité

Titre : ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS

Localisation : -

Norme : -

Coef. dynamometrique : 0.12

Chantier : SC : 01

No de l'échantillon : 01

Comparateur. No1 : 0.01

Date : -

Nature du sol : -

* Comparateur. No2 : 0.01

Dossier N° : -

Profondeur : 4.10 / 4.40

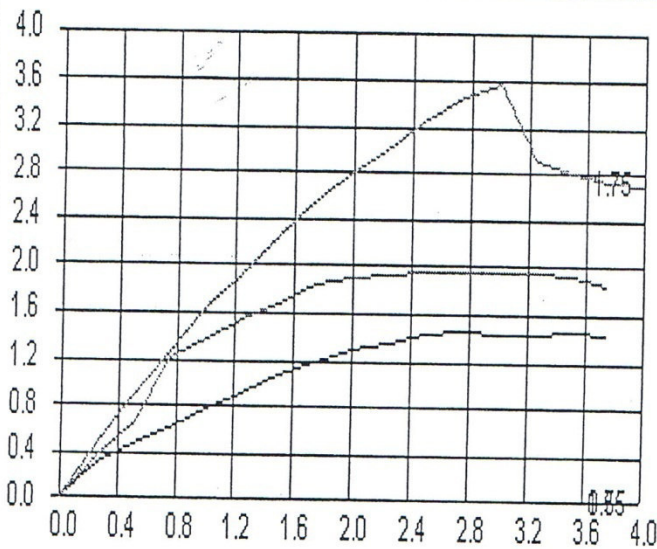
Vitesse de cisaillement : 1.2

Opérateur : -

Type D'essai : UU

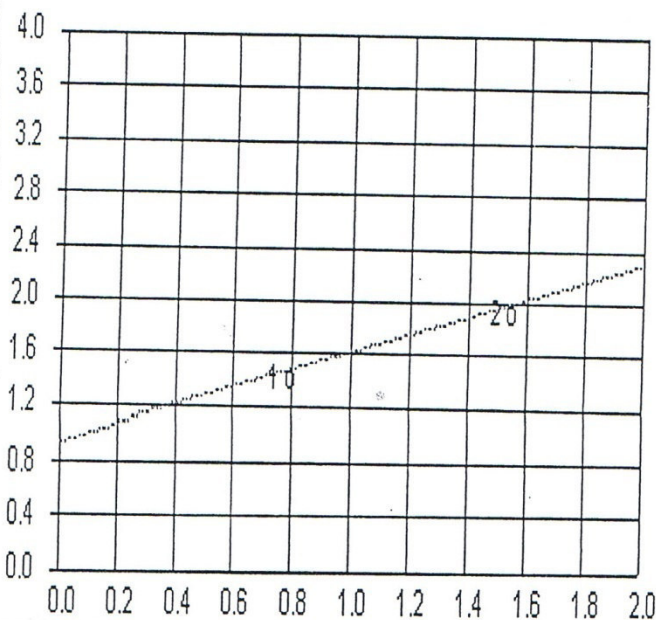
		B1	B2	B3	B4
w	I	15.4	15.4	15.4	
	F				
γ	H	01.91	01.93	01.95	
	S	01.65	01.67	01.69	

Résistance / cisaillement



Tassement gonflement

Courbe Intrinseque



Affichage des résultats

Angle de frottement=34

Cohesion=0.941

σ	τ
0.75	1.451
1.5	1.961
1.75	3.572



ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE



Titre : ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
 Localisation : SC : 02
 Chantier : -
 Date : -
 Dossier N° : -
 Opérateur : -

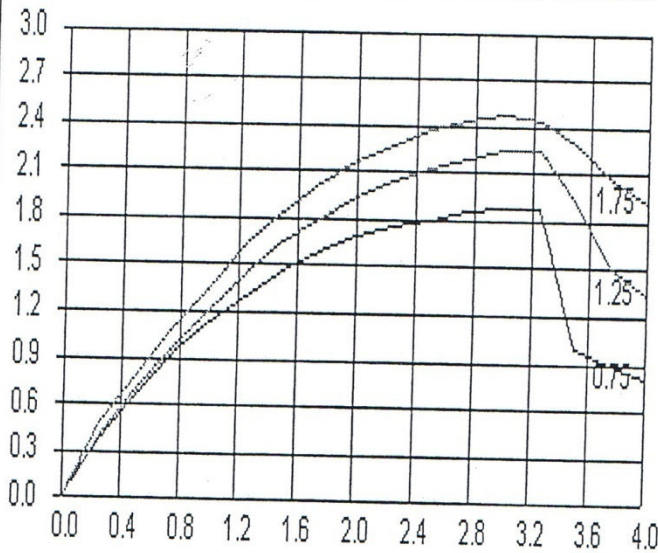
Norme : -
 No de l'échantillon : 01
 Nature du sol : -
 Profondeur : 6.10 / 6.70
 Type D'essai : UU

Coef.dynamometrique : 0.12
 Compateur. No1 : 0.01
 * Compateur. No2 : 0.01
 Vitesse de cisaillement : 1.2

Teneur en eau et densité

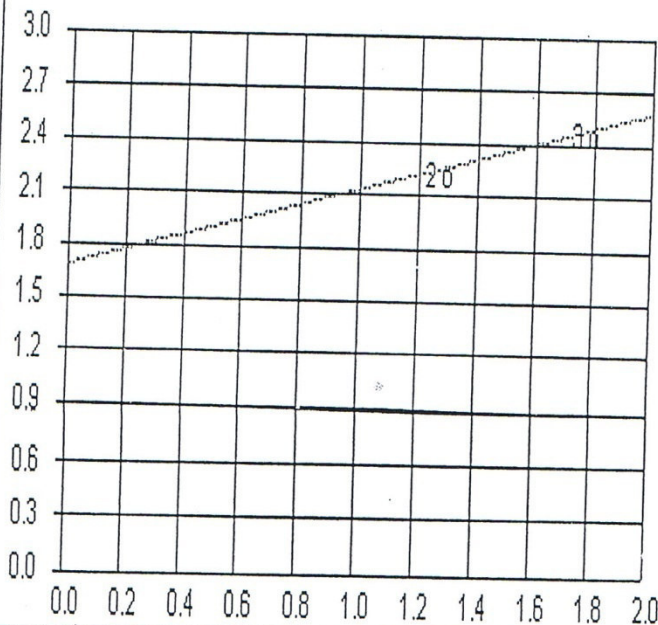
		B1	B2	B3	B4
w	I	22.8	22.8	22.8	
	F				
γ	H	02.01	02.03	02.03	
	S	01.65	01.66	01.66	

Résistance / cisaillement



Tassement gonflement

Courbe Intrinseque



Affichage des résultats

Angle de frottement=24

Cohesion=1.679

σ	τ
0.75	1.881
1.25	2.244
1.75	2.47



ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité



Titre : ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS

Localisation : SC : 01

Chantier : -

Date : -

Dossier N° : -

Opérateur : -

Norme : -

No de l'échantillon : 01

Nature du sol : -

Profondeur : 25.00 / 25.30

Type D'essai : UU

Coef.dynamometrique : 0.12

Comparateur.No1 : 0.01

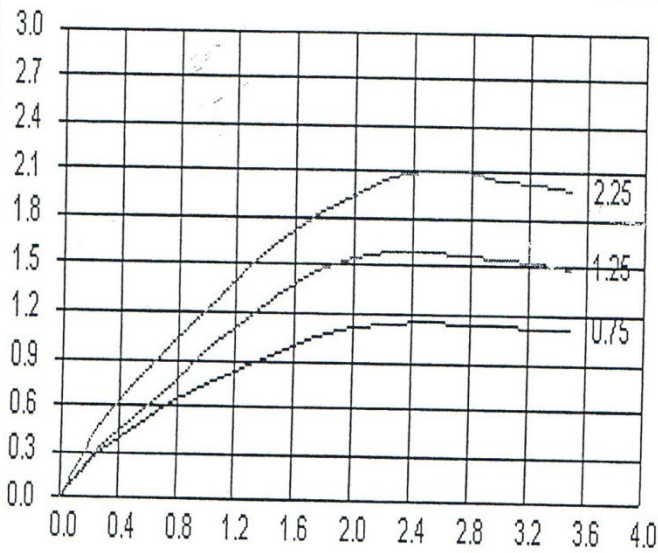
* Comparateur :No2 : 0.01

Vitesse ue cisaillement : 1.2

		B1	B2	B3	B4
w	I	20.3	20.3	20.3	
	F				
γ	H	02.05	02.08	02.07	
	S	01.71	01.71	01.72	

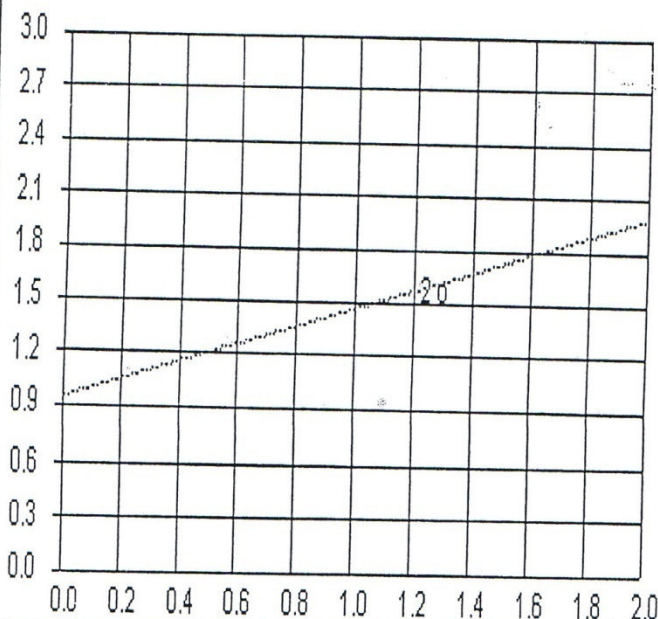
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinseque

Affichage des résultats



Angle de frottement=27

Cohesion=0.947

30

σ	τ
0.75	1.152
1.25	1.596
2.25	2.115



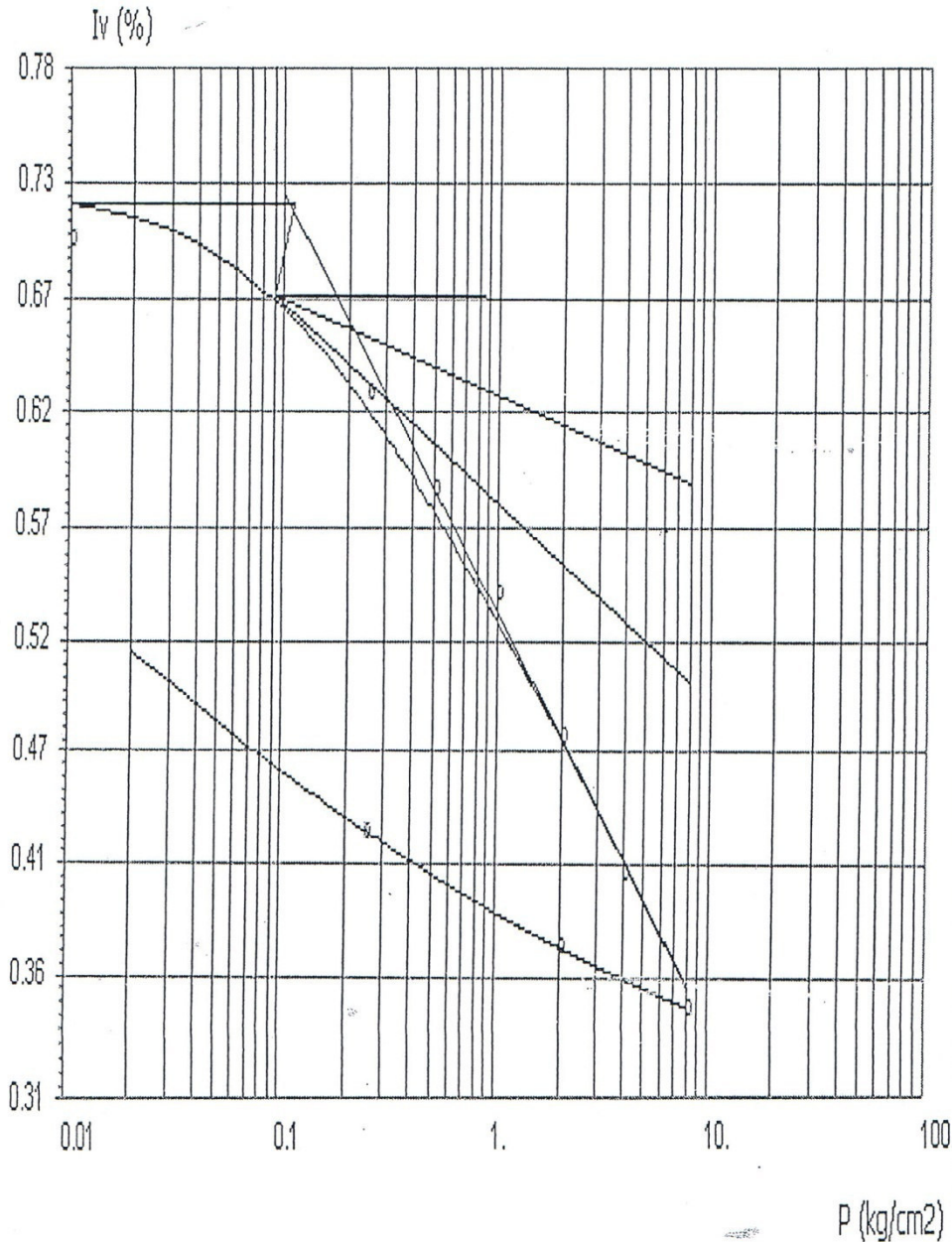
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 01
N° Echantillon 01
Profondeur 1.60 / 1.85
Nature du sol - Date -

