

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE HADJ LAKHDAR – BATNA –



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MAGISTER en GEOLOGIE

Option GEOLOGIE DE GENIE CIVIL ET DES MILIEUX AQUIFERES

**Investigation des propriétés minéralogiques et
géomécaniques des terrains en mouvement dans
la ville de Mila « Nord-Est d'Algérie »**

PRESENTE PAR
CHETTAH WAHID

Devant le jury composé de :

Président : Dr. A. YAHYAOUI

Université de Batna

Directeur de mémoire : Dr. A. BOUMAZBEUR

Université de Tébessa

Examineurs : Dr. M.R. MENANI

Université de Batna

Dr. A. ZENIR

Université de Jijel

Dr. C. BENABBAS

Université de Constantine

Année universitaire : 2008/2009

RESUME

La commune de Mila qui appartient au bassin néogène de Mila, montre plusieurs zones instables sièges d'importants mouvements de terrain. Ces mouvements de terrain ont causé de graves préjudices à l'infrastructure routière (RN 79 et 79a) et aux constructions de la ville de Mila. Ils présentent également un grand problème pour son extension.

La combinaison de plusieurs facteurs est à l'origine du déclenchement de ces mouvements, tel que : la nature lithologique, la topographie, la pluviométrie et l'activité anthropique,...etc.

La géomorphologie de la région de Mila offre l'avantage de présenter une grande variété d'instabilité, elle est caractérisée par un relief accidenté et un réseau hydrographique intense ceinturant la ville de Mila qui d'ailleurs, donne un caractère érodable des terrains rendant parfois impossible l'extension de l'urbanisation de la ville. Les données de la géomorphologie sont tous témoins d'une géodynamique externe très active.

Géologiquement, la région de Mila est constituée essentiellement d'argile gypseuse, de conglomérat, de calcaire lacustre et de marne à la base. En plus de cette lithologie tendre, les failles et les discontinuités rendent plus vulnérable la région aux mouvements de terrain.

L'étude hydroclimatologique montre que la région a un climat tempéré avec des précipitations qui arrivent jusqu'à 633 mm/an. L'effet de l'eau dans les instabilités de terrains est remarquable. Les quantités énormes d'eau qui s'infiltrent lors des pluies exceptionnelles jouent un rôle essentiel dans la mise en mouvement des terrains instables.

Les caractéristiques géotechniques des sols de la région montrent que la majorité des terrains instables sont constitués de sols fins. Ces sols perdent souvent leur ténacité en présence de l'eau et se mettent en mouvement sous leur propre poids.

Enfin, les remèdes ne seront efficaces que s'ils tiennent en considération les causes à l'origine des mouvements de terrain. Le bon diagnostic de ces mouvements et leur cartographie (aléas géologiques et/ou géotechniques) permettent l'adoption de solutions mieux appropriées. Le drainage est alors le remède le plus efficace pour la lutte contre les instabilités dans le bassin de Mila, ensuite viennent, en second lieu, les autres types de confortement proposés.

Mots clés : Mouvement de terrain, aléa géologique, caractéristiques géotechniques, vulnérabilité, cartographie, Mila.

ABSTRACT

Located in the Neogene basin of Mila, several localities, in and around the Town of Mila show traces of recent and old land instabilities. These mass movements have caused serious damage to road infrastructure (RN 79 and 79a) and many buildings. They constitute a real challenge to the future extension of the city.

The combination of several factors is causing the outbreak of such movements as the lithological nature, topography, rainfall and human activity.

The geomorphology of the region of Mila has the advantage of presenting a wide range of instability; it is characterized by rugged terrain and rivers intense around the town of Mila who also gives an erodible land sometimes making impossible extension of the urbanization of the city. Geomorphological data show a very active external geodynamic activity.

Geologically, the region of Mila consists mainly of clay gypsum, conglomerate, limestone and marl at the base. In addition to this soft lithology, faults and discontinuities make the region more vulnerable to mass movements.

The hydroclimatology of the area shows that the region has a temperate climate with rainfall of up to 633 mm / year. The effect of water in the instabilities of land is remarkable. Huge quantities of water that infiltrates during exceptional rains play a vital role in moving the unstable ground.

The geotechnical characteristics of soils in the region show that the majority of lands are made up of unstable soils purposes. These soils often lose their toughness in the presence of water and begin to move under their own weight.

Finally, the remedies will be effective only if they take into consideration the causes of the instabilities. The correct diagnosis of these movements and their mapping (geological and / or geotechnical hazards) allow the adoption of most appropriate solutions. Drainage is the most effective remedy against instabilities. Other remedial measure will, of course, be considered according to the characteristics of the instable zone.

Keywords: Movement field, geological hazard, geotechnical characteristics, vulnerability, mapping, Mila.

تظهر مدينة ميلة التي تنتمي إلى حوض ميلة النيوجين عدة مناطق غير مستقرة ناجمة عن تحركات واسعة من الأراضي. حركات الأرض هته تسببت في أضرار جسيمة لحقت بالبنية التحتية للطرق [RN 79 و RN 79 a] وبناءات ومنشآت مدينة ميلة، هته الحركات أعاقت كذلك توسع المدينة. توفر وتجمع عدة عوامل تسبب في نشوب هته الحركات، نذكر منها : الطبيعة الصخرية، الطبوغرافيا، التساقطات والتدخل البشري.

الطابع الجيومورفولوجي لمنطقة ميلة يعطيها ميزة عدم الاستقرار، حيث تتميز بتضاريس وعرة وشبكة هيدروغرافية مكثفة حول بلدة ميلة التي تزيد من حساسية التربة للتعرية وتجعل توسعا صعبا للمدينة. المعطيات الجيومورفولوجية جميعها تثبت جيوديناميكية خارجية نشطة للغاية.

جيولوجيا، منطقة ميلة تتكون أساسا من طين جبسية ،كونغلوميرا، حجر جيري قاري ومارن في القاعدة، بالإضافة إلى هذه الخصائص الصخرية اللينة، الفوالق و الانكسارات تجعل المنطقة أكثر عرضة للحركات الأرضية. تشير الدراسة الهيدروجوية إلى أن مناخ المنطقة معتدل مع هطول الأمطار التي تصل حتى 633 ملم في السنة، تأثير التساقطات على عدم استقرار الأراضي واضح. الكميات الضخمة من المياه المتساقطة خلال الفترات الاستثنائية والمتسربة إلى داخل الأرض تلعب دور حيوي في نقل الكتل وعدم استقراريتها.

الخصائص الجيو تقنية لتربة منطقة ميلة تبين أن غالبية الأراضي الغير مستقرة متكونة من تربة دقيقة ،هذه التربة في كثير من الأحيان تفقد متانتها في وجود المياه وتتحرك تحت وطأة وزنها.

وأخيرا فإن العلاجات لن تكون فعالة إلا إذا كانت تأخذ في الاعتبار أسباب الحركات الأرضية ،التشخيص الصحيح لهذه التحركات ،ورسم خرائط المخاطر الجيولوجية أو الجيوتقنية تسمح باعتماد أنسب الحلول. الصرف هو أنجع علاج لمكافحة عدم استقرار الأراضي في حوض ميلة ثم تأتي في المرتبة الثانية غيرها من أنواع العلاج المقدمة.

الكلمات الرئيسية :

Mouvement de terrain, aléa géologique, caractéristiques géotechniques, vulnérabilité, cartographie, Mila.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENARALE	01
CHAPITRE 1 : Cadre géographique et géologique	
I/ Situation géographique du secteur étudié	02
II/ Aspect socio-économique	02
III/ Climat et végétation	02
IV/ Réseau hydrographique	04
V/ Sismicité de la région	05
VI/ Géologie régionale	06
1/ Domaine interne	06
2/ Domaine des flyschs	06
3/ Domaine externe	07
3.1/ Les formations telliennes	07
3.2/ Les formations de l'avant pays	07
4/ Les formations post-nappes	08
5/ Position du bassin néogène de Constantine-Mila dans le dispositif structural de la partie Nord orientale de la chaîne Alpine en Algérie	09
VII/ Cadre géologique local	09
1/ Présentation globale du bassin de Mila	09
2/ Caractéristiques lithostratigraphiques du bassin de Mila	09
2.1/ Les séries du Substratum	09
2.1.1/ Les formations triasiques	09
2.1.2/ Les formations jurassiques	10
2.1.3/ Les formations du Crétacé	10
2.1.3.1 : Le Crétacé inférieur :	10
2.1.3.2/ Le Crétacé supérieur	10
2.1.4/ Les formations du Paléogène	11
2.1.4.1/ : Paléocène	11
2.1.4.2/ Eocène :	11
2.2/ Les séries post-nappes :	11
2.2.1/ Les dépôts néogènes	11
2.2.2/ Les dépôts quaternaires	14

3/ Cadre structural du bassin de Mila	14
4/ Caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des sols et roches rencontrés dans la région de Mila	15
4.1/les marnes	15
4.2/les conglomérats	17
4.3/les grès	17
4.4/les argiles et les argiles a gypse	17
4.5/ les calcaires lacustres	22
VIII/ Conclusion	22
CHAPITRE 2 : Synthèse hydrologique et hydrogéologique	
I/ Introduction	23
II/ Analyse morphométrique du bassin versant	23
II.1/ Situation géographique	23
II.2/ Les caractéristiques morphométriques	23
III/ Analyse des caractéristiques climatiques :	25
III.1/ Climat et facteurs climatiques du secteur étudié :	25
III.2/ La pluviométrie :	26
III.3/ La température	31
III.4/ Graphe ombro-thermique	31
III.5/ L'humidité	35
III.6/ L'aridité	35
III.7/ Appréciation du bilan hydrologique	36
A/ Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	36
B/ Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR)	36
1/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 2003-2007 : Station de Beni Haroun	37
2/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 1984–1997 : Station de Hamala Grarem	37
3/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 1990–1999 : Station de Constantine	37
C/Interprétation du bilan hydrologique	41
III.8/ Conclusion	41
IV/ Conditions hydrogéologiques du site	42
V/ Conclusion	43
CHAPITRE 3 : Cadre géomorphologique	
I/ Introduction	44
II/ Présentation géomorphologique générale de la commune de Mila	44
II.1/ Paysage naturel et cultures	45