Pc = 0.215
 Cc = 0.191
 Cg = 0.065

Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	I. vides
0.01	0.	18.5	0.7
0.25	766.	17.734	0.63
0.5	1238.	17.262	0.587
1.	1761.	16.739	0.539
2.	2458.	16.042	0.474
4.	3163.	15.337	0.41
8.	3819.	14.681	0.349
2.	3533.	14.967	0.376
0.25	2952.	15.548	0.429



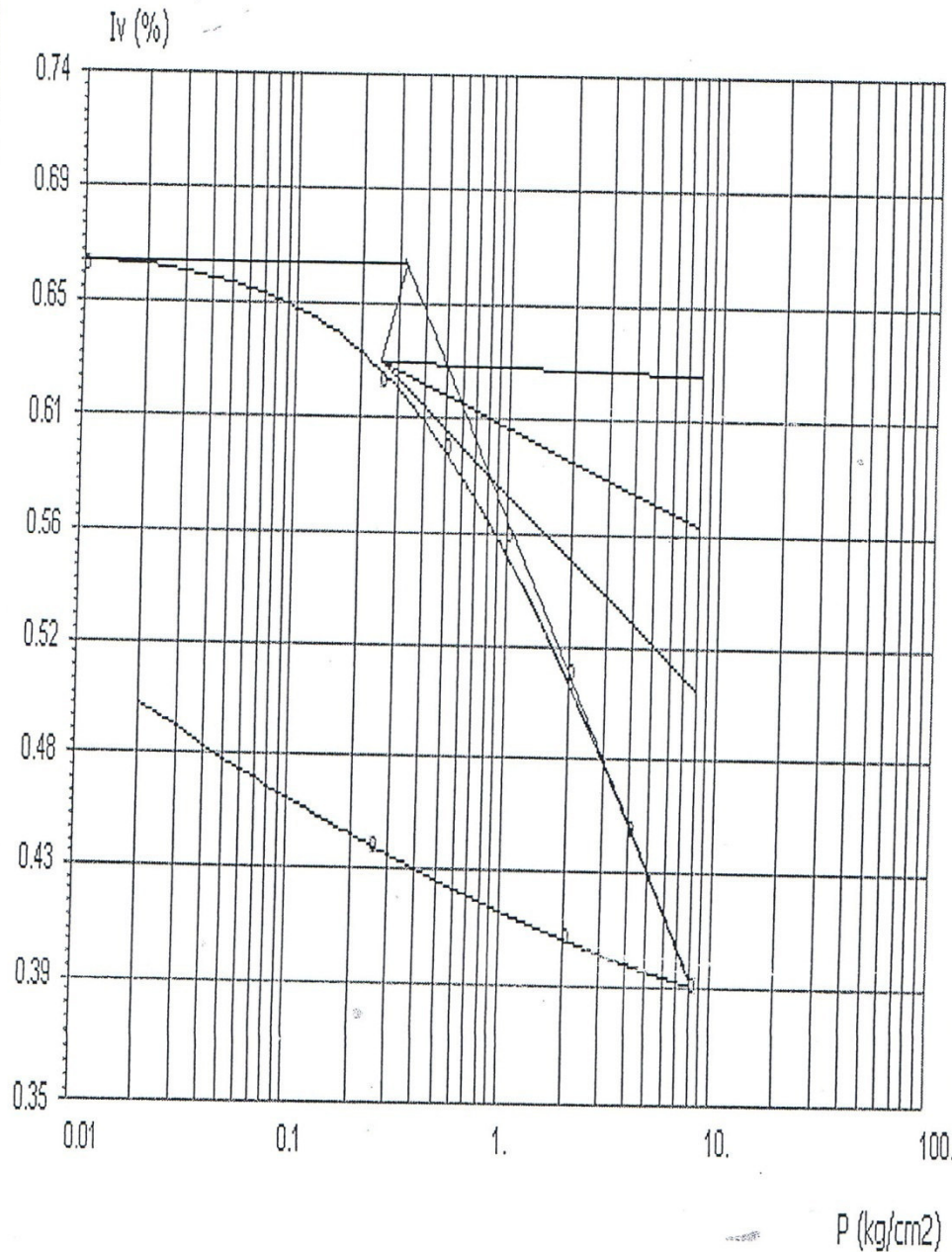
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 01
N° Echantillon 01
Profondeur 4.10 / 4.40
Nature du sol - Date -

Pc = 0.615
 Cc = 0.193
 Cg = 0.042

Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	I. vides
0.01	0.	18.5	0.662
0.25	467.	18.033	0.62
0.5	751.	17.749	0.595
1.	1115.	17.385	0.562
2.	1692.	16.808	0.51
4.	2375.	16.125	0.449
8.	3019.	15.481	0.391
2.	2828.	15.672	0.408
0.25	2455.	16.045	0.442



Groupe LCTP-SGP-TP/SINTRA
 Société par Actions au Capital de 908.000.000 DA
 DIRECTION REGIONALE D'ANNABA

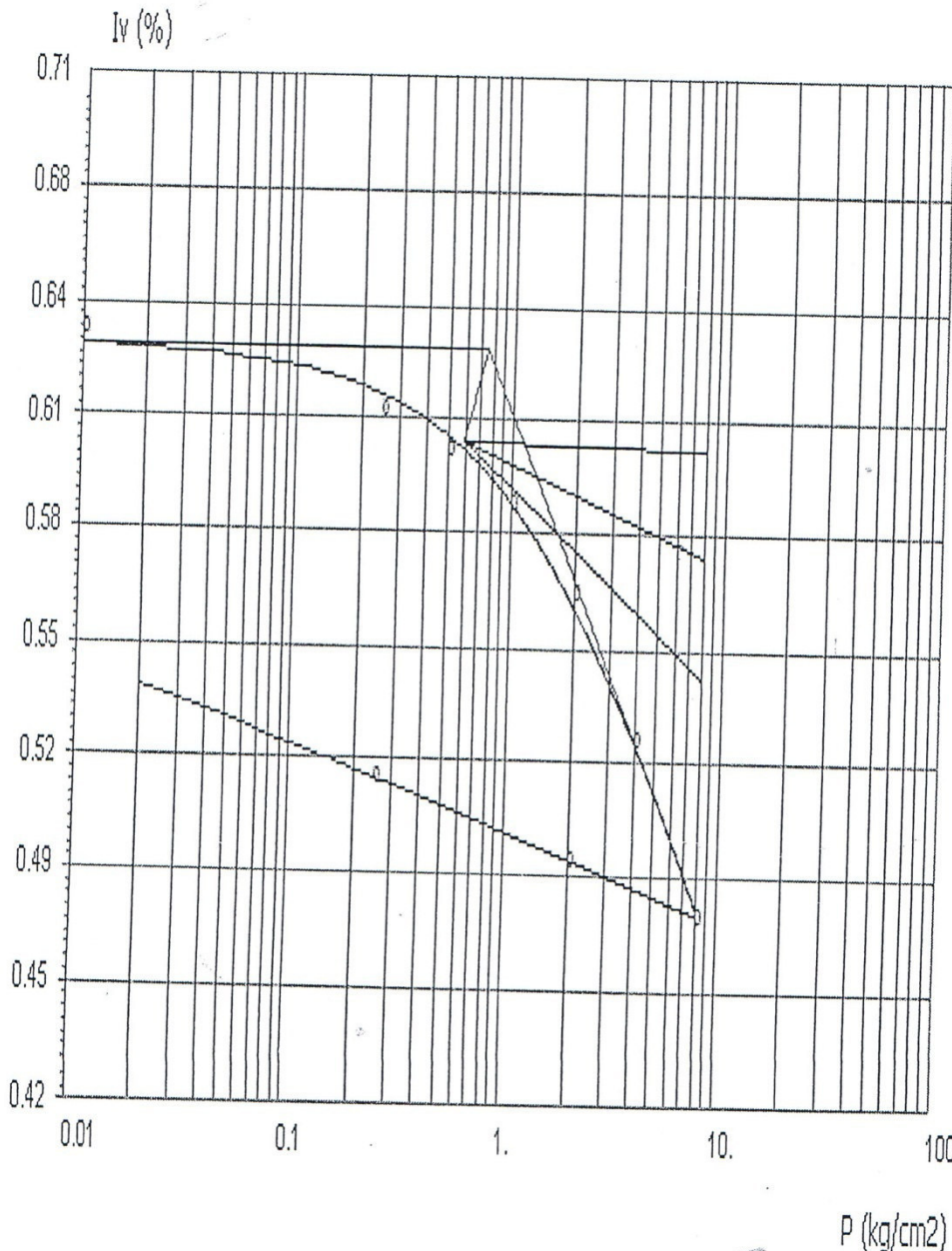
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

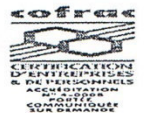
Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 01
N° Echantillon 01
Profondeur 25.00 / 25.30
Nature du sol - Date -

Pc = 1.325
 Cc = 0.151
 Cg = 0.024

Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	I. vides
0.01	0.	18.5	0.637
0.25	248.	18.252	0.615
0.5	376.	18.124	0.604
1.	543.	17.957	0.589
2.	831.	17.669	0.564
4.	1277.	17.223	0.524
8.	1830.	16.67	0.475
2.	1666.	16.834	0.49
0.25	1413.	17.087	0.512



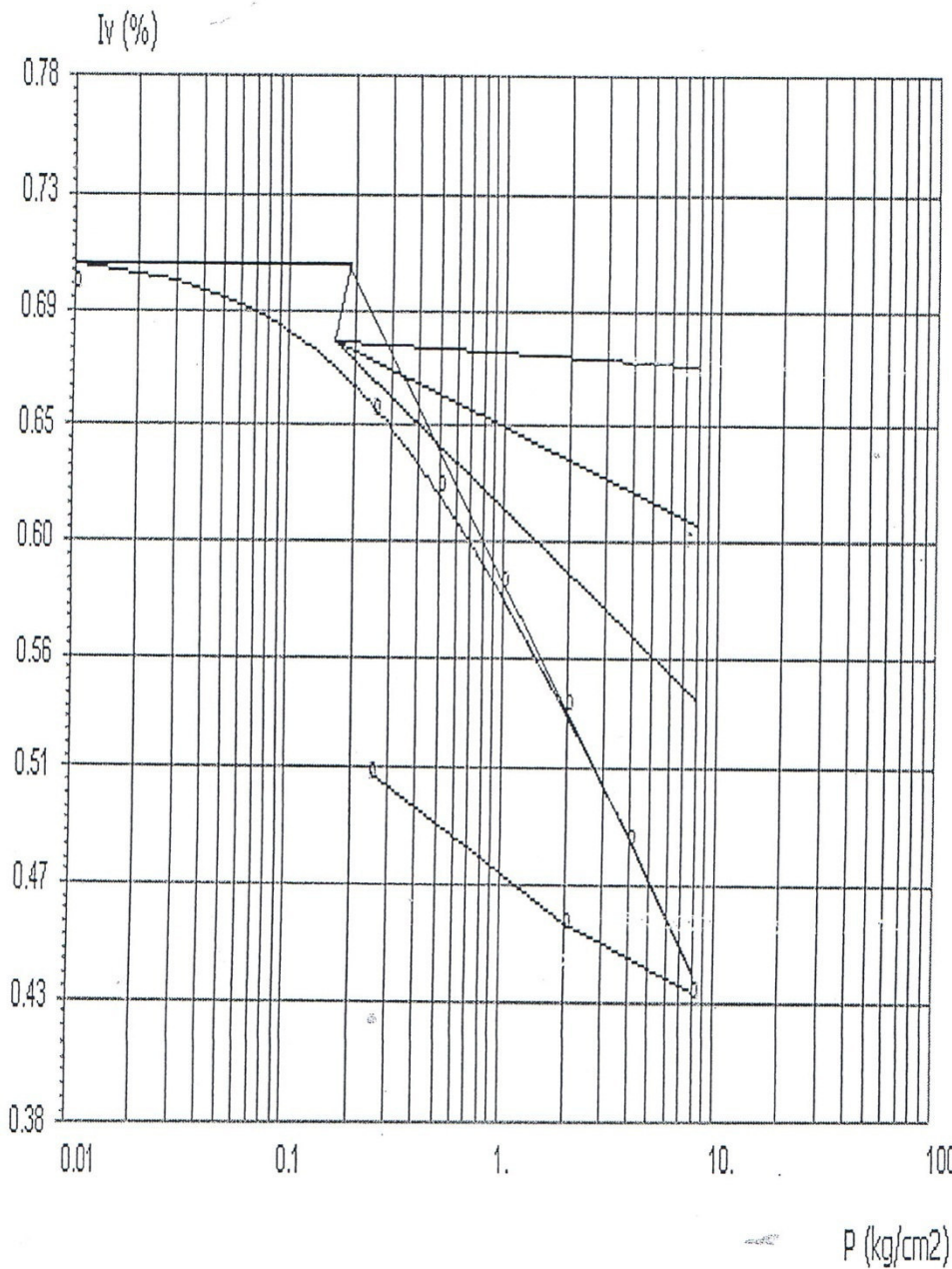
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 02
N° Echantillon 01
Profondeur 6.10 / 6.30
Nature du sol - Date -

$P_c = 0.385$
 $C_c = 0.165$
 $C_g = 0.056$

Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	l. vides
0.01	0.	18.5	0.7
0.25	523.	17.977	0.652
0.5	843.	17.657	0.623
1.	1229.	17.271	0.587
2.	1741.	16.759	0.54
4.	2308.	16.192	0.488
8.	2938.	15.562	0.43
2.	2660.	15.84	0.456
0.25	2046.	16.454	0.512



ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité

Titre : TRAITEMENT DE POINT DE GLISSEMENT SUR RN 20 PK 148+000 AIN ZANA

Localisation : SC : 01

Norme : -

Coef. dynamometrique : 0.12

Chantier : -

No de l'échantillon : 01

Compateur. No1 : 0.01

Date : -

Nature du sol : -

* Compateur. No2 : 0.01

Dossier N° : -

Profondeur : 6.40 / 6.80

Vitesse de cisaillement : 0.0024

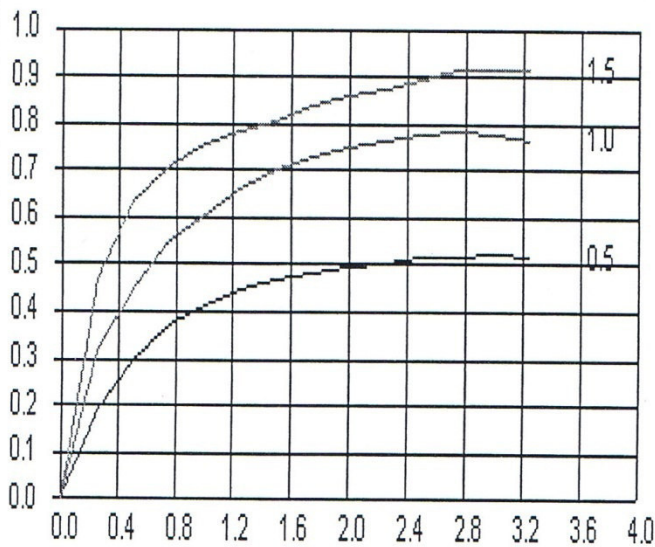
Opérateur : -

Type D'essai : CD

		B1	B2	B3	B4
w	I	21.5	21.5	21.5	
	F	20.2	25.2	24.5	
γ	H	02.06	02.08	02.11	
	S	01.7	01.72	01.72	

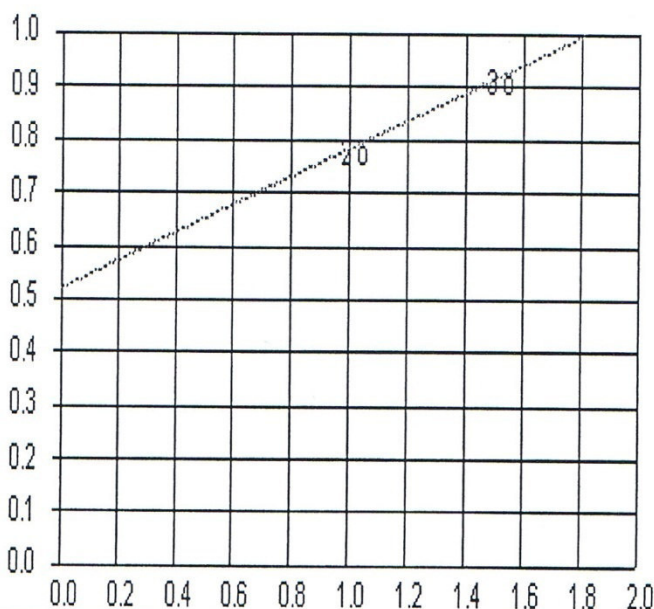
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinsèque

Affichage des résultats



Angle de frottement=14

Cohesion=0.52

σ	τ
0.5	0.521
1.0	0.784
1.5	0.916



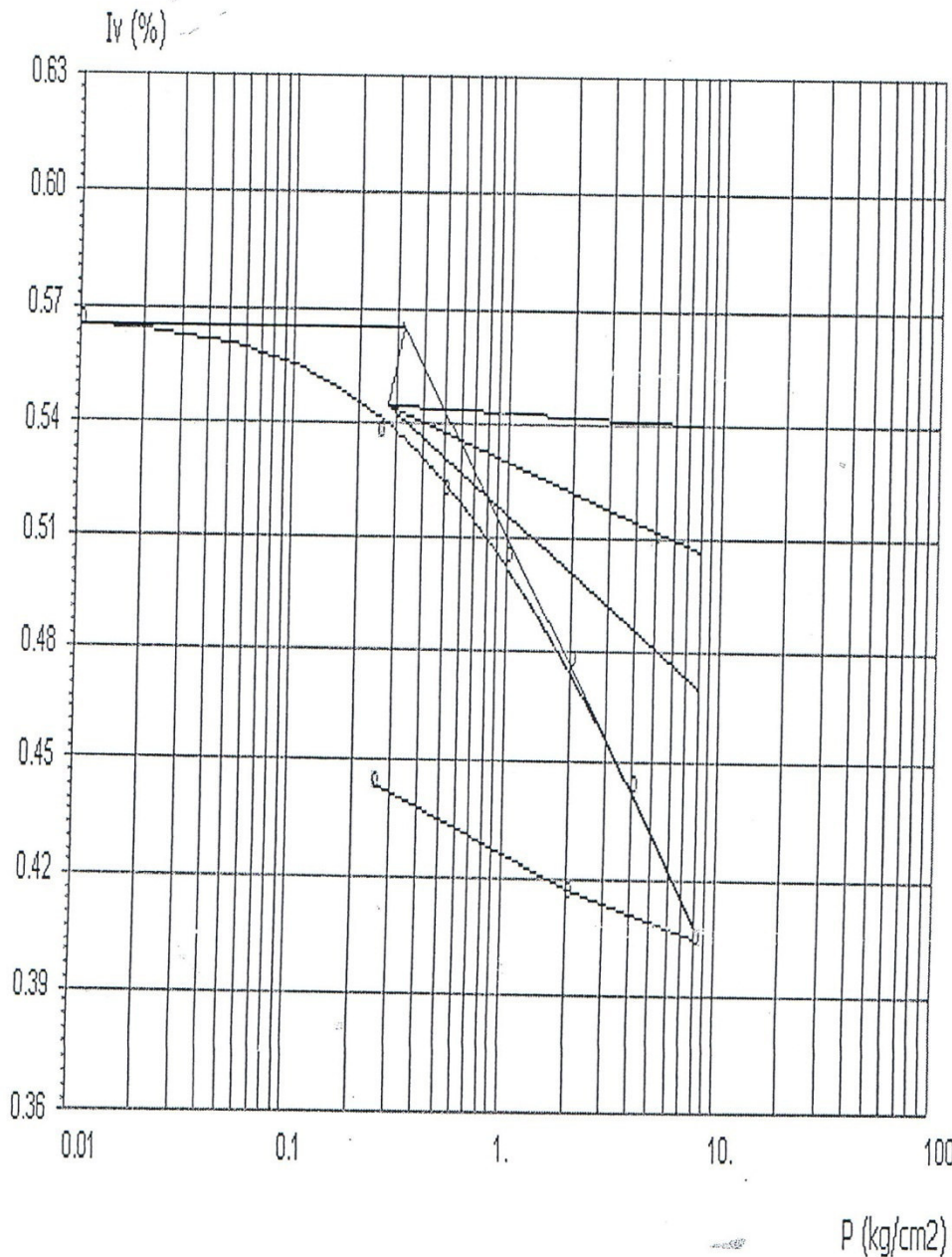
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 02
N° Echantillon 01
Profondeur 29.60 / 29.90
Nature du sol - Date -