II.2/ Orographie	45
II.3/ Relief	45
II.4/ Ensembles physiques	46
II.5/ Hydrographie	47
III/ Etablissement des cartes de facteurs	47
III.1/ Etude des photographies aériennes	47
III.2/ Commentaire de la carte des formes d'érosion et de fracturation	49
III.3/ Carte du réseau hydrographique	50
III.4/ Carte des pentes	53
III.5/ Carte lithologique de la commune de Mila	53
III.6/ Carte du couvert végétal	53
IV/ Conclusion	56
CHAPITRE 4 : Mouvements de terrain et formes érosives	
I/ Introduction	57
II/ Définition et classification des mouvements de terrain	57
II.1/ Les critères de reconnaissance	57
II.2/ Morphologie et dynamique des mouvements de terrain	58
II.2.1/ Les affaissements et les effondrements	58
II.2.2/ Eboulements et chutes de pierres, écroulements, basculements	60
II.2.3/ Les glissements de terrain	60
II.2.3.1/ Les glissements proprement dits	62
II.2.3.2/ Glissements par fluage et coulées boueuses	65
II.2.3.2.1/ Glissement par fluage :	65
II.2.3.2.2/ Les coulées boueuses	66
III/ les facteurs intervenant dans les processus d'instabilité	66
III.1/ Action et influence de l'eau	67
III.2/ La nature géologique des terrains	67
III.3/ Action de la pesanteur	68
III.4/ Actions anthropiques	68
III.5/ Actions séismiques	69
IV/ analyse des mouvements de terrain dans le secteur d'étude	69
IV.1/ Les boursouffures de solifluxion	69
IV.2/ Les glissements de terrains	70
IV.3/ Les coulées	72
IV.4/ Bad-lands	73

IV.5/ Chute de blocs et éboulements	73
V/ Méthodes de calcul de stabilité des glissements de terrain	73
1/ Introduction	73
2/ Méthodes de calcul	74
2.1/ Méthode globale	74
2.2/ Méthode des tranches	75
2.2.1/ Méthode de Fellenius	76
2.2.2/ Méthode de Bishop simplifiée	78
3/ Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité	78
V/ Conclusion	79
CHAPITRE 5 : Caractéristiques géotechniques de quelques sites en mouvement	
I/ Introduction	80
II/ Généralités sur les moyens de reconnaissances géotechniques	80
II.1/ Inventaire des données existantes	80
II.2/ Observation sur terrain (levé géologique de surface)	80
II.3/ Les reconnaissances géotechniques	81
II.3.1/ Les essais et moyens de reconnaissance in-situ	81
A/ Les sondages carottés	81
B/ Le pénétromètre dynamique ou Dynamic Penetration Test (DPT):	81
B.1/ But de l'essai	81
B.2/ Principe de l'essai D.P.T	82
B.3/ Domaine d'utilisation de l'essai D.P.T	82
B.4/ Présentation des résultats d'essais	82
II.3.2/ Les moyens d'étude au laboratoire	84
II.3.2.1/ Essais d'identification	84
A/ L'analyse granulométrique	84
B/ La teneur en eau	85
C/ Les densités	85
D/ Les limites d'Atterberg :	86
II.3.2.2/ Essais mécaniques	88
II.3.2.2.1/ Essai de cisaillement rectiligne	88
A/ Description de l'essai	88
B/ Principales caractéristiques mécaniques d'un sol	89
II.3.2.2.2/ Essai oedométrique	89
III/ Propriétés géotechniques de quelques sites en mouvement dans la commune de Mila	91

III.A/ Site des 185 logements	91
A.1/ Situation géographique du site	91
A.2/ Description de la cité des 185 logements et des désordres survenus	92
A.3/ Diagnostic et analyse de la cité des 185 logements	93
A.4/ Les solutions proposées	98
1- Actions sur l'eau	98
2- Actions mécaniques	99
3- Confortement des blocs endommagés	99
III.B/ Glissement Z.H.U.N de Mila :	99
B.1/ Introduction	99
B.2/ Caractéristiques d'identification	104
B.3/ Hydrogéologie du site	110
B.4/ Caractéristiques mécaniques des sols de la ZHUN de Mila	111
B.5/ Pronostic de stabilité du talus :	113
B.6/ Solutions choisies contre le glissement :	115
III.C/ Instabilités de la route nationale RN 79a (entre les PK 0 et PK 3):	119
1/ Description des sites de glissement	119
2/ Facteurs favorisant le glissement	119
3/ Caractéristiques géotechniques	120
4/ Solutions proposées :	123
III.D/ Glissement du collecteur A	123
1/ Description et caractéristiques géotechniques des sols rencontrés :	124
2/ Etude de stabilité	127
3/ Mesures techniques pour l'augmentation de la stabilité	127
IV/ Conclusion	129
CHAPITRE 6 : Cartographie des zones instables	
1/ Introduction	130
2/ Problématique de l'étude	130
3/ Représentation cartographique des risques naturels	131
3.1/ Inventaire des indicateurs et des facteurs d'instabilité	131
3.2/ Etablissement du plan d'exposition aux risques naturels de la commune de Mila	132
A/ Première étape	132
A.1/ Premier axe	133
A.1.1/ Relation ou influence du facteur pente sur les des mouvements de masse :	133
a/ Carte des mouvements de masses	133

b/ Classes de pentes	133
c/ Processus de superposition	136
A.1.2/ Calage de la carte de couvert végétal avec la carte de synthèse N° II	136
A.1.3/ Superposition de la carte linéamentaire avec la carte de synthèse N° II	139
A.1.4/ Résumé du premier Axe	139
A.2/ Deuxième Axe	139
A.2.1/ détermination du coefficient de dégradation par ruissellements	139
A.2.2/ Superposition de la carte de végétation avec la carte de synthèse N° IV	143
A.2.3/ calage de la carte des linéaments avec la carte de synthèse N° IV	143
A.2.4/ Résumé du deuxième axe :	145
B/ Deuxième étape : Superposition des cartes synthétiques N° II et IV	145
C/ Troisième étape : Calage de la carte synthétique N° V et la carte lithologique	147
4/ Conclusion	150
CONCLUSION GENERALE	151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	153

Remerciements

Je remercie **DIEU** le tout puissant qui m'a donné la force, la volonté et le courage pour accomplir ce mémoire.

Je tiens à formuler ma gratitude et ma profonde reconnaissance à l'égard de **Mr. A. Boumazbeur** qui m'a toujours accueilli avec bienveillance et qui n'a ménagé ni son temps ni ses efforts pour m'orienter. Mes remerciements s'adressent aussi à **Mr. A. Yahyaoui**, je lui suis reconnaissant de l'honneur qu'il me fait en assumant la présidence du jury. Je remercie également Monsieur **M. R. Menani** d'avoir accepté de faire partie du jury. Ayant eu le privilège d'assister à ses cours, j'ai pu profiter de sa grande expérience. Toute ma gratitude à **Mr. C. Benabbas** pour son aide précieuse et son assistance louable. Nos nombreuses discussions ont été des aiguillons dans l'évolution de mes réflexions, ce mémoire est enrichi de ses critiques et de ses conseils constructifs. Je remercie beaucoup **Mr. A. Zennir** de l'université de Jijel qui a bien voulu examiner ce travail et faire partie du jury. Je tiens à lui remercier pour ces cours de géotechnique, ces conseils et observations prodigués.

J'exprime ma profonde reconnaissance à tous les enseignants de graduation et post-graduation et qui ont contribué à ma formation en géologie de l'ingénieur.

J'ai eu toujours le soutien moral de certain de mes collègues, je tiens à leur adresser mes remerciements en particulier, **AMROUNE, BELWANAS, BOUABID, MSSAKHAR, REBAHI.W, ELHADJ.**

Enfin, je ne saurai oublier dans mes remerciements mes parents, frères et soeur et mon épouse, qui ont supporté mes préoccupations et mon stress, je leur dédie cette mémoire.

Introduction

INTRODUCTION

Depuis plus d'un siècle les géologues, géomorphologues, et plus récemment, les mécaniciens des sols ont tenté par divers moyens, de comprendre les mécanismes et les processus qui génèrent les glissements de terrain et, plus largement, les mouvements de terrain. Ces processus initialement naturels sont devenus au fil du dernier siècle 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.

Les problèmes et les questions apparentés à cette étude et développés dans ce mémoire sont d'une part, liés aux instabilités de versants en secteur collinaire, et d'autre part, aux dépôts néogènes. Ces dépôts caractérisés par une forte hétérogénéité, sont relativement mal cartographiés. Ainsi, l'étude que l'on propose de développer se situe à la charnière entre la géologie, la géomorphologie et la mécanique des sols, et permet une analyse plus globale et plus fine des instabilités anciennes et nouvellement reconnues.

Le secteur d'étude analysé dans ce mémoire a la particularité d'être soumis à de très nombreuses instabilités et d'être recouvert par d'importants dépôts néogènes essentiellement argileux.

Dans une première partie, constituée de quatre chapitres, on présente la lithologie des différents substratums rencontrés, ainsi que celle des formations néogènes et quaternaires, ce qui permet de faire un bilan local de la géologie et des grands traits structuraux. Un aperçu sur l'hydroclimatologie et l'hydrogéologie paraît nécessaire pour mieux comprendre les phénomènes d'instabilité. Cette analyse géologique et hydroclimatologique est couplée à une étude géomorphologique de la commune de Mila, abordée dans le troisième chapitre, et qui porte à la reconnaissance des formes du relief et les formes des structures qui sont de bons indicateurs des instabilités passées et futures, ainsi que les facteurs d'instabilités. Il est nécessaire de faire, d'une part, le bilan et l'analyse des instabilités des versants, et d'autre part, l'étude de la géomorphologie et des processus dynamiques liés aux dépôts argileux. Ainsi, les principaux mouvements de terrain sont décrits, avec une reconnaissance des principaux indices d'instabilités, dans le quatrième chapitre.

La deuxième partie, développée dans le cinquième et sixième chapitre, permet de faire d'une part, l'analyse statistique de l'ensemble des données géotechniques acquises sur les sols en mouvement, et d'autre part, d'aborder à une quantification des limites géométriques des zones en mouvement et la cartographie de l'aléa pour le secteur de la commune de Mila.

Chapitre I :
Cadre géographique et
géologique

I/ Situation géographique du secteur étudié :

Le secteur étudié fait partie du bassin néogène de Mila, ce dernier est situé à une cinquantaine de kilomètres au Nord-Ouest de Constantine, il couvre la partie centrale de la wilaya de Mila. Cette dernière s'étend sur une superficie de 3480.54 km² et d'altitude moyenne de 452 m. Sur cette aire géographique se répartissent 13 daïras et 32 communes. Administrativement, la wilaya de Mila est limitée au Nord par la wilaya de Jijel, au Sud par la wilaya d' Oum El Bouaghi, à l'Est par la wilaya de Constantine et à l'Ouest par la Wilaya de Sétif (Fig.I.1).

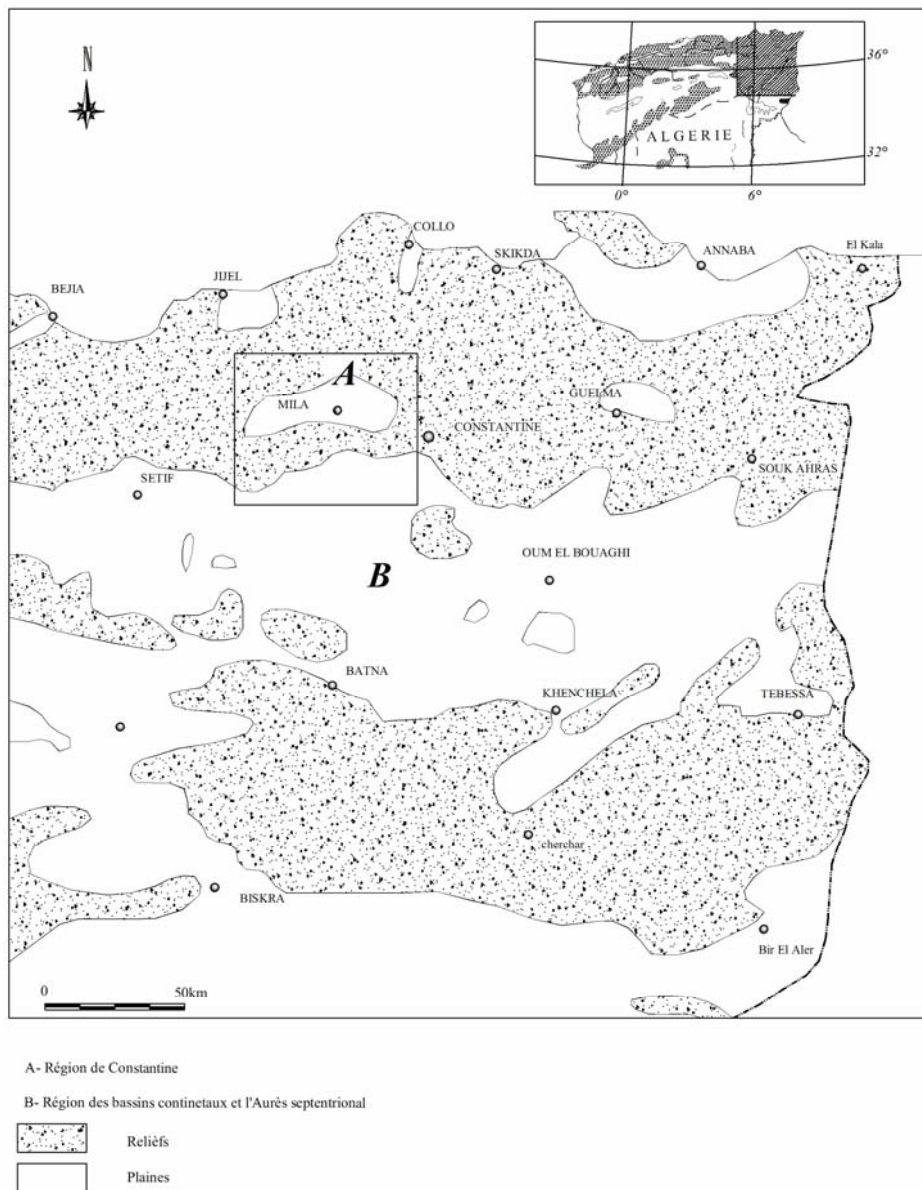


Fig. I.1 : Situation géographique du bassin de Mila.

II/ Aspect socio-économique :

La commune de Mila est parmi les plus grandes communes de la wilaya de point de vue superficie (130.60 km²) et d'activité humaine. Elle compte d'environ 67992 habitants en 2005 et dotée d'infrastructures variées. Les limites administratives de cette commune sont :

- Au Nord, la commune de Grarem Gouga et Sidi Merouane,
- Au Sud, la commune de Sidi khelifa et Ahmed Rachedi,
- A l'Ouest, la commune de Zéghaia et Oued Endja,
- A l'Est, la commune de Ain Tine et Boudjeriou.

La région de Mila est essentiellement à vocation agricole. Les céréales et l'élevage représentent les principales activités. Le secteur industriel est réduit à quelques petites industries:

- L'unité de briqueterie (Mila et Ferdjioua) d'une capacité de 50.000 t/an.
- L'unité de mise en bouteilles d'eau minérale (Tassala) 16.000.000 b/an.
- L'unité de pierres taillées (Sidi Khelifa) 1000 m³/an.
- L'unité de faïences (carreaux et plaintes) : Mila 150.00 m²/an.

Le territoire de la wilaya desserve par la Route Nationale RN 27 qui relie Constantine à Jijel et par la Route Nationale RN 79 reliant aussi Constantine à Ferdjioua. Mais le réseau routier secondaire est peu développé, il est dominé par des anciennes routes et pistes souvent dégradées, parfois impraticables dans l'Hiver.

III/ Climat et végétation :

La région de Mila est caractérisée par un climat semi-aride à Hiver doux, entouré de part et d'autre par un climat sub-humide frais caractéristique des reliefs montagneux (M. Côte, 1974; F. Rullan-Perchirin, 1985). Il est marqué par des écarts de température assez importants; les températures en été sont assez élevées et avoisinent les 40°C. En hiver, elles sont généralement basses et peuvent parfois descendre en dessous de zéro degré. Les précipitations sont assez importantes avec une moyenne plus de 600 mm/an (633 mm/an à Mila).

Le couvert végétal est peu important, il se résume principalement aux cultures céréalières et des herbes sauvages. Ce faible couvert végétal favorise considérablement l'érosion de sol.

IV/ Réseau hydrographique :

Le bassin de Mila dans son ensemble est un bassin élevé avec une altitude moyenne de 500 m, il est drainé d'Est en Ouest par l'Oued Rhumel qui descend de 256 m à 135 m pour former avec l'Oued Endja, l'Oued El Kebir au Centre-Ouest de la commune de Grarem. Le petit bassin d'Ibn Ziad est drainé par l'Oued El Bagrats et le Nord de la commune de Mila par l'Oued El Kotone (Fig.I.2). Le réseau hydrographique est extrêmement dense et hiérarchisé. La forme de la région en bassin avec un couloir Est-Ouest fait ressortir une orientation générale du réseau hydrographique Sud-Nord ou Nord-Sud selon les cas (A. Mebarki, 1982).

V/ Sismicité de la région :

D'après les enregistrements sismiques disponibles au niveau des stations sismiques, la région de Mila, bien que située à la limite entre deux provinces géologiques, semble présenter une sismicité moins importante que les régions avoisinantes telles que la zone de Constantine ou des Babors (J.P. Michel, 2000).

La ville de Mila est située dans une région sismique classée d'après Bockel comme pouvant subir des secousses d'intensité VI à VII. Cette zone est bordée au Nord-Ouest et au Sud-Est par deux zones sismiquement plus actives et d'intensité possible supérieure à VIII (J.P. Michel, 2000). Parmi les épicentres localisés dans un rayon de 30 km autour de la ville de Mila, les séismes les plus importants se sont déroulés comme suit (J.P. Michel, 2000) :

- Le séisme de 23/08/78 dans la zone de chevauchement de Sidi Merouane à une distance de 16 km du site du barrage de Beni Haroune avec une magnitude non déterminée mais probablement inférieure à 3.5 (Mm).
- Le séisme de 20/12/83 dans le massif de Sidi Driss à environ 27 km à l'Est du site avec une magnitude de 4.6 (Mm).

Le séisme répertorié comme le plus important sur un rayon de 50 km autour de la ville de Mila est celui de 27/10/85 de magnitude 5.9 (Mm) et dont l'épicentre est situé au Nord-Est de Constantine (à Ibn Badis).

Comme la montre la carte des zones de sismicité de l'Algérie (Fig.I.3), La ville de Mila s'intègre dans une **zone de sismicité moyenne**.