$P_c = 0.635$
 $C_c = 0.111$
 $C_g = 0.027$

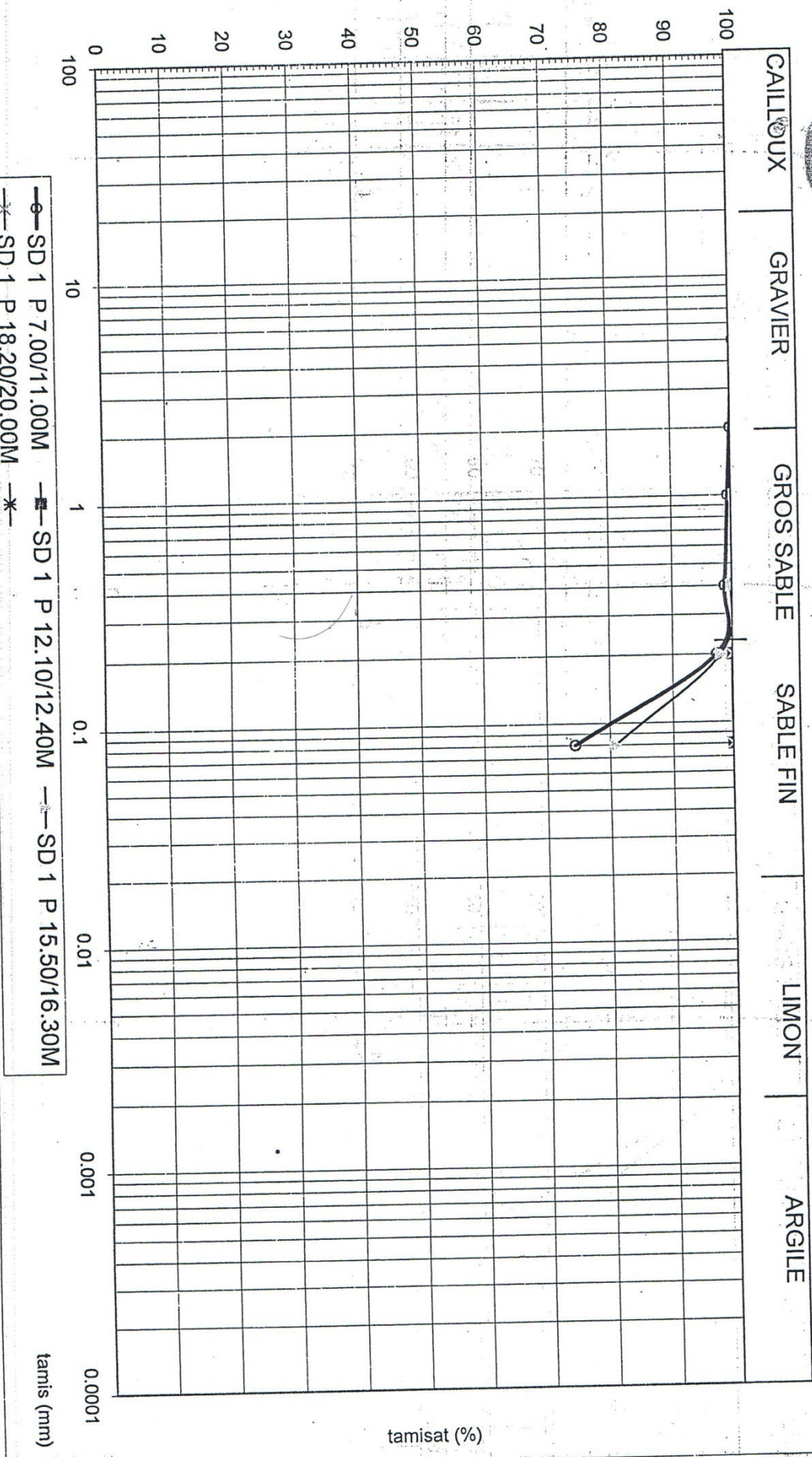
Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	I. vides
0.01	0.	19.	0.565
0.25	347.	18.653	0.536
0.5	534.	18.466	0.521
1.	759.	18.241	0.503
2.	1078.	17.922	0.476
4.	1481.	17.519	0.443
8.	1960.	17.04	0.404
2.	1806.	17.194	0.416
0.25	1479.	17.521	0.443



TRAITEMENT DES PTS DE GLISSEMENT PK125-126 RN81



—○— SD 1 P 7.00/11.00M —■— SD 1 P 12.10/12.40M —●— SD 1 P 15.50/16.30M
—*— SD 1 P 18.20/20.00M —*—

tamisat (%)

tamis (mm)



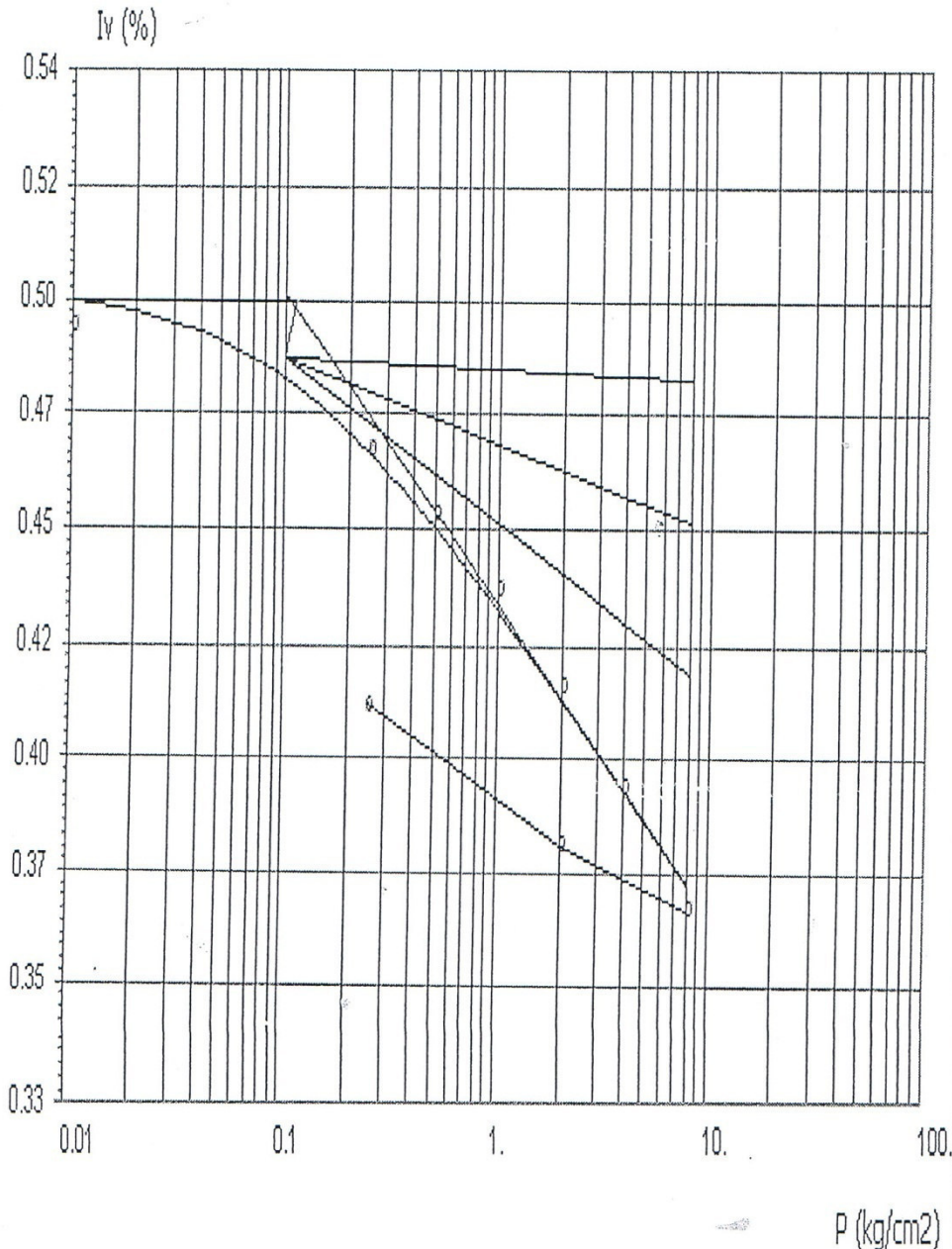
ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOLIRA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 03
N° Echantillon 01
Profondeur 32.40 / 32.90
Nature du sol - Date -

$P_c = 0.235$
 $C_c = 0.066$
 $C_g = 0.030$

Tableau des valeurs



P kg/cm ²	dh	Hi-dh	I. vides
0.01	0.	19.	0.49
0.25	334.	18.666	0.464
0.5	511.	18.489	0.45
1.	713.	18.287	0.434
2.	971.	18.029	0.414
4.	1251.	17.749	0.392
8.	1584.	17.416	0.366
2.	1405.	17.595	0.38
0.25	1018.	17.982	0.41

Société par Actions au Capital de 908.000.000 DA
DIRECTION REGIONALE D'ANNABA

ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité

Titre : TRAITEMENT DES POINTS DE GLISSEMENT SECTION PK125a126 RN81 COTE AYAL

Localisation : SC : 01

Norme : -

Coef.dynamometrique : 0.12

Chantier : -

No de l'echantillon : -

Compateur. No1 : 0.01

Date : -

Nature du sol : -

* Compateur. No2 : 0.01

Dossier N° : -

Profondeur : 18.50 / 20.00

Vitesse de cisaillement : 1.2

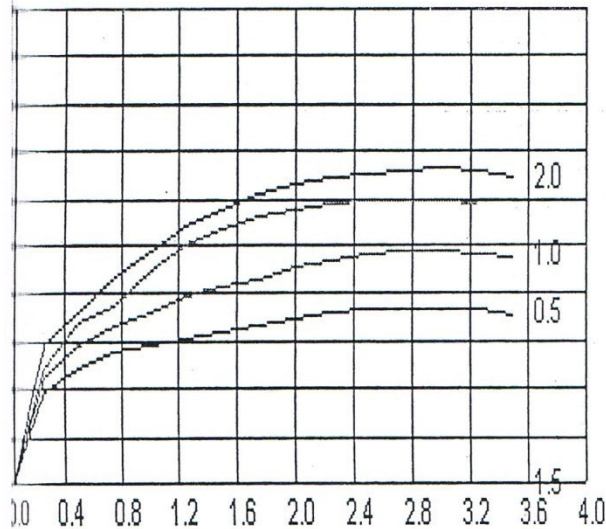
Opérateur : -

Type D'essai : UU

		B1	B2	B3	B4
w	I	29.3	29.3	29.3	29.3
	F				
γ	H	02.09	02.1	02.1	02.1
	S	01.62	01.62	01.62	01.62

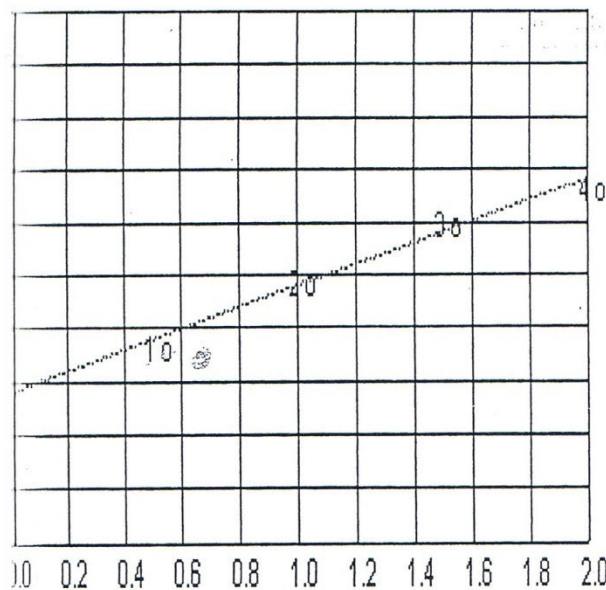
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinseque

Affichage des résultats



Angle de frottement=11

Cohesion=0.279

σ	τ
0.5	0.367
1.0	0.49
1.5	0.599
2.0	0.666



مخبر الأشغال العمومية للشرق
EPE LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DE L'EST



Groupe LCTP-SGP-TP/SINTRA
 Société par Actions au Capital de 908.000.000 DA
 DIRECTION REGIONALE D'ANNABA

ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité

Titre : TRAITEMENT DE POINT DE GLISSEMENT RN 20 PK 148+000 AIN ZANA

Localisation : SC : 01

Norme : -

Coef.dynamometrique : 0.12

Chantier : -

No de l'echantillon : 01

Comparateur .No1 : 0.01

Date : -

Nature du sol : -

* Comparateur .No2 : 0.01

Dossier N° : -

Profondeur : 24.30 / 24.60

Vitesse de cisaillement : 0.0024

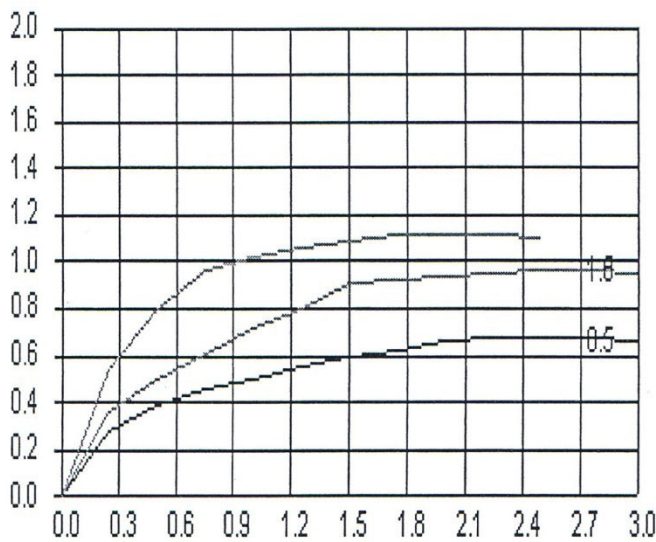
Opérateur : -

Type D'essai : CD

		B1	B2	B3	B4
w	I	13.4	13.4	13.4	
	F	17.9	17.0	14.3	
γ	H	02.19	02.19	02.2	
	S	01.93	01.94	01.94	