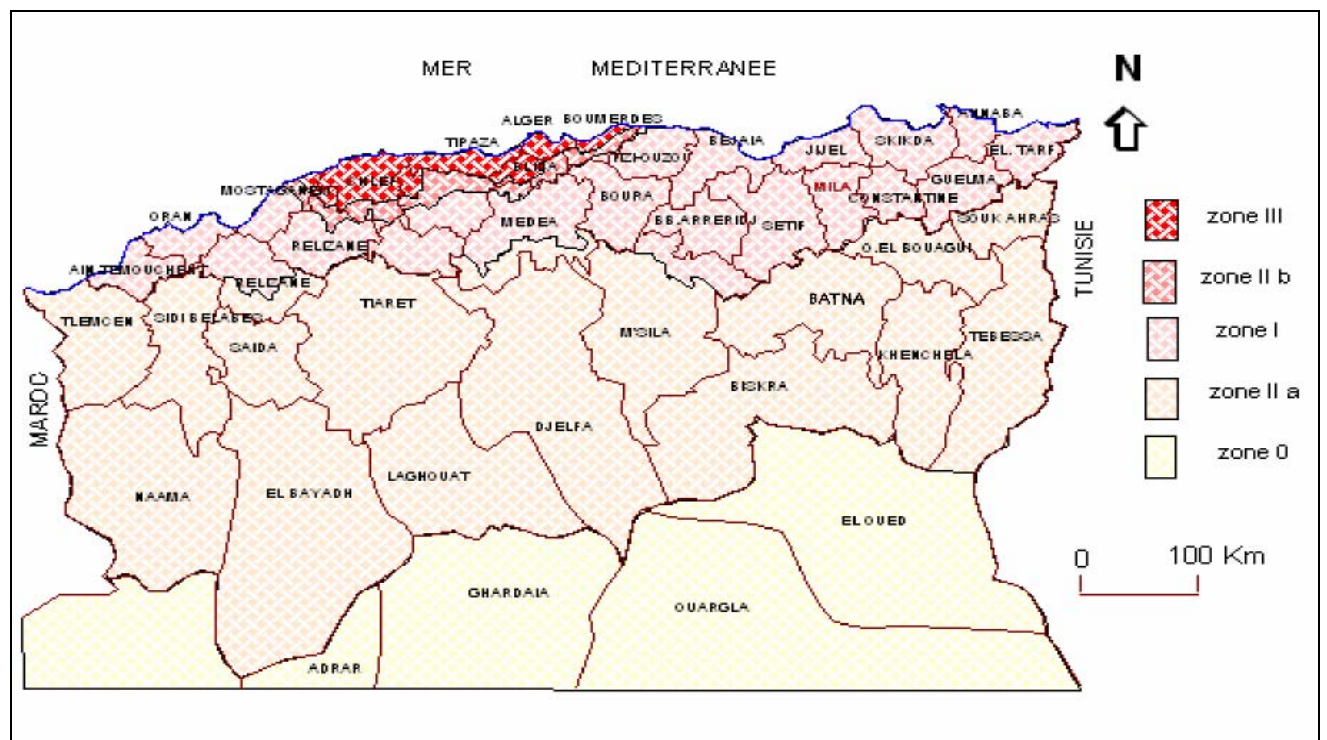


Fig.I.3 : Carte sismique de l'Algérie (G.G.S, 2003).

VI/ Géologie régionale

La région de Mila appartient au domaine tellien, segment oriental de la chaîne des maghrébides, qui représente la chaîne alpine d'Afrique du Nord (M. Durand Delga, 1969). Cette chaîne, constituée de nappes mises en place au Miocène, a été structurée par l'orogène alpin. On y distingue trois domaines paléogéographiques, distincts qui sont du Nord vers le Sud (Fig.I.4 et Fig.I.5) :

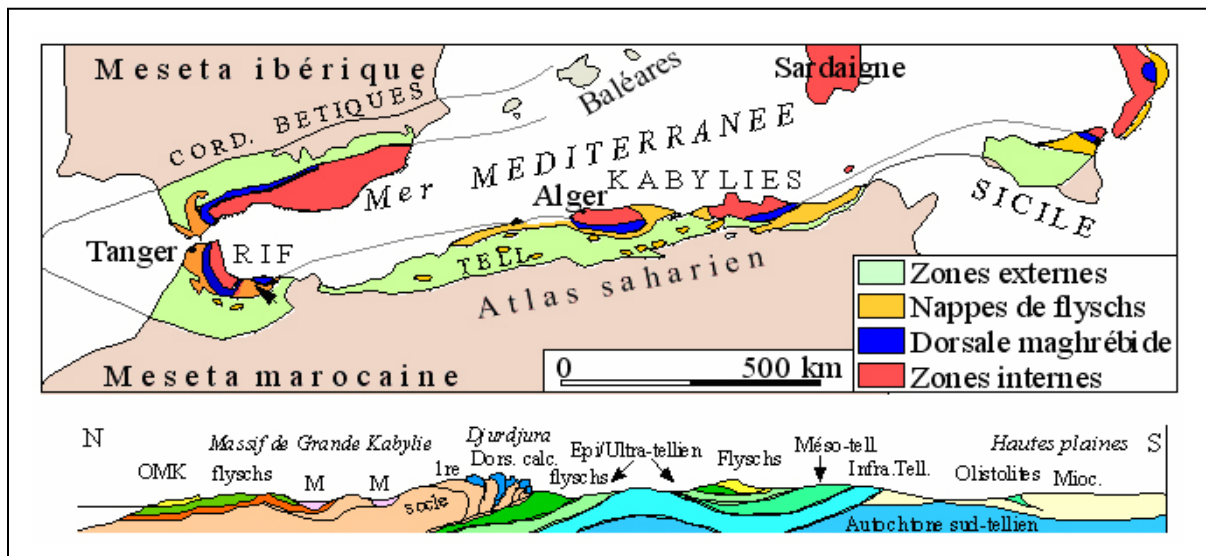


Fig.I.4: Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des maghrébides (M. Durand.Delga, 1969).

1/ Le domaine interne

Il comprend un socle métamorphique anté-Cambrien et sa couverture sédimentaire, et la dorsale Kabyle dite "chaîne calcaire" qui est une série de plate-forme d'âge allant du Permo-Trias à l'Oligocène discordante sur le socle, cet ensemble est largement charrié vers le sud (J.P. Bouillin, 1977 et W. Wildi, 1983).

2/ Le domaine des flyschs

C'est un domaine paléogéographique qui a reçu une sédimentation essentiellement argilo-gréseuse depuis le Crétacé jusqu'au Paléocène. En Algérie, ce domaine occupe une position allochtone. Il est classiquement subdivisé en deux types :

Les flysch maurétanien et massylien : Constitués par des formations grès-péltiques qui se sont déposées du Barrémien à l'Albien, au Nord le flysch maurétanien et au Sud le flysch massylien (J.P. Bouillin et J.F. Raoult, 1971; J.P. Bouillin, 1977; J.M. Vila, 1980).

Le flysch numidien : Il occupe une position structurale allochtone, la plus haute de l'édifice alpin. Il comporte une formation péltique de base, de l'Oligocène, des alternances de

grosses barres de grès et de pélites de l'Oligocène et de l'Aquitaniens et des argiles et silexites sommitales du Burdigalien inférieur. (J.P. Bouillin, 1977 ; J.C. Lahondère, 1979).

3/ Le domaine externe

Le domaine externe est situé plus au Sud, il comporte les formations telliennes et les formations de l'avant pays. Les formations telliennes reposent partiellement sur l'autochtone Saharien (J.P. Bouillin, 1977) :

3.1/ Les Formations telliennes :

Ce sont des séries épaisses à faciès marno-calcaire d'âge Eocène, issues du sillon tellien (J.M. Vila, 1980). Elles sont constituées par un empilement de trois grandes séries qui sont, du Sud vers le Nord :

- **Une série ultra-tellienne** : caractérisée par des formations calcareuses et marno-calcareuses d'âge Crétacé à Eocène. Elle affleure dans la région de Oued Zenati entre Constantine et Guelma.
- **Une série tellienne sensu-structo**: Caractérisée essentiellement par des dépôts terrigènes du Crétacé inférieur, elle donne de vastes affleurements dans la région de Sétif (nappe de Djemila).
- **La nappe péni-tellienne et les séries méridionales à Nummulites** : A faciès néritique prépondérant du Crétacé supérieur à l'Eocène. La nappe apparaît en lambeaux, charriés sur les massifs néritiques de djebel Grouz, djebel Kheneg et Chettaba, et en fenêtres sous les marnes noires des nappes telliennes de djebel Akhal.

3.2/ Les Formations de l'avant pays :

L'avant pays correspond aux formations calcaires et marneuses de la plate-forme constantinoise et du domaine atlasique. Il comporte l'avant pays allochtone et l'avant pays autochtone (J.M. Vila, 1980) :

- **L'avant pays allochtone** : Il regroupe trois grandes unités :
 - L'unité Sud Sétifienne.
 - L'unité Néritique Constantinoise.
 - L'unité de type Sellaoua.
- **L'avant pays autochtone** : Il est représenté par des séries sédimentaires mésozoïques épaisses et très plissées. Ces séries sont principalement localisées au niveau de l'Atlas Tunisien, de l'Atlas Saharien, des monts du Hodna, des monts de Batna et des Aurès (FigI.5).