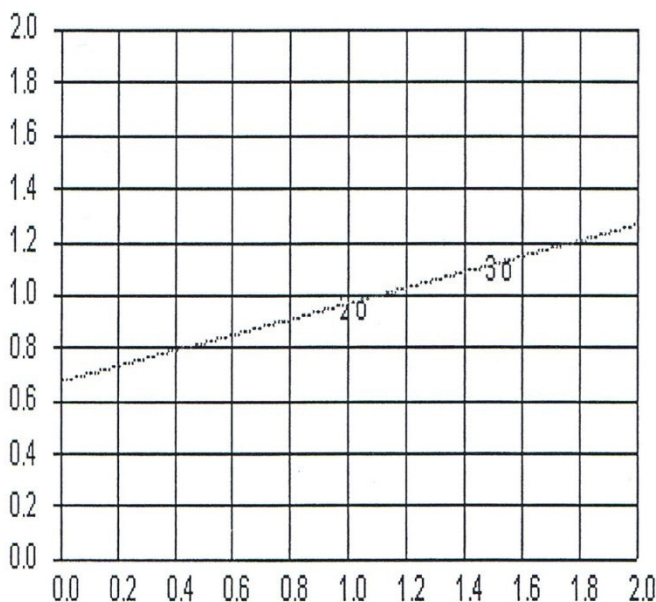
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinseque

Affichage des résultats



Angle de frottement=16

Cohesion=0.673

σ	τ
0.5	0.681
1.0	0.969
1.5	1.117

ESSAI A L'OEDOMETRE

RESULTATS

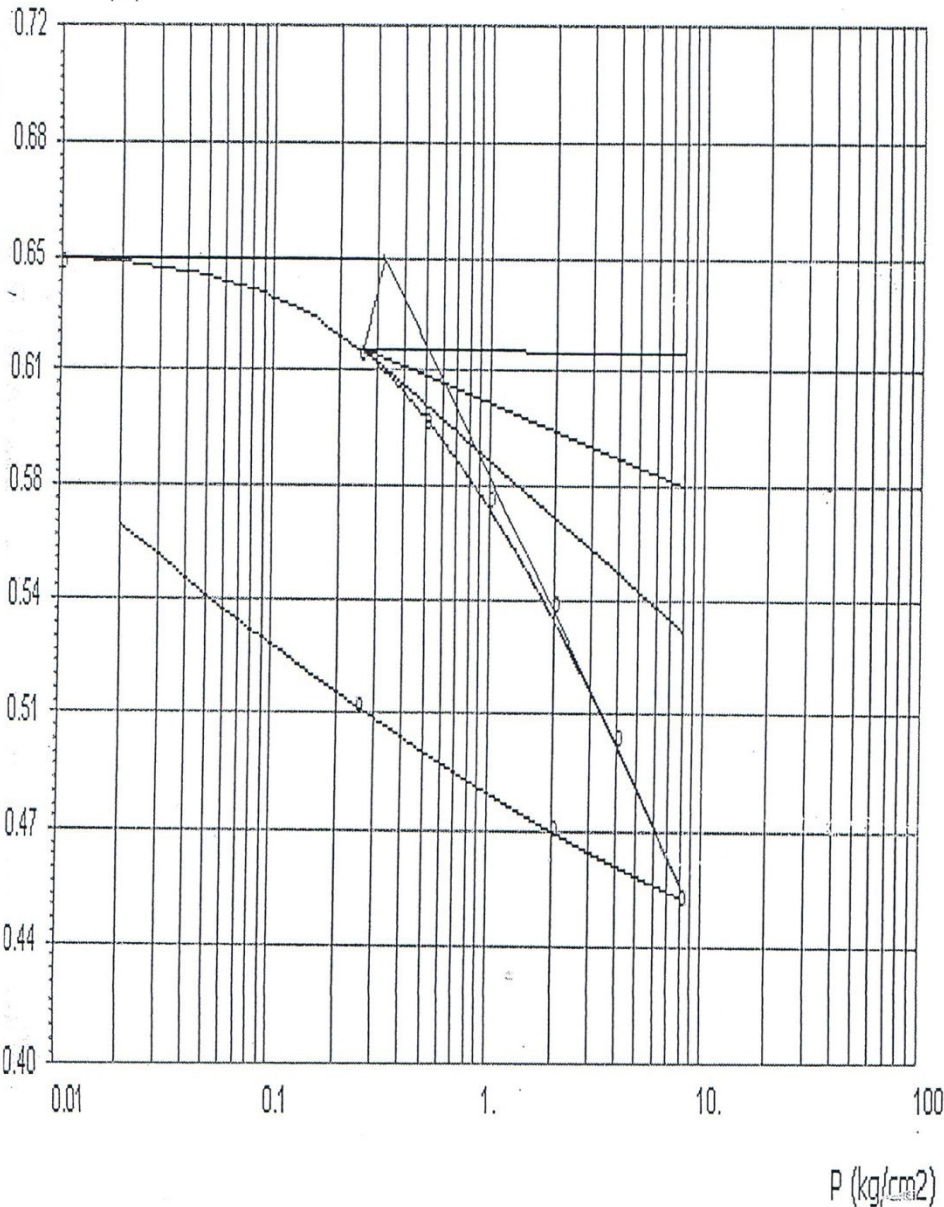
Titre ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS
Chantier SC : 02
N° Echantillon 01
Profondeur 8.10 / 8.40
Nature du sol - Date -

Pc = 0.625
 Cc = 0.137
 Cg = 0.045

Tableau des valeurs

P kg/cm ²	dh	Hi-dh	l. vides
0.01	0.	18.5	0.646
0.25	322.	18.178	0.617
0.5	553.	17.947	0.597
1.	817.	17.683	0.573
2.	1196.	17.304	0.54
4.	1649.	16.851	0.499
8.	2180.	16.32	0.452
2.	1959.	16.541	0.472
0.25	1544.	16.956	0.509

Iv (%)



ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Teneur en eau et densité

Titre : TRAITEMENT DES POINTS DE GLISSEMENT SECTION PK125a126 RN81 COTE AVAL

Localisation : SC : 01

Norme : -

Coef.dynamometrique : 0.12

Chantier : -

No de l'échantillon : -

Comparateur. No1 : 0.01

Date : -

Nature du sol : -

* Comparateur. No2 : 0.01

Dossier N° : -

Profondeur : 15.50 / 16.30

Vitesse de cisaillement : 1.2

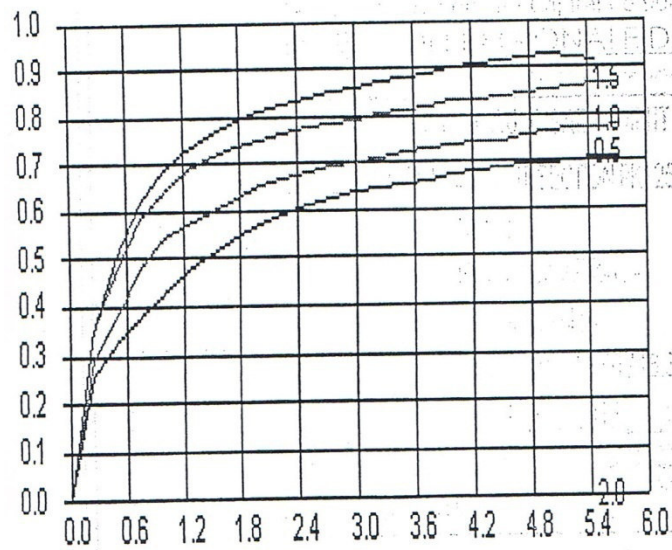
Opérateur : -

Type D'essai : UU

		B1	B2	B3	B4
w	I	25.4	25.4	25.4	25.4
	F				
γ	H	02.15	02.15	02.15	02.15
	S	01.71	01.71	01.71	01.71

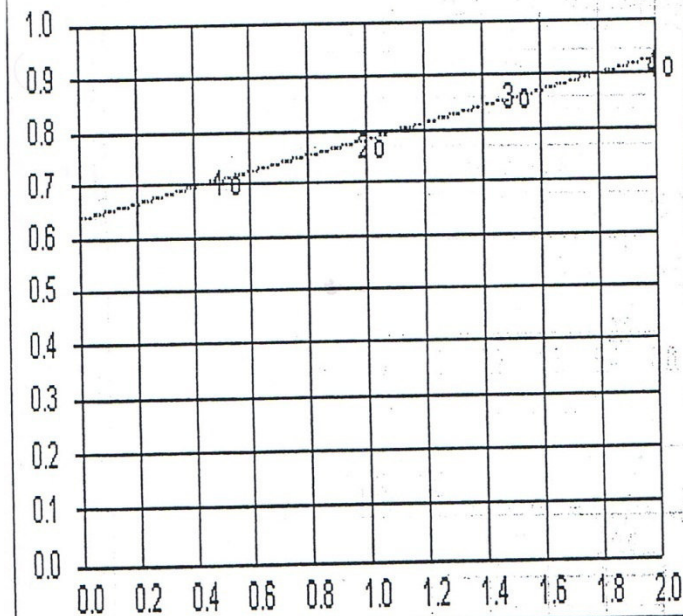
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinsèque

Affichage des résultats



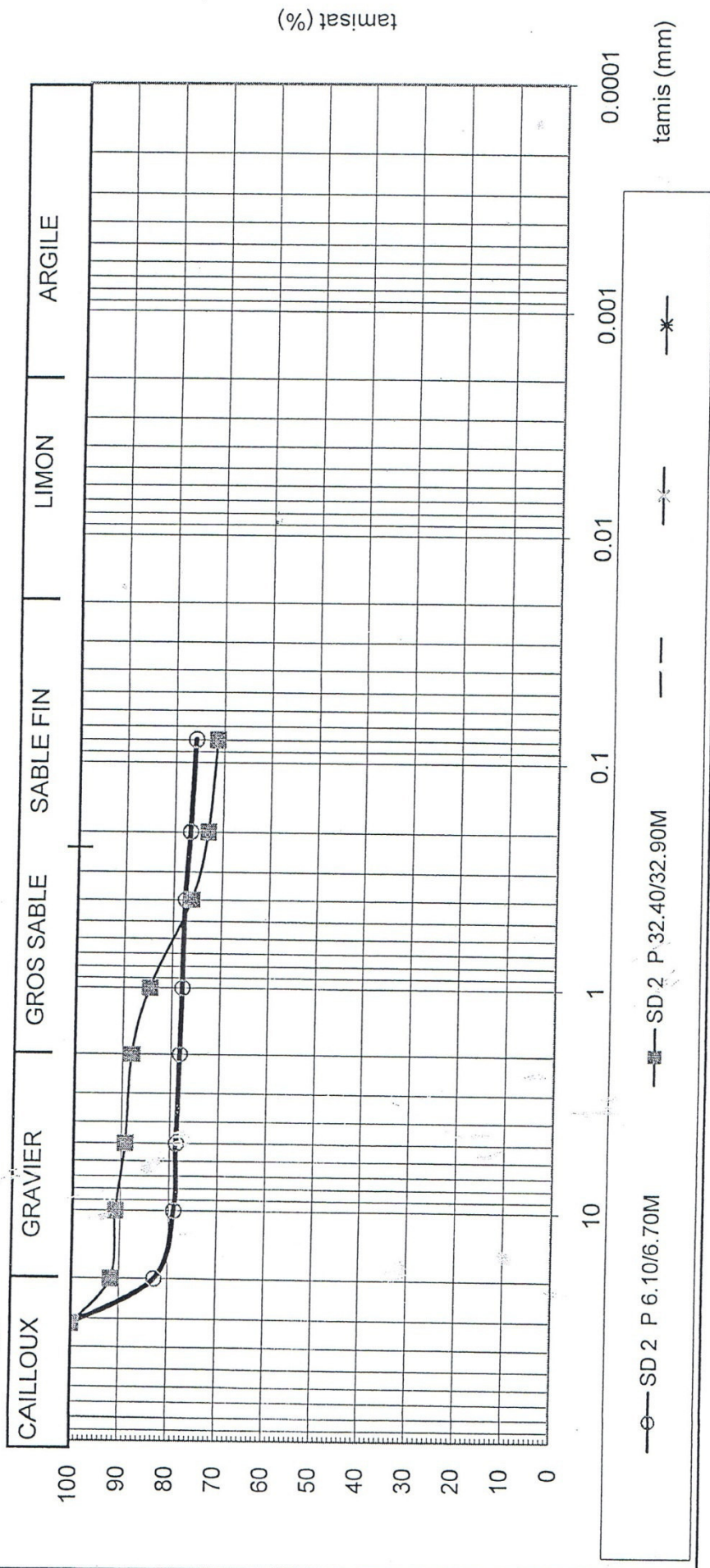
Angle de frottement=8

Cohesion=0.636

σ	τ
0.5	0.71
1.0	0.778
1.5	0.87
2.0	0.926



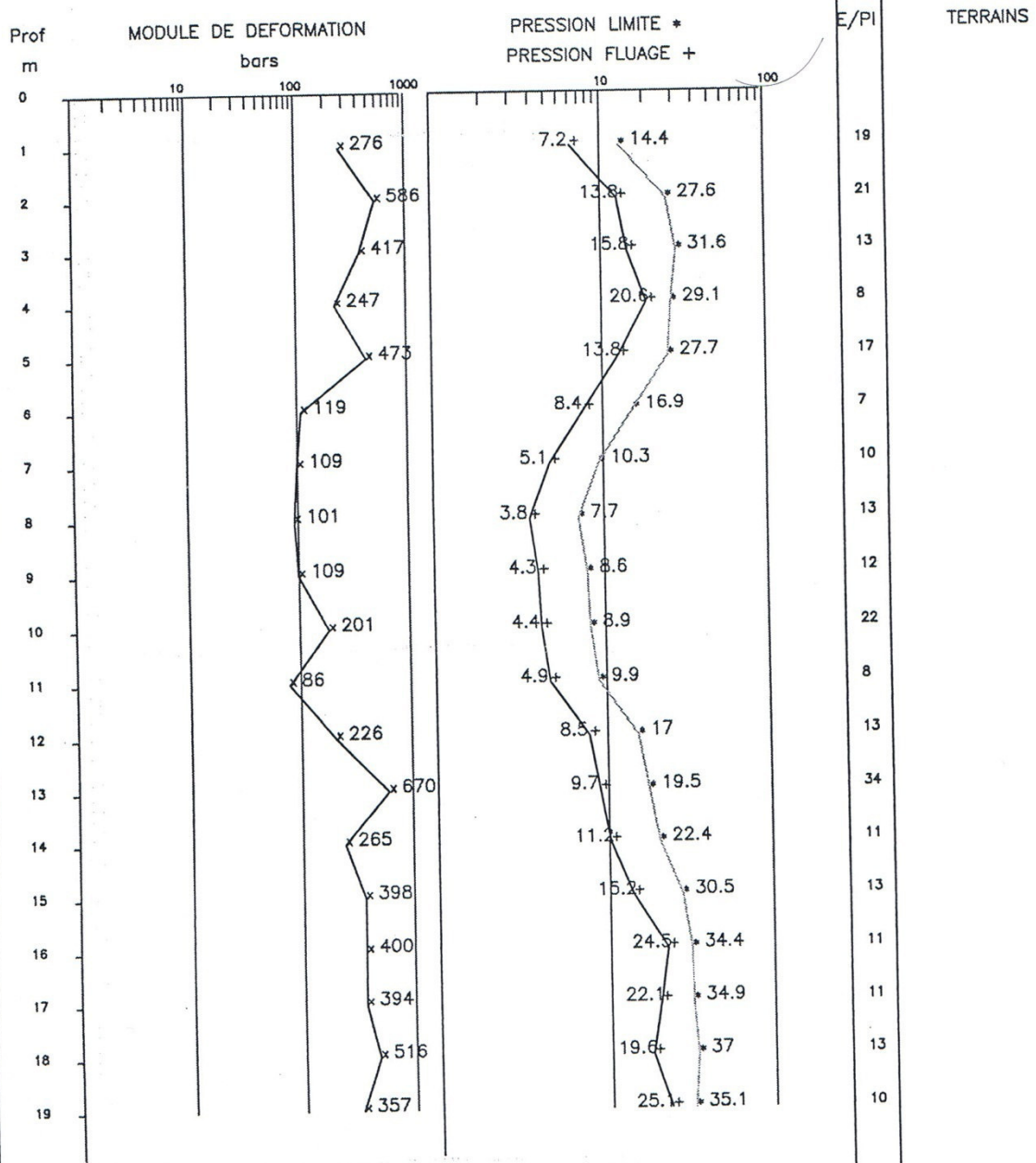
ETUDE GEOTECHNIQUE RN 81 S/AHRAS





ESSAI PRESSIOMETRIQUE : Synoptique

Code/No Sondage : D:PKSP5 RES

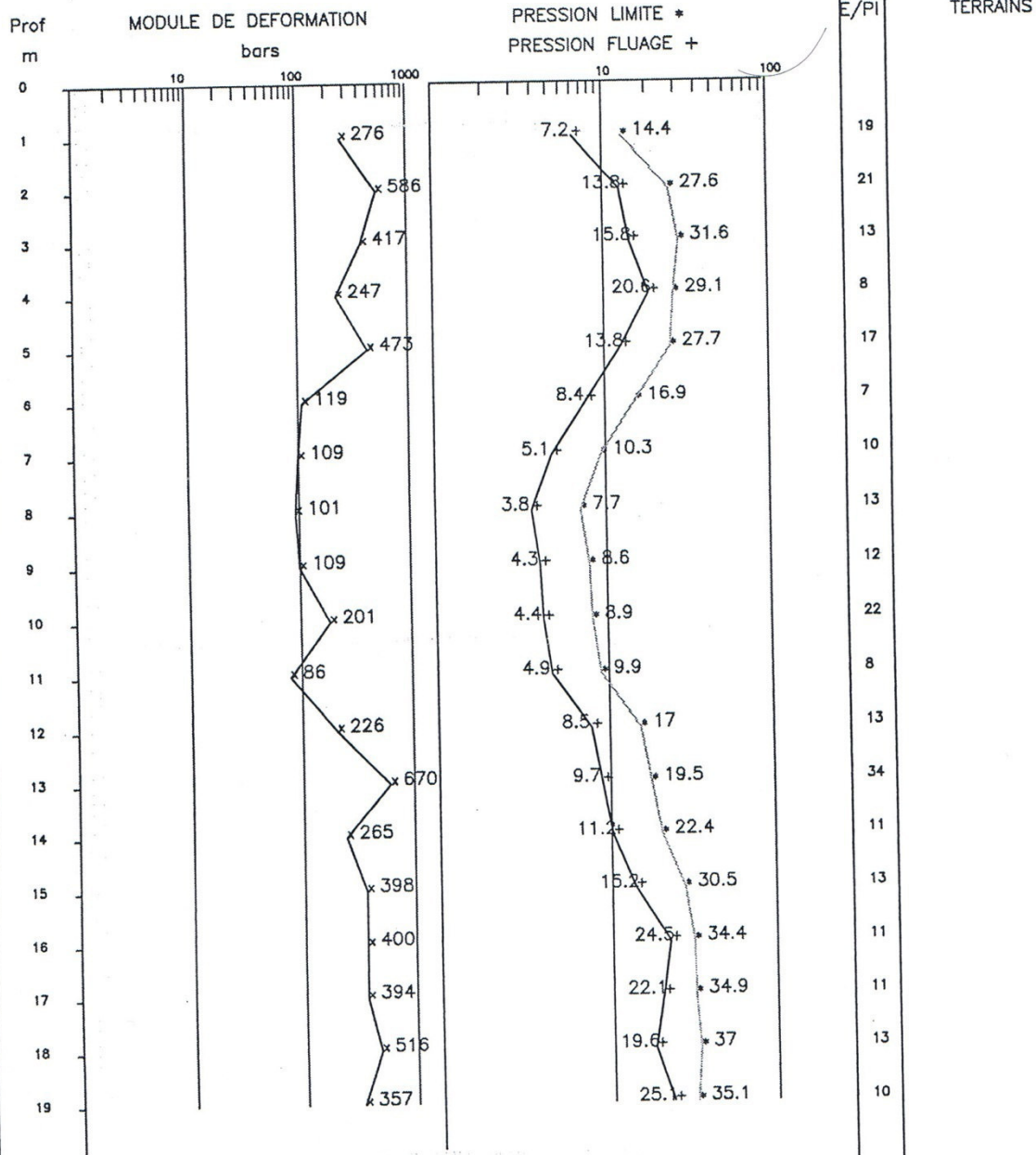


L.P. ET



ESSAI PRESSIOMETRIQUE : Synoptique

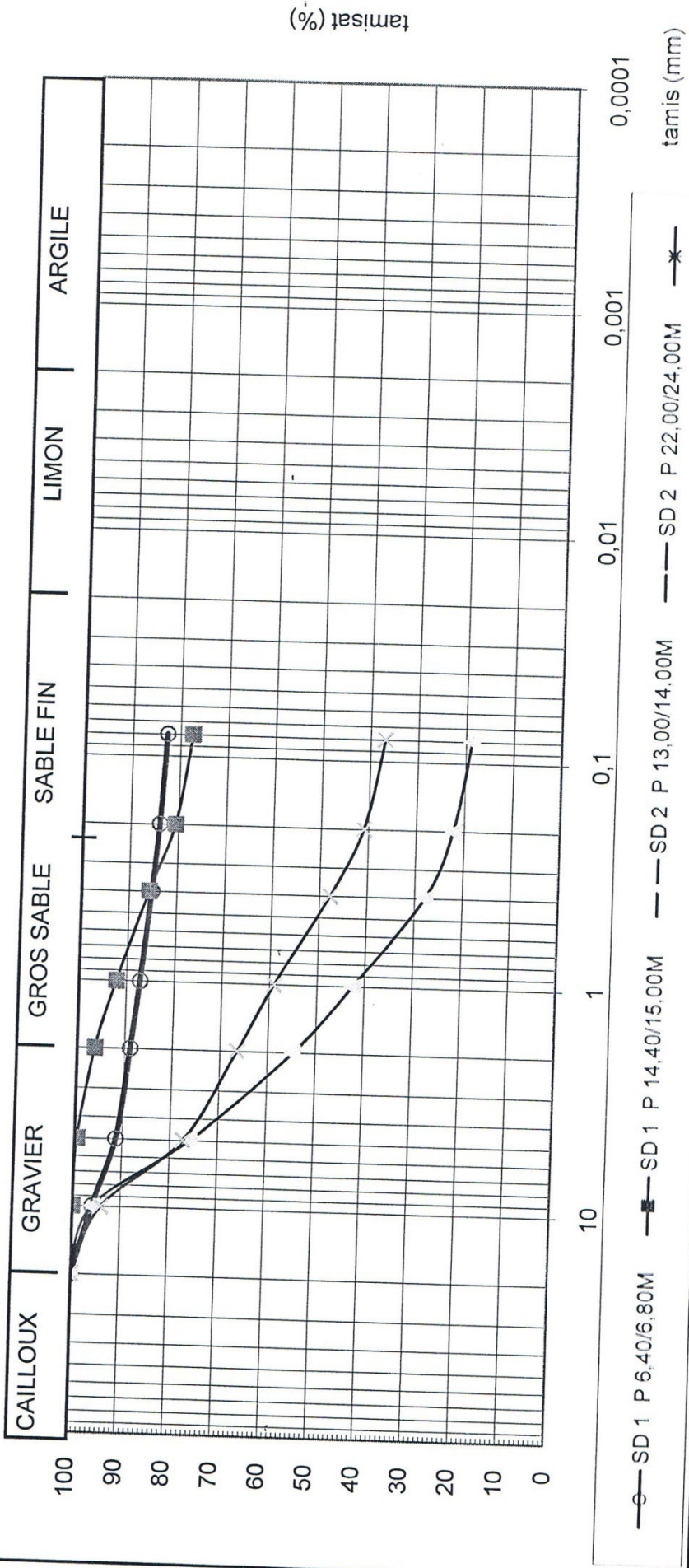
Code/No Sondage : D:PKSP5 RES



1.1.1.1.1



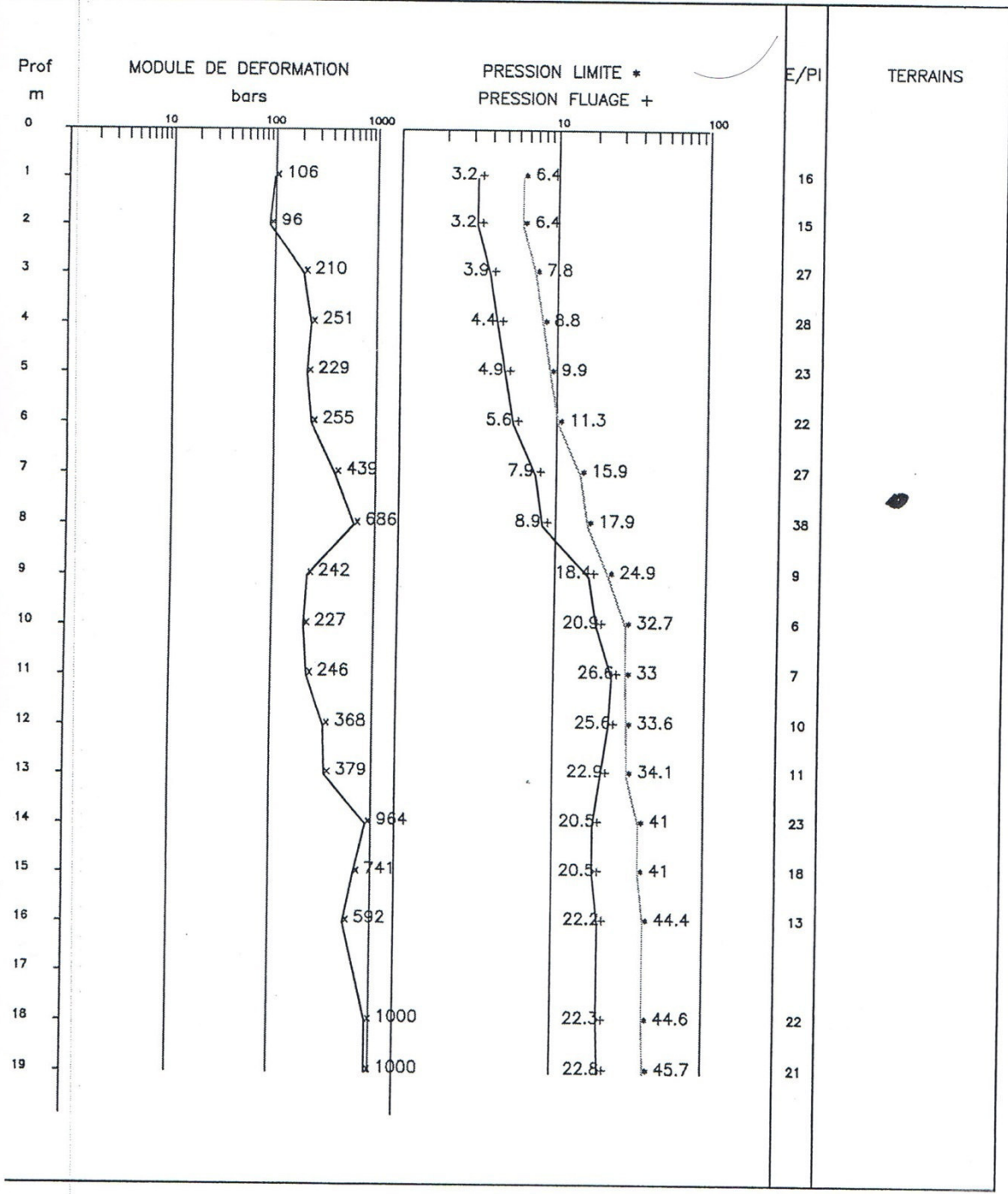
TRAITEMENT DE GLISSEMENT SUR LA R20 PK 148+000 S/AHRAS





ESSAI PRESSIOMETRIQUE : Synoptique

Code/No Sondage : D:PKSP2 RES



- Les resultats des essais de pénétrations standard (SPT) :

SONDAGE N°=01

Nbre de coups en prof profondeur	15 cm	30 cm	45 cm
5.50-6.00 m	16	17	20
7.50-8.00 m	17	20	22
9.50-10.00 m	19	21	23
11.50-12.00 m	22	25	30
13.50-14.00 m	30	33	35
15.50-16.00 m	33	39	40
19.50-20.00 m	36	38	40

SONDAGE N°=02

Nbre de coups en prof profondeur	15 cm	30 cm	45 cm
7.00-7.50 m	28	30	40
9.50-10.00 m	30	38	44
11.50-12.00 m	30	40	51
17.50-18.00 m	29	33	37
19.50-20.00 m	25	27	35
21.50-22.00 m	20	28	30
23.50-24.00 m	26	29	35
25.50-26.00 m	27	30	35

;

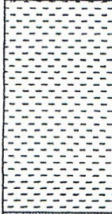


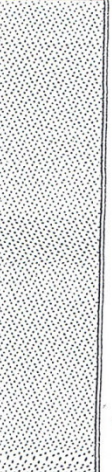
SC	SC02	SC03
Profondeur (m)	29.6 – 29.9	32.4 – 32.9
δ_d t/m ³	-	-
δ_h t/m ³	-	-
W(%)	-	-
Sr (%)	-	-
LIMITES D'ATTERBERG		
Wl	-	-
ip %	-	-
lc	-	-
ANALYSE GRANULOMETRIQUE		
2.00 mm	-	88.1
0.08 mm	-	71.4
20 μ m	-	-
2.0 μ m	-	-
CISAILLEMENT RECTILIGNE		
C (bars)	2.816	2.585
Φ (°)	20	32
CARACTERISTIQUES OEDOMETRIQUES		
P _c	0.635	0.235
C _t	0.111	0.066
C _g	0.027	0.030
ANALYSES CHIMIQUES		
CARBONATES %	18.38	17.64
INSOLUBLES	80.11	81.68
GYPSE %	1.86	1.53
AGRESSIVITTE	forte	forte

3.2.2 AU LABORATOIRE :RN81évitement DARDOURA (SOUK AHRAS).

Les résultats sont insérés dans le tableau suivant :

SC	SC01	SC01	SC01	SC01	SC02	SC02