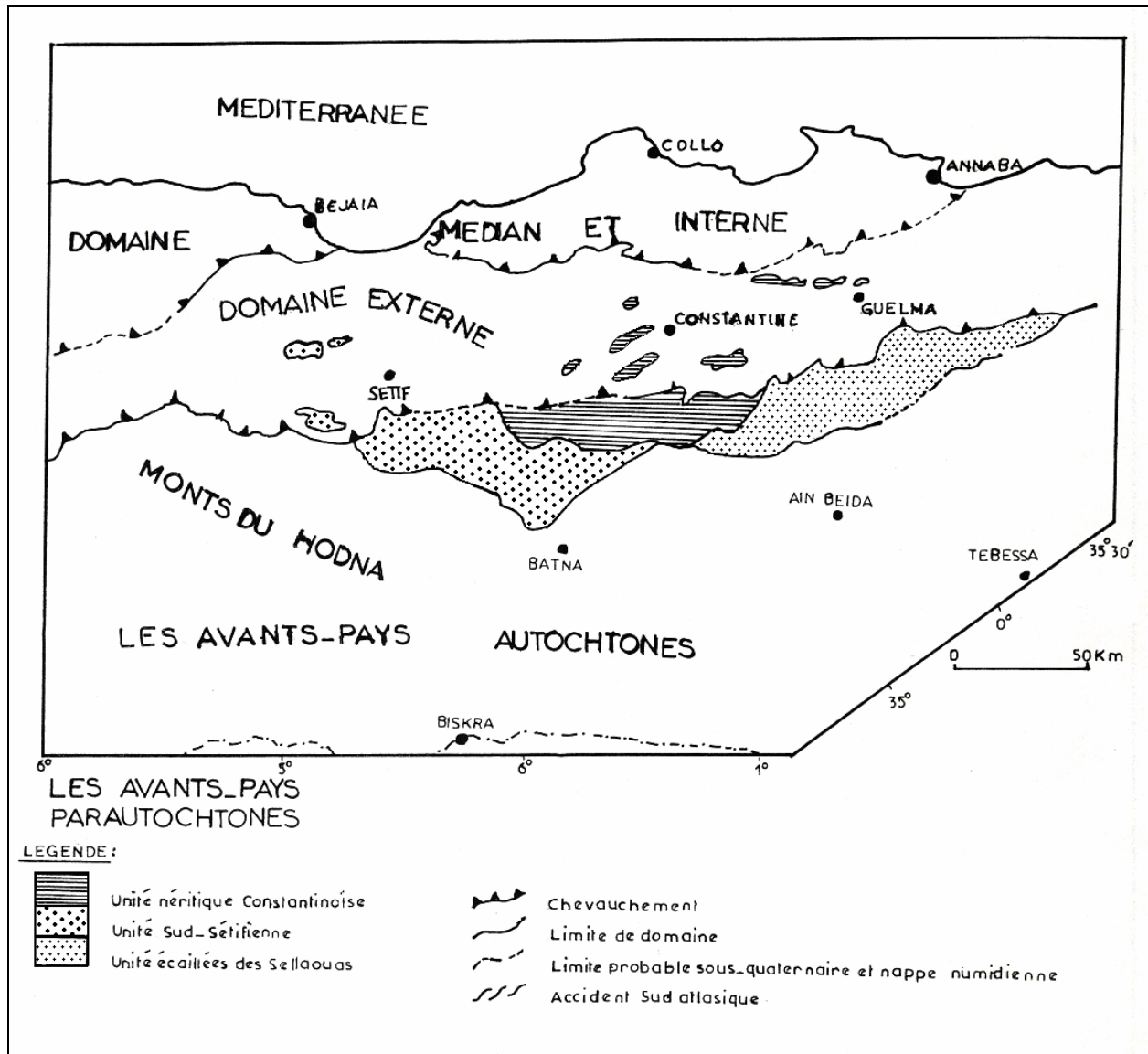


Fig.I.5 : Esquisse structurale du Nord- Est Algérien (W. Wildi, 1983).

4/ Les formations post-nappes

L'âge Burdigalien établi pour la mise en place des nappes dans le Constantinois, permet de considérer que les formations post-nappes regroupent l'ensemble de dépôts postérieurs au Burdigalien. Il s'agit de formations continentales et marines transgressives et discordantes sur les formations et les structures anté-burdigaliennes.

La répartition actuelle des affleurements post-burdigaliens permet de distinguer deux grands ensembles (M. Durand Delga, 1955, J.P. Bouillin, 1977, J.M. Vila, 1980 et P.E. Coiffait, 1992) :

- Un ensemble au Nord représenté par les bassins côtiers dont le bassin de Mila et le bassin de Guelma représentent les bassins les plus méridionaux.

- Un ensemble au Sud représenté par des bassins situés au-delà des limites méridionales et orientales actuelles des massifs calcaires de la plate forme constantinoise.

Selon une direction Est-Ouest, le remplissage du bassin de Mila débute localement par des formations marines d'âge Burdigalien terminal-Langhien et qui passent vers le haut à des formations continentales miocènes et plio-quadernaires (L.Joleaud, 1912 ; M.Durand Delga, 1955 ; P.E.Coiffait, 1992).

5/ Position du bassin néogène de Constantine-Mila dans le dispositif structural de la partie Nord orientale de la chaîne Alpine en Algérie

La structuration géologique résultant de l'orogénèse Alpine en Algérie du Nord est constituée par un empilement d'unités allochtones charriées sur l'autochtone pré-saharien (J.F. Raoult, 1974; J.P. Bouillin, 1977 et J.M. Vila, 1980). Selon ces auteurs, le dispositif structural est constitué par le socle Kabyle et sa couverture au Nord et les nappes de flyschs au Sud. Ces dernières ont subi une tectonique tangentielle majeure fini-lutétienne à fini-oligocène (J.P. Bouillin, 1977), reposent partiellement sur l'autochtone Saharien.

Au Burdigalien inférieur et moyen, la reprise des mouvements compressifs engendrait le chevauchement du socle vers le Sud et la mise en place de la nappe Numidienne. Cette phase de compression a été suivie par une phase de relaxation avec formation de bassins discordants où se met en place une sédimentation burdigalienne (P.E. Coiffait, 1992).

VII/ Cadre géologique local

1/ Présentation globale du bassin de Mila

Le bassin de Mila dont fait partie le secteur étudié, constitue la partie occidentale du grand bassin néogène constantinois (P.E. Coiffait, 1992), il est limité au Nord par l'arête montagneuse du M'Cid Aicha et du Sidi Driss, au Sud par le djebel Ossmane et djebel Grouz, à l'Est par les massifs du djebel Akhal, Chettaba et Kheneg et à l'Ouest par les djebels Boucherf et Oukissène. Tous ces massifs représentent le substratum du bassin de Mila, qui proviennent de domaines paléogéographiques différents.

La ville de Mila se trouve dans la partie centrale du bassin de Mila (Fig.I.6) dont les formations géologiques sont post-nappes (dépôts mio-plio-quadernaires).

2/ Caractéristiques lithostratigraphiques du bassin de Mila

Les différents ensembles lithostratigraphiques formant le bassin de Mila sont très variés, ils peuvent être résumés comme suit :

2.1/ Les séries du Substratum :

2.1.1/ Les formations triasiques : Les formations du Trias sont représentées essentiellement par des dépôts évaporitiques et argileux, il s'agit surtout de masse de gypse et d'argilite

bigarrée qui contient le plus souvent des blocs calcaro-dolomitiques. Le Trias n'affleure jamais en position stratigraphique normale, mais se présente en pointements diapiriques et en lames injectées le long des accidents tectoniques traversant la couverture mio-plio-quadernaire. Les formations triasiques affleurent au pied des massifs de djebel Kheneg, djebel Chettaba, au Sud de djebel Akhal et à l'Ouest de Sidi Merouane.

2.1.2/ Les formations jurassiques :

Les formations du Jurassique sont représentées au niveau des massifs bordant le bassin de Mila, notamment au djebel Kheneg, djebel Akhal, djebel. Chettabah, djebel. Kerkara et au djebel M'cid Aicha (M. Durand Delga, 1955; J.F. Raoult, 1974).

Les formations jurassiques constituent une épaisse série carbonatée dépassant les 600m. Elles sont caractérisées par des dolomies et des calcaires à silex. Ces formations sont localement associées à des calcaires massifs oolithiques et parfois à des marnes.

Le djebel El Akhal, dominant la localité d'Ain Tinn, entre Constantine et Mila, offre la plus belle coupe du Jurassique de la région. Il débute par des calcaires compacts et dolomies massives, surmontés de calcaires à silex. Ces roches correspondent vraisemblablement au **Lias. Le Dogger** est également carbonaté, caractérisé par des calcaires oolithiques massifs alternant avec quelques bancs de dolomies noires. **Le Malm**, est formé dans sa partie supérieure de calcaires fins à *calpionelles*. Ces calcaires sont affectés par un phénomène de dolomitisation secondaire important, notamment au djebel Kheneg, représenté par 300 à 400m de dolomies noires, grenues et massives (P.E. Coiffait, 1992). Alors que, la chaîne calcaire du djebel M'cid Aicha limitant le bassin de Mila au Nord, est constituée d'importantes masses de calcaires liasiques d'épaisseur variable (M. Durand.Delga, 1955).

2.1.3/ Les formations du Crétacé :

2.1.3.1 : Le Crétacé inférieur :

Les formations du Crétacé inférieur sont caractérisées par des marnes, des marno-calcaires et des calcaires néritiques. Elles affleurent au djebel Oukissane sous forme d'un faciès marneux au Nord-Ouest et d'un calcaire néritique au Sud-Est. Elles affleurent également au djebel Akhal, dans la région de Sidi Merouane, ainsi qu'à l'Ouest dans le massif d'Ahmed Rachedi, au Nord de Ferdjioua, au djebel Boucherf et au djebel El Halfa.

2.1.3.2/ Le Crétacé supérieur :

Le Cénomaniens : Les formations du Cénomaniens sont représentées par des horizons marno-calcaires de couleur grise et des marnes gris bleutées, parfois gypsifères et des barres de calcaires massifs. Le Cénomaniens est marqué dans sa partie inférieure par une surface

durcie. Ces formations sont connues dans les massifs du djebel Kheneg, djebel Grouz, djebel Zouaoui et djebel Chettaba.

Le Turonien : Les formations du Turonien comportent essentiellement des marnes et des calcaires à silex, avec des calcaires micritiques en petits bancs, surmontés de marnes grises et de niveaux conglomératiques. Ces formations affleurent au djebel El Akhal, au djebel Kheneg, djebel Zouaoui et dans le pourtour du massif du Chettaba.

Le Sénonien : Seules les formations du Sénonien inférieur sont représentées dans le djebel Kheneg et djebel Grouz. Elles sont essentiellement formées d'alternance de marnes et de calcaires (J.M. Vila, 1980; P.E. Coiffait, 1992).

2.1.4/ Les formations du Paléogène

2.1.4.1/ : Paléocène :

Il est représenté par des marnes noires, affleurant sur les deux rives de l'Oued el Kebir et sur le versant Nord-Ouest de Oued Endja.

2.1.4.2/ Eocène :

L'Eocène est représenté par des calcaires yprésiens, affleurant à l'Ouest de Sidi Merouane, dans les gorges de l'Oued el Kebir, en aval de l'Oued Dib, et des marnes à débit en plaquette admettant à la base des passages gréseux (petits bancs de grès d'ordre décimétrique) conférant à cette dernière un aspect flyschôide. Ces marnes sont très perturbées par la tectonique. Elle sont observées souvent au contact des calcaires yprésiens et parfois redressées à la verticale, notamment au niveau du contact avec des dépôts néogènes.

2.2/ Les séries post-nappes :

Après la mise en place des nappes de charriage au Burdigalien, la paléogéographie est profondément modifiée, la tectonique de nappes a créé une topographie nouvelle qui conditionne une sédimentation essentiellement continentale qualifiée de post-nappes : se sont les dépôts néogènes et quaternaires (P.E. Coiffait, 1992).

2.2.1/ Les dépôts néogènes:

Les dépôts néogènes recouvrent la majeure partie du bassin de Mila (Fig.I.6). Ils sont essentiellement représentés par des dépôts détritiques (conglomérats, sables et argiles), des dépôts évaporitiques (Gypse, anhydrite et sel gemme en moindre mesure) et des calcaires lacustres (Fig.I.7).