Profondeur (m)	1.6 – 1.85	4.10 - 4.40	11.4 – 11.55	25.00-25.30	6.10-6.70	8.10-8.40
δ_d t/m ³	-	-	-	-	1.58	1.64
δ_h t/m ³	-	-	-	-	2.00	2.00
W(%)	-	-	-	-	26.2	22.10
Sr (%)	-	-	-	-	99	92
LIMITES D'ATTERBERG						
Wl	-	-	-	-	64	-
Ip %	-	-	-	-	28	-
Ic	-	-	-	-	1.35	-
ANALYSE GRANULOMETRIQUE						
2.00 mm	-	-	-	-	78.2	-
0.08 mm	-	-	-	-	75.9	-
20 μ m	-	-	-	-	-	-
2.0 μ m	-	-	-	-	-	-
CISAILLEMENT RECTILIGNE						
C (bars)	2.103	0.941	1.679	0.947	-	1.531
Φ (°)	33	34	24	27	-	26
CARACTERISTIQUES OEDOMETRIQUES						
P _c	0.215	0.615	-	1.325	0.385	0.625
C _t	0.191	0.193	-	0.151	0.165	0.131
C _g	0.065	0.042	-	0.024	0.056	0.045
ANALYSES CHIMIQUES						
CARBONATES %	27.94	34.55	25.00	22.79	23.52	26.46
INSOLUBLES	62.01	61.59	73.37	77.08	66.66	72.82
GYPSE %	9.20	0.13	1.53	1.95	1.27	0.73
AGRESSIVITTE	forte	faible	forte	forte	modéré	faible

- D'après le sondage (Sc3) la lithologie rencontrée est la suivante :

COUPE GEOLOGIQUE				
SONDAGE CAROTTE (Sc ₃) coté amont				
Date : 23/02/2015	Chantier : RN81 évitement DARDOURA (SOUK AHRAS).	X= Arbitraire	Y= Arbitraire	Z= Arbitraire
Profil	Profondeur (m)	Nature du sol	Observation	
	0.00	remblai		
	04.00 m	Argile brunâtre plastique	Echantillon remanié.	
	10.00 m 24.00 m	Argile marneuse de couleur grisâtre oxydé et friable et humide par endroit		
	40.00 m	Marne dure par endroit de couleur grisâtre	Echantillon paraffiné	

ESSAI AU CISAILLEMENT RECTILIGNE

Titre : ETUDE GEOTECHNIQUE DERDOURA RN 81 SOUK AHRAS

Localisation : SC : 01

Chantier : -

Date : -

Dossier N° : -

Opérateur : -

Norme : -

No de l'échantillon : 01

Nature du sol : -

Profondeur : 1.60 / 1.85

Type D'essai : UU

Coef.dynamometrique : 0.12

Compateur. No1 : 0.01

* Compateur. No2 : 0.01

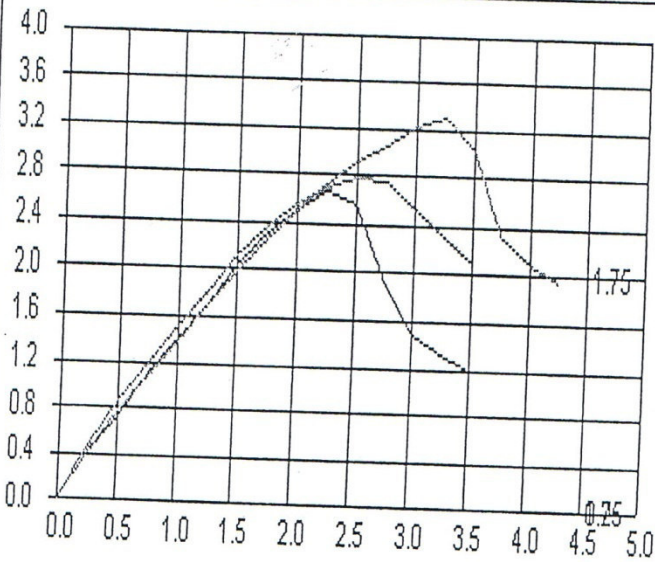
Vitesse de cisaillement : 1.2

Teneur en eau et densité

		B1	B2	B3	B4
w	I	17.8	17.8	17.8	
	F				
γ	H	01.97	01.97	01.98	
	S	01.87	01.87	01.88	