Miocène Marin de Mila : représenté par marnes à *Ostrea crassissima* (entre Mila et Azzaba Lotfi) et des marnes grises à petits lits de gypse et de cailloutis.

Sur les feuilles de Redjas El Ferrada et de Constantine, le **Mio-Pliocène continental** couvre de vastes surfaces. La dominance argileuse des formations donne lieu à des fluages et

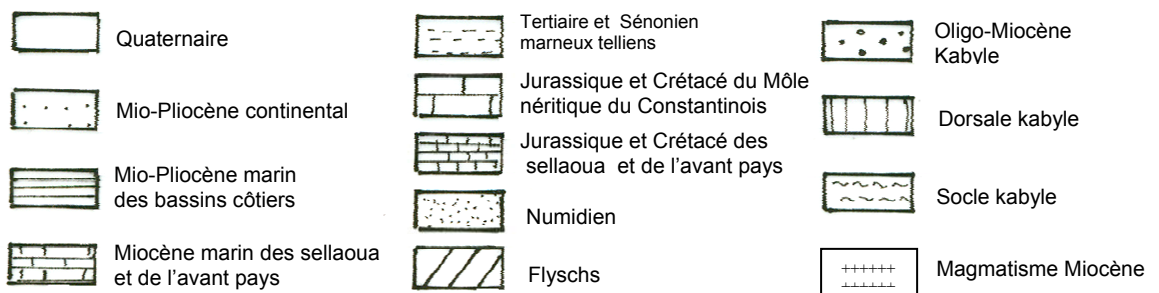
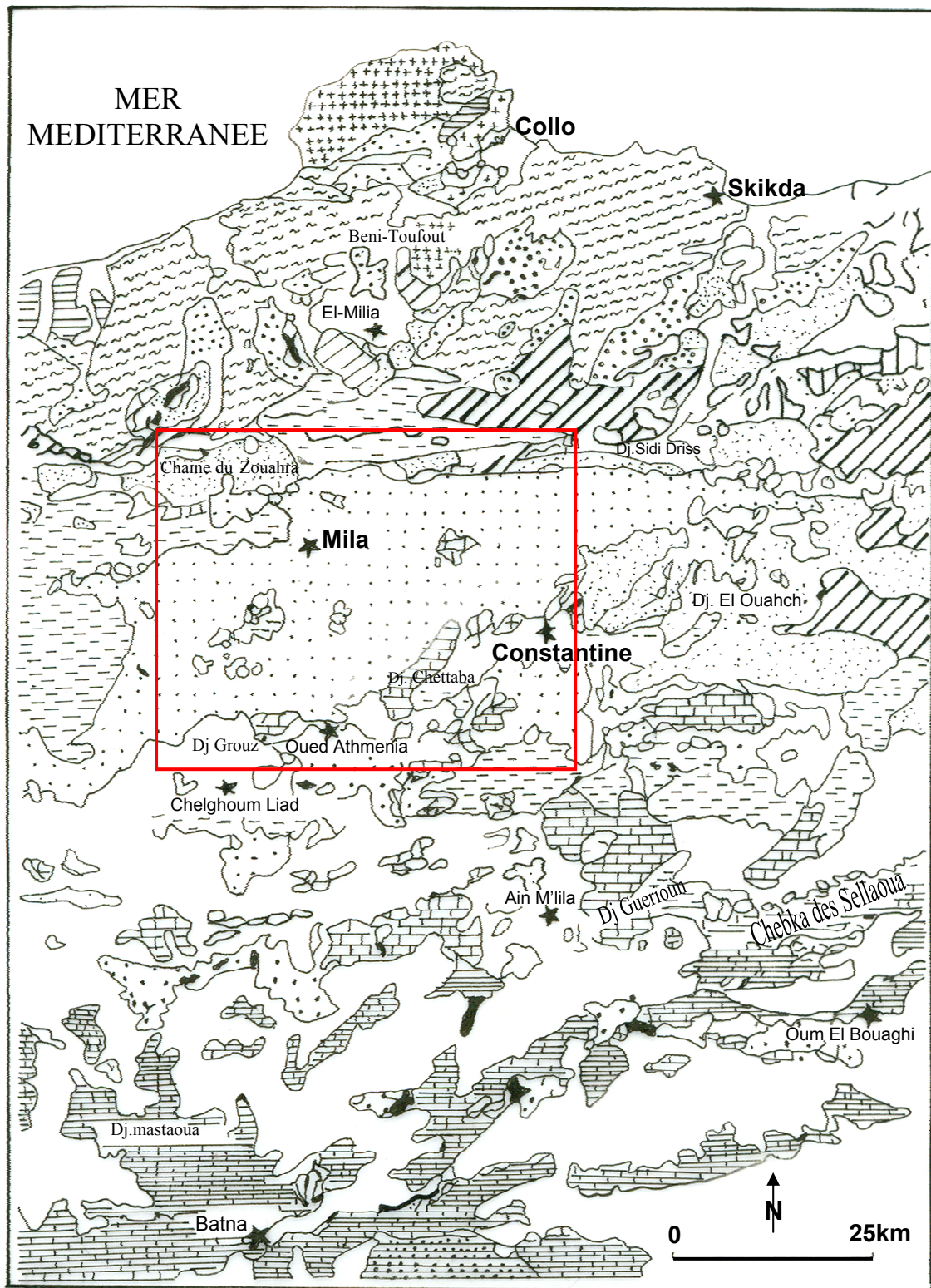


Fig.I.6 : Carte géologique synthétique du bassin de Constantine-Mila (J.M. Vila, 1980).

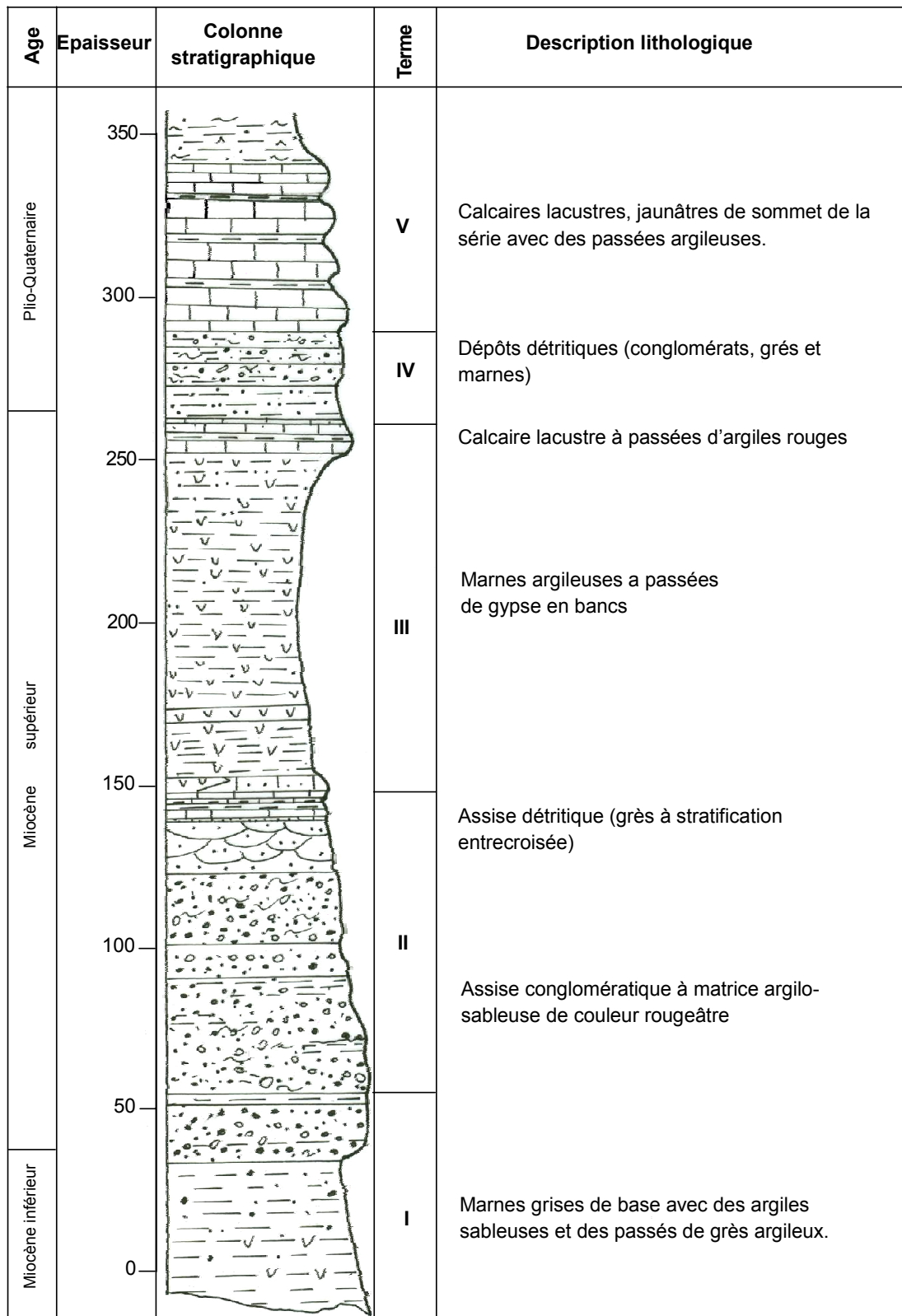


Figure I.7 : Colonne litho-stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila (P.E.Coiffait, 1992)

glissements superficiels fort gênants (J.M. Villa.1980). Le Mio-Pliocène continental est représenté par des argiles grises à intercalation de sel, des conglomérats variés et des calcaires lacustres. Il s'agit manifestement de matériel de comblement d'un bassin continental.

Le **Pliocène** est représenté par des calcaires lacustres, gris rosâtres parfois blancs à faune d'eau douce. Leur puissance peut atteindre 100m. Ils forment de hauts plateaux entre les massifs de Chettaba et djebel Akhal dans le Sud de la wilaya de Mila. A ces massifs calcaires s'ajoutent des éboulis de calcaires pliocènes dans des formations d'argile brunâtre. Les terrains pliocènes reposent sur la surface érodée des argiles du Miocène. Ils sont largement développés dans les parties Ouest et Sud de la région de Mila.

2.2.2/ Les dépôts quaternaires :

Les dépôts quaternaires sont largement représentés dans le bassin de Mila. Ils sont constitués d'alluvions actuelles et récentes des oueds (Oued Rhumel, Oued Endja...), des éboulis et formations de pente, alluvions anciennes de terrasses et croûtes calcaires.

Des terrains tout à fait remarquables sont à rapporter au Quaternaire, il s'agit d'accumulation de galets et de blocs de taille variable, noyés dans une masse argileuse sans aucune stratification visible, disposés en langues, ces dépôts correspondent à des déplacements en masse sous forme de coulées boueuses et leur surface est le siège de nombreux glissements de terrains (P.E. Coiffait, 1992). Selon cet auteur, la plus importante de ces coulées est celle sur laquelle est construite la ville de Mila, puisqu'elle atteint 7Km de long pour une largeur 1.2Km au départ.

3/ Cadre structural du bassin de Mila :

Le bassin de Mila occupe une situation particulière au sein des chaînes des maghrébides. Il se développe au pied de la limite méridionale des zones internes. Cette limite correspond à un important accident N100°E à N110° (Famille d'accident).

Deux types de structures caractérisent la bordure septentrionale du bassin de Constantine-Mila : des structures chevauchantes reprises par des accidents verticaux, correspondant à des failles inverses et des décrochements. Une importante faille limite les argiles marines de Mila, des argiles gypseuses et conglomérats astaraciens plus à l'Est (P. E. Coiffait, 1992).

La région de Mila dans son ensemble est affectée par deux phases tectoniques principales : la phase atlasique causant principalement des plissements de direction Nord-Est et Sud-Ouest et la phase alpine responsable des charriages Nord-Sud.

Le style dominant de la structure du bassin néogène de Mila est représenté par des nappes, on y trouve des unités autochtones et des unités allochtones. Les terrains autochtones sont représentés par l'autochtone relatif de la fenêtre de Koudiat Touachra et les séries autochtones

renferment les formations du Mio-Pliocène continental. Les terrains allochtones sont caractérisés par : la nappe numidienne et les nappes pénitelliennes, aux plissements multidirectionnels assez importants et par le jeu de failles complexes.

La région de Mila montre une complexité tectonique due à la conjugaison de plis et failles d'âge et style multiples. Selon P.E. Coiffait (1992); Y. Arris (1994) et C. Benabbes (2006), on peut décrypter en général deux systèmes linéamentaires pour les accidents comprenant trois directions principales : un système diagonal comprenant la direction Nord-Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest-Sud-Est qui a donné naissance à de grands plis selon la phase fini-Eocène et Lutétien et aboutissant à des structures en horsts et demi-horsts donnant ainsi un remplissage détritique néogène (Fig.I.8), et un système vertical regroupant les directions Nord-Sud et Est-Ouest. Ce système appartient à une phase compressive récente aboutissant à la configuration morpho-structurale actuelle du bassin de Mila.

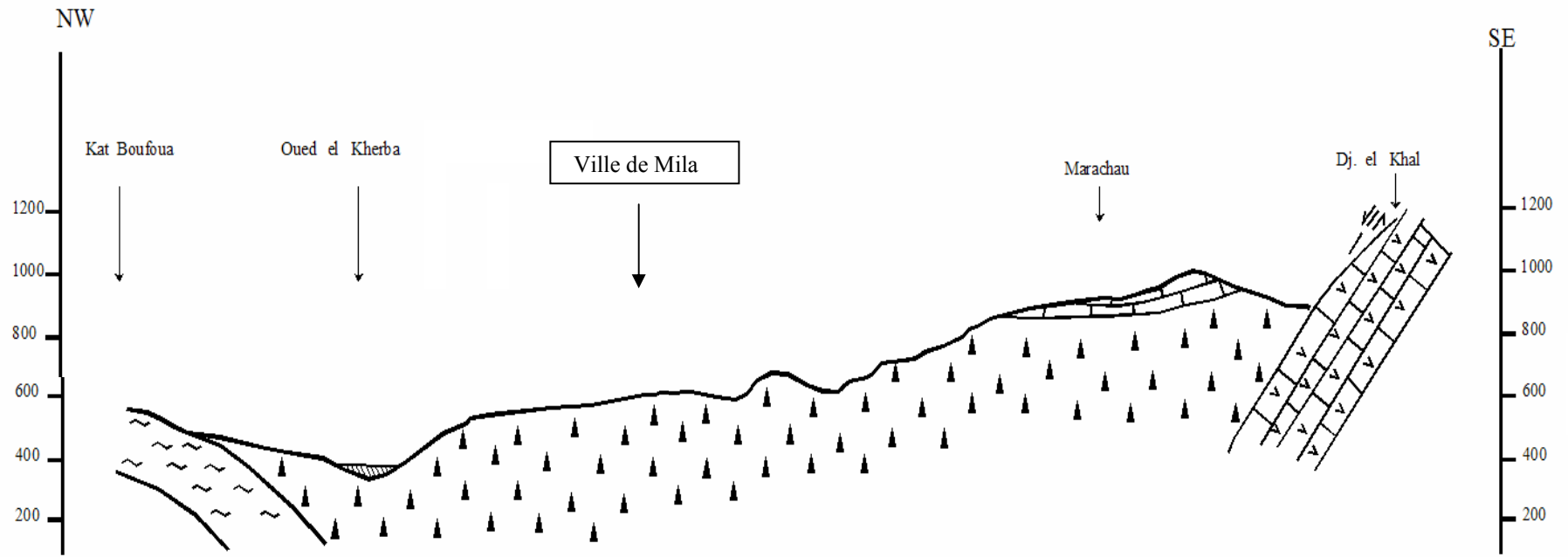
L'étude du système de fracturation qui affecte les formations dures permet de relever un réseau de fractures, caractérisé par l'intersection de plusieurs directions. Les zones d'intersection de ces failles aboutissent à la formation de nœuds tectoniques, ces nœuds tectoniques forment des zones très favorables aux instabilités de terrain. En effet, on peut relever une correspondance entre ces accidents tectoniques et les mouvements de terrain observables dans le secteur étudié (H. Zebouchi, 2008).

4/ Caractéristiques pétrographiques et minéralogiques des sols et roches rencontrés dans la région de Mila :

Les formations lithologiques présentes dans la région de Mila sont essentiellement dominées les dépôts néogènes et quaternaires. Elles sont représentées par des argiles et marnes, conglomérats, grès et sables, calcaires lacustres et en moindre mesure des roches évaporitiques (gypse et anhydrite).

4.1/ les marnes :

Elles forment le substratum, se sont des marnes grises à brunes, parfois noires remaniant des cailloutis et contiennent localement de petits lits de gypse. La partie sommitale de ces marnes est à tendance nettement marine (Miocène marin) comme témoignent les marnes argileuses à *Ostrea crassissima*. Elles sont attribuées au Helvétien (P. E Coiffait, 1992).



Echelle :1 / 50000







-  Q : Quaternaire : Alluvions anciennes et terres arables.
-   } mp : Mio-pliocène : Calcaires lacustres.
-  } Argiles grises à intercalations de sel, conglomérats et calcaires lacustres.
-  e³- e⁶: Maestrichtien à paléocène : Marnes noires à boules jaunes.
-  CI : Crétacé inférieur : Calcaires dolomitiques.

Fig I.8 : Coupe géologique passant par la ville de Mila (J.M. Vila, 1977).

4.2/ les conglomérats : On peut distinguer deux types de conglomérats :

Conglomérats rouge vif, souvent grossiers, dont les bancs sont séparés par des interlits d'argiles rouges, souvent sableuses ou à galets. Ces conglomérats sont à blocs parfois encroûtés, noyés dans une matrice argilo-sableuse. Ce sont les **conglomérats de l'Oued Mila** d'âge Vallésien et le Turolien (P. E. Coiffait, 1992). Au niveau de l'Oued Mila, des galets (dont la taille varie de 1 à 30 m) sont constitués essentiellement de Numidien, mais aussi d'Yprésien tellien (calcaire et silex), d'ultra-tellien, et, à moindre titre, de roches carbonatées du môle néritique du Constantinois et de flysch massylien (microbrèches).

Conglomérats, de teinte générale brunâtre, formés d'éléments centimétriques à décimétriques, et **grès souvent grossiers**. Les éléments aplatis surtout pour ceux de taille inférieure à 5cm, sont variés : très abondantes plaquettes de teinte verdâtre à brunâtre provenant des flyschs maurétanien et massylien, galets de grès du Numédien également abondants, calcaire fins du Sénonien à *Globotruncana*, silex bruns, petits éléments de quartzites, quelques galets de Crétacé néritique. Ces conglomérats d'âge Astaracien, équivalent continental du Serravallien, sont, en général, bien lavés et le ciment entre les grains est souvent sparitique (P. E. Coiffait, 1992).

4.3/ les grès :

Grès à nombreuses stratifications entrecroisées, mais pouvant présenter aussi un litage parallèle à la stratification et se débitant alors en plaquettes centimétriques. Le ciment de ces grès est calcaire. Ils sont d'âge Vallésien et Turolien, équivalents continentaux du Tortonien.

4.4/ les argiles et argiles à gypse :

Dans le bassin de Mila, individualisé à la fin du Tertiaire, les dépôts argileux occupent les parties profondes de celui-ci. Ces argiles admettent des intercalations de gypse d'épaisseur variable (allant du millimètre jusqu'à quelques mètres). Le gypse est fibreux il est relativement abondant dans ces dépressions. De part sa nature tendre, il possède une forte érodabilité en plus de sa faible densité et de son seuil de plasticité très bas. Ceci confère aux formations qu'il affecte (les argiles miocènes surtout) une grande propriété de dissolution, de migration, donnant toute une diversité de glissements de terrain localisés : notamment les formes de suffosion et les arrachements réduits semi-circulaires (H. Amireche, 2001).