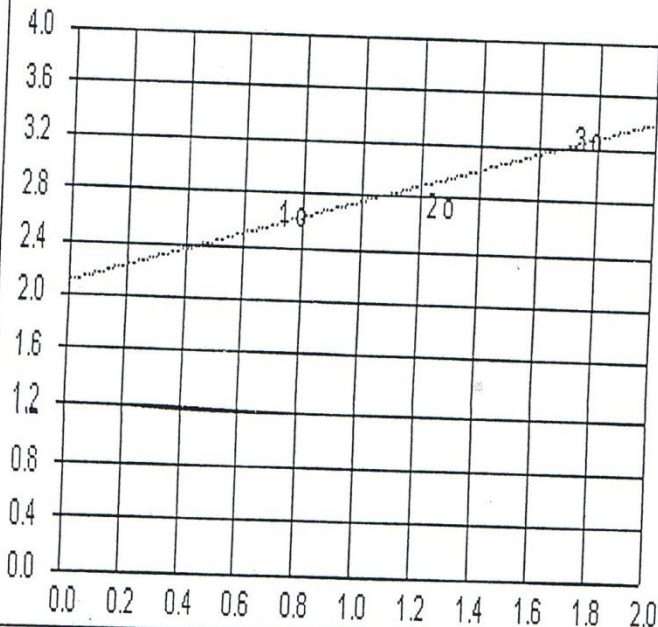
Résistance / cisaillement

Tassement gonflement



Courbe Intrinseque

Affichage des résultats



Angle de frottement=33

Cohesion=2.102

σ	τ
0.75	2.661
1.25	2.779
1.75	3.314

Time	Snowpack (mm),	Evapotranspiration (mm),	Soil Moisture (mm)	Precipitation (mm)	Change in Storage (mm)	Runoff (mm)
01/01/2000	1	19	531	21	0	2
02/15/2000	0	39	523	15	-25	1
03/15/2000,	0	59	488	23	-37	1
04/15/2000,	0	77	457	39	-39	1
05/15/2000	0	80	443	89	7	2
06/15/2000	0	55	432	40	-16	1
07/15/2000	0	17	414	3	-15	1
08/15/2000	0	17	410	17	-1	1
09/15/2000	0	21	411	35	13	1
10/15/2000	0	23	430	68	43	2
11/15/2000	0	32	463	38	5	1
12/15/2000	0	34	474	57	21	2
01/15/2001,0,25,507,75,47,3						
02/15/2001,0,36,531,41,5,0						
03/15/2001,0,92,509,27,-65,0						
04/15/2001,0,66,450,35,-32,1						
05/15/2001,0,64,437,57,-9,2						
06/15/2001,0,38,414,3,-35,0						
07/15/2001,0,10,397,4,-6,0						
08/15/2001,0,5,393,5,0,0						
09/15/2001,0,18,401,59,40,1						
10/15/2001,0,30,431,22,-8,0						
11/15/2001,0,22,453,59,36,1						
12/15/2001,1,22,467,41,18,1						
01/15/2002,0,25,481,23,-2,0						
02/15/2002,0,31,476,28,-3,0						
03/15/2002,0,50,454,40,-11,1						
04/15/2002,0,78,452,43,-36,1						
05/15/2002,0,54,412,24,-30,0						
06/15/2002,0,17,390,9,-8,0						
07/15/2002,0,24,393,30,6,0						
08/15/2002,0,33,402,65,31,1						
09/15/2002,0,33,422,35,2,0						
10/15/2002,0,33,436,41,8,0						
11/15/2002,0,31,469,141,103,7						
12/15/2002,0,29,580,84,52,3						
01/15/2003,1,31,670,174,116,27						
02/15/2003,1,38,698,82,18,26						
03/15/2003,0,80,678,17,-84,21						
04/15/2003,0,106,637,97,-22,13						
05/15/2003,0,108,569,32,-79,3						
06/15/2003,0,83,500,15,-70,2						
07/15/2003,0,29,450,8,-23,2						

08/15/2003,0,16,436,9,-9,2					
09/15/2003,0,41,452,77,33,3					
10/15/2003,0,40,475,75,33,2					
11/15/2003,0,32,502,49,15,2					
12/15/2003,0,21,571,139,102,16					
01/15/2004,0,28,634,63,32,3					
02/15/2004,0,52,627,24,-33,5					
03/15/2004,0,69,593,86,12,5					
04/15/2004,0,91,604,53,-41,3					
05/15/2004,0,92,562,92,-2,2					
06/15/2004,0,109,556,57,-54,2					
07/15/2004,0,55,498,5,-51,1					
08/15/2004,0,33,465,21,-13,1					
09/15/2004,0,33,458,25,-9,1					
10/15/2004,0,30,455,49,17,2					
11/15/2004,0,23,558,133,105,5					
12/15/2004,0,22,667,165,114,29					
01/15/2005,2,22,682,39,0,17					
02/15/2005,1,30,706,88,31,27					
03/15/2005,0,80,688,22,-83,25					
04/15/2005,0,92,624,63,-36,7					
05/15/2005,0,122,542,11,-114,3					
06/15/2005,0,55,474,19,-39,3					
07/15/2005,0,22,441,10,-14,2					
08/15/2005,0,30,439,31,-1,2					
09/15/2005,0,25,441,32,5,2					
10/15/2005,0,18,445,32,11,3					
11/15/2005,0,19,454,34,14,1					
12/15/2005,0,16,518,103,84,3					
01/15/2006,1,18,572,123,96,9					
02/15/2006,0,29,659,47,12,6					
03/15/2006,0,76,640,38,-44,6					
04/15/2006,0,90,575,32,-61,3					
05/15/2006,0,100,529,58,-45,3					
06/15/2006,0,61,476,8,-55,2					
07/15/2006,0,34,442,19,-17,2					
08/15/2006,0,18,432,13,-6,1					
09/15/2006,0,25,437,37,10,2					
10/15/2006,0,24,444,34,9,1					
11/15/2006,0,13,448,19,5,1					
12/15/2006,0,13,491,85,69,3					
01/15/2007,0,19,513,20,0,1					
02/15/2007,0,24,515,27,2,1					
03/15/2007,0,49,551,111,58,4					

04/15/2007,0,77,577,77,-8,8						
05/15/2007,0,101,542,33,-69,1						
06/15/2007,0,74,482,23,-51,0						
07/15/2007,0,35,437,6,-29,0						
08/15/2007,0,23,421,19,-4,0						
09/15/2007,0,26,426,50,23,1						
10/15/2007,0,23,445,64,40,1						
11/15/2007,0,24,488,58,30,4						
12/15/2007,0,15,525,82,63,4						
01/15/2008,0,28,582,30,1,1						
02/15/2008,0,34,566,14,-20,0						
03/15/2008,0,61,567,73,8,4						
04/15/2008,0,89,541,29,-60,0						
05/15/2008,0,100,497,72,-29,1						
06/15/2008,0,62,453,18,-44,0						
07/15/2008,0,25,416,8,-17,0						
08/15/2008,0,21,406,25,4,0						
09/15/2008,0,42,431,79,35,2						
10/15/2008,0,37,450,63,25,1						
11/15/2008,0,28,477,42,13,1						
12/15/2008,0,24,521,70,45,1						
01/15/2009,0,28,580,121,87,6						
02/15/2009,0,35,626,60,22,3						
03/15/2009,0,67,628,54,-16,3						
04/15/2009,0,76,653,132,47,9						
05/15/2009,0,117,630,49,-76,8						
06/15/2009,0,90,542,2,-91,3						
07/15/2009,0,44,482,10,-37,3						
08/15/2009,0,35,461,33,-4,2						
09/15/2009,0,42,477,91,45,4						
10/15/2009,0,33,515,51,15,3						
11/15/2009,0,23,515,36,11,2						
12/15/2009,0,27,535,53,23,3						
01/15/2010,0,31,577,83,49,3						
02/15/2010,0,45,602,39,-7,1						
03/15/2010,0,69,609,56,-16,3						
04/15/2010,0,80,579,62,-22,4						
05/15/2010,0,91,533,57,-35,1						
06/15/2010,0,79,493,26,-55,2						
07/15/2010,0,40,452,10,-31,1						
08/15/2010,0,26,433,17,-10,1						
09/15/2010,0,29,443,46,14,3						
10/15/2010,0,33,457,86,50,3						
11/15/2010,0,38,551,126,84,4						

12/15/2010,0,30,582,40,9,1						
01/15/2011,0,29,602,50,19,2						
02/15/2011,0,35,623,100,61,4						
03/15/2011,1,65,665,62,-14,11						
04/15/2011,0,96,620,67,-38,9						
05/15/2011,0,102,581,81,-27,6						
06/15/2011,0,100,564,39,-63,2						
07/15/2011,0,58,503,21,-38,1						
08/15/2011,0,32,471,5,-28,1						
09/15/2011,0,29,464,35,4,2						
10/15/2011,0,23,465,113,86,4						
11/15/2011,0,36,567,74,36,2						
12/15/2011,0,28,603,74,42,4						
01/15/2012,0,24,619,46,19,3						
02/15/2012,1,37,679,110,52,21						
03/15/2012,0,70,692,61,-34,25						
04/15/2012,0,92,658,68,-35,11						
05/15/2012,0,108,581,25,-87,4						
06/15/2012,0,74,503,8,-69,3						
07/15/2012,0,34,458,13,-24,3						
08/15/2012,0,18,441,30,9,3						
09/15/2012,0,41,462,46,3,2						
10/15/2012,0,30,475,81,46,5						
11/15/2012,0,28,524,61,30,3						
12/15/2012,0,24,550,39,14,1						
01/15/2013,0,30,560,66,34,2						
02/15/2013,0,37,588,70,29,4						
03/15/2013,0,77,636,88,2,9						
04/15/2013,0,94,584,63,-37,6						
05/15/2013,0,95,547,29,-68,2						
06/15/2013,0,60,475,5,-56,1						
07/15/2013,0,37,444,23,-15,1						
08/15/2013,0,25,433,65,37,3						
09/15/2013,0,48,488,69,19,2						
10/15/2013,0,35,501,41,4,2						
11/15/2013,0,35,539,105,67,3						
12/15/2013,0,21,569,67,40,6						
01/15/2014,0,39,614,96,49,8						
02/15/2014,0,48,649,48,-5,5						
03/15/2014,0,56,645,112,45,11						
04/15/2014,0,109,647,19,-99,9						
05/15/2014,0,109,553,50,-64,5						
06/15/2014,0,80,504,31,-52,3						
07/15/2014,0,33,461,8,-28,3						

08/15/2014,0,14,442,0,-16,2					
09/15/2014,0,19,437,29,8,2					
10/15/2014,0,31,463,53,19,3					
11/15/2014,0,27,468,59,29,3					
12/15/2014,0,26,532,118,89,3					
01/15/2015,1,35,585,76,38,3					
02/15/2015,0,44,627,91,44,3					
03/15/2015,0,76,646,85,1,8					
04/15/2015,0,107,611,7,-104,4					
05/15/2015,0,106,506,30,-79,3					
06/15/2015,0,56,455,17,-41,2					
07/15/2015,0,20,430,20,-2,2					
08/15/2015,0,40,438,59,16,3					
09/15/2015,0,40,464,48,6,2					
10/15/2015,0,33,481,69,33,3					
11/15/2015,0,27,502,84,54,3					
12/15/2015,0,20,532,2,-19,1					
01/15/2016,0,30,538,51,19,2					
02/15/2016,0,44,544,44,-2,2					
03/15/2016,0,74,556,77,1,2					
04/15/2016,0,98,532,58,-42,2					
05/15/2016,0,96,478,45,-52,1					
06/15/2016,0,71,442,52,-20,1					
07/15/2016,0,29,420,12,-17,0					
08/15/2016,0,20,411,16,-4,0					
09/15/2016,0,25,415,55,30,0					
10/15/2016,0,41,453,59,17,1					
11/15/2016,0,26,463,41,15,0					
12/15/2016,0,21,492,59,37,1					
01/15/2017,0,27,532,71,43,1					
02/15/2017,0,38,552,33,-5,0					
03/15/2017,0,61,523,13,-48,0					
04/15/2017,0,81,489,49,-32,0					
05/15/2017,0,83,436,29,-54,0					
06/15/2017,0,58,417,56,-3,1					
07/15/2017,0,18,398,7,-11,0					
08/15/2017,0,29,412,49,19,1					
09/15/2017,0,29,422,38,8,1					
10/15/2017,0,28,432,41,13,0					
11/15/2017,0,23,455,81,57,1					
12/15/2017,0,25,506,55,30,0					
01/15/2018,0,28,510,14,-14,0					
02/15/2018,0,36,519,78,41,1					
03/15/2018,0,71,543,69,-3,1					

04/15/2018,0,105,536,96,-10,1						
05/15/2018,0,126,584,155,25,4						
06/15/2018,0,103,521,32,-71,0						
07/15/2018,0,53,460,9,-44,0						
08/15/2018,0,56,461,73,16,1						
09/15/2018,0,43,459,49,6,0						
10/15/2018,0,56,546,161,96,9						
11/15/2018,0,36,573,53,15,2						
12/15/2018,0,27,579,36,8,1						