Les différents types d'argile de la région de Mila sont : (P. E. Coiffait, 1992) :

Pélites gris bleu à brunes, sableuses, alternant avec des bancs de grès gris jaunâtre, friable, calcaireux et pélitique, parfois riches en glauconie. Ces pélites renferment de nombreux petits cristaux de **gypse**. Les diaclases sont remplies de gypses fibreux. Les niveaux argileux sont très souvent micacés (**biotite et muscovite**). Des **passées charbonneuses**

centimétriques existent dans certains niveaux pélitiques (près de Mila en X= 821,1 et Y= 349,2 ou encore, sur la feuille de Radjas el Ferada, en X= 800,4 et Y= 349,2) et au sein de certains bancs de grès (Oued el Mekraoued, en X= 321,4 et Y= 354,8). Il existe dans ce niveau une passée à *Ostrea crassissima* (Ouest de la Mechtat Sekoum), et de nombreux autres lamellibranches et gastéropodes. Ces pélites sont attribuées au Burdigalien supérieur et au Langhien (P. E. Coiffait, 1992).

(Pélite : série essentiellement argileuse, mais comprenant également des silts et des sables. In P. E. Coiffait, 1992).

Pélites brun rouge souvent sableuses, contenant fréquemment des galets centimétriques à décimétriques. Ces pélites, d'âge Astaracien, surtout quand elles sont brunes, contiennent du gypse, recristallisant au niveau des diaclases sous forme de gypse fibreux. Ce sont ces niveaux qui fluent le long des pentes. L'épaisseur de ce niveau est de l'ordre de 100 m.

Pélites, grises à brunes, parfois noires, souvent gypseuses. Certains niveaux sont très sableux, et on aboutit ainsi à des grès gris jaunâtre, à matrice argileuse, qui peuvent former, soit des lentilles au sein des marnes, lentilles correspondant à d'anciens chenaux, soit de véritables bancs. Localement (au Sud de Bab El Ahmar), certains de ces niveaux gréseux sont très riches en gastropodes, et tout particulièrement en cérithidés. Des petits niveaux, tout au plus décimétriques, de calcaires lacustres à ostracodes peuvent aussi exister.

Argiles de Sidi Krenennou (du Vallésien au Turolien): Argiles rouges à roses, sableuses, dans lesquelles s'intercalent, surtout dans la partie inférieure, d'assez nombreuses lentilles très aplaties (50 cm environ d'épaisseur, sur 10 à 20m de largeur) de grès. Ces grès, de couleur lie de vin, présentent de nombreuses stratifications obliques, localement des slumps centimétriques, et parfois un débit en feuilletés parallèles à la stratification. Ces lentilles gréseuses correspondent à d'anciens chenaux fluviaux. Par endroit, ces argiles rouges peuvent contenir des lentilles conglomératiques ou des blocs.

L'analyse minéralogique, par diffraction des rayons X, de quelques échantillons de sols, dans les terrains en mouvements dans la ville de Mila, a mis en évidence une composition polyminérale des argiles et une présence considérable de minéraux non argileux. Les principales espèces minérales formant les sols sont: l'Illite, la Montmorillonite, la kaolinite, la Chlorite, la Goéteite, la Chamosite, la Sidérite, le Gypse (Anhydrite), le Quartz et la Calcite (Fig.I.9 et 10) :

L'ILLITE très répandue dans la région d'étude, est surtout une argile de sédimentation marine, présente quant à elle des propriétés intermédiaires. Leurs pics varient de 3.96 A° à 7.63 A° voire même 8.59 A°. Sa structure est analogue à celle de la montmorillonite mais la

présence d'ions potassium K^+ rééquilibre et renforce la liaison entre les feuillets, rendant ainsi l'argile moins sensible aux phénomènes de gonflement, mais moins facilement identifiable et paradoxalement peut être plus dangereuse en conséquence.

LA MONTMORILLONITE présente une telle structure qu'elle peut emmagasiner beaucoup d'eau. Les sols dont la teneur de cette dernière est élevée, sont susceptibles de gonflement et de retrait importants suivant les variations de la teneur en eau. La conséquence directe de ce gonflement est une diminution des forces d'attraction entre les structures élémentaires de l'argile et par conséquent une baisse des caractéristiques mécaniques du milieu. Les montmorillonites donnent les structures les mieux développées et les cohésions les plus fortes en saisons sèches, mais elles perdent ses propriétés en saisons pluviales permettant l'apparition des mouvements de solifluxion. Elles s'individualisent par leur imperméabilisation et donnent ainsi des coefficients de ruissellement élevés. Dans la région de Mila, cette montmorillonite est de type 2/1, à couche te-oc-te (H. Amireche, 2001). Ce type d'argile appelle à une grande prudence lors de l'exécution des projets.

LA KAOLINITE se présente comme un assemblage de structures qui peut atteindre 0.1μ d'épaisseur. Cet assemblage est stable et ne peut fixer l'eau d'apport. Les liens d'Hydrogène entre les feuillets étant très forts, ils empêchent l'hydratation ce qui permet un empilement relativement important des feuillets qui sera difficilement dissocié, c'est pour cela qu'elle est la moins dangereuse (In P. Mouroux et al, 1988). Ce type d'argile est bien représenté dans la majorité des échantillons analysés. La kaolinite, formule chimique $Al_2(OH)_4Si_2O_5$ est typique des terrains émergés et altérés. Sa présence dans ces milieux, prouve la tendance à l'immersion temporelle de celle-ci (H. Amireche, 2001).

LA CHLORITE est une argile moins fréquente que les trois précédentes (sauf en trace) et résulte de l'altération de la Biotite en particulier. Elle a un feuillet d'une épaisseur double de celui de la Kaolinite, soit 14 \AA , comprenant un feuillet brucitique (si le Mg remplace l'Al dans le feuillet et qu'il occupe la position cation). Le feuillet brucitique est parfois incomplet, sa liaison est donc assez faible et permet l'introduction de l'eau. Les argiles présentant un pourcentage important de Chlorite (plus de 15%) peuvent donc être gonflantes.

On note la présence aussi d'autres minéraux argileux gonflants comme la Saponite et la Vermiculites, ces argiles sont susceptibles de fixer l'eau et donc de gonfler, ils sont aussi capables de la perdre et de se rétracter donnant des variations de volume (T. Lebourg, 2000).

LE QUARTZ existe dans la majorité des échantillons ainsi que la Cristobalite et la Tridimite. Ces deux dernières sont des minéraux à formule chimique de la famille des quartzs (SiO_2). Le pourcentage de la Silice peut aller jusqu'à 49%.

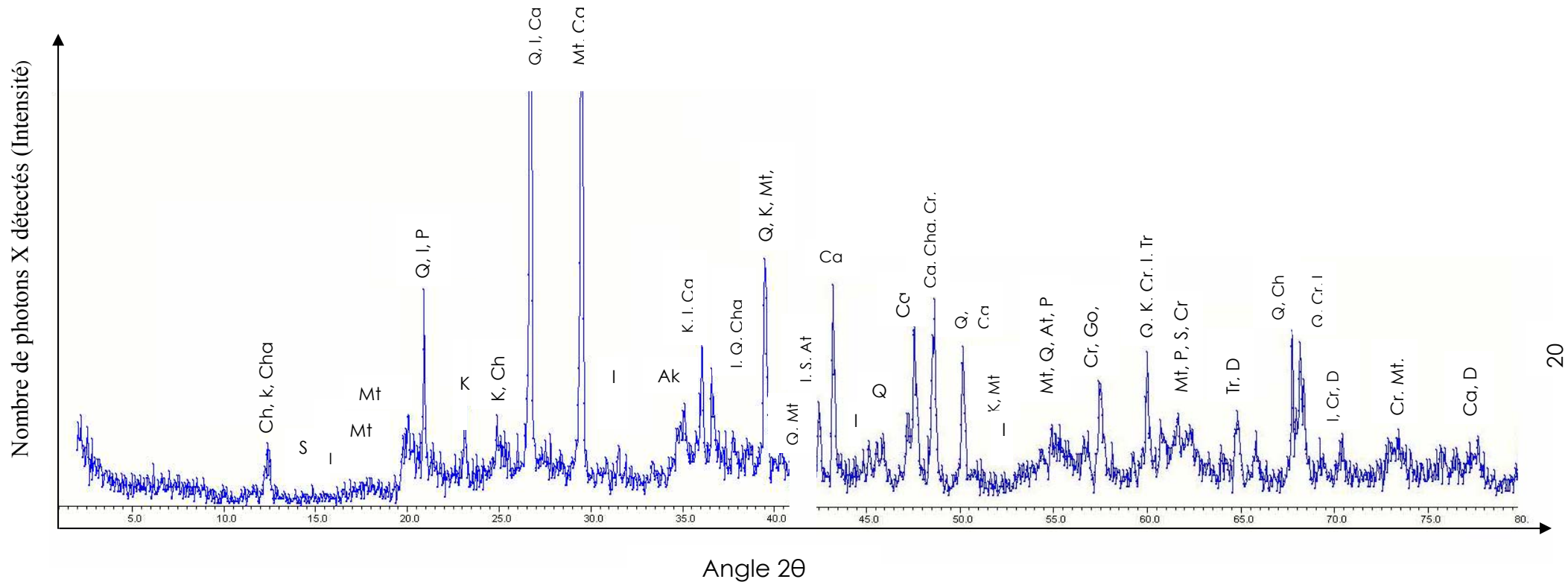


Fig. I. 9 : Diffractogramme des argiles du glissement du site 185 logements à Mila.

N.B : **I** : Illite, **Mt** : Montmorillonite, **K** : Kaolinite, **Q** : Quartz, **Ca** : Calcite, **Ch** : Chlorite, **Cha** : Chamosite, **S** : Sidérite, **P** : Pyrite, **Ak** : Akaganiéte, **At** : Attapulгите, **Cr** : Cristobalite, **Go** : Goethite, **Tr** : Tridimite, **D** : Dickite, **Pa** : Palygorsite, **B** : Biotite, **Ph** : Phlogopite, **An** : Antigorite, **Mca** : Manganocalcite, **Sa** : Saponite, **Ah** : Anhydrite, **H** : Hématite), **Gl** : Clauconite. **N** : Nicrite.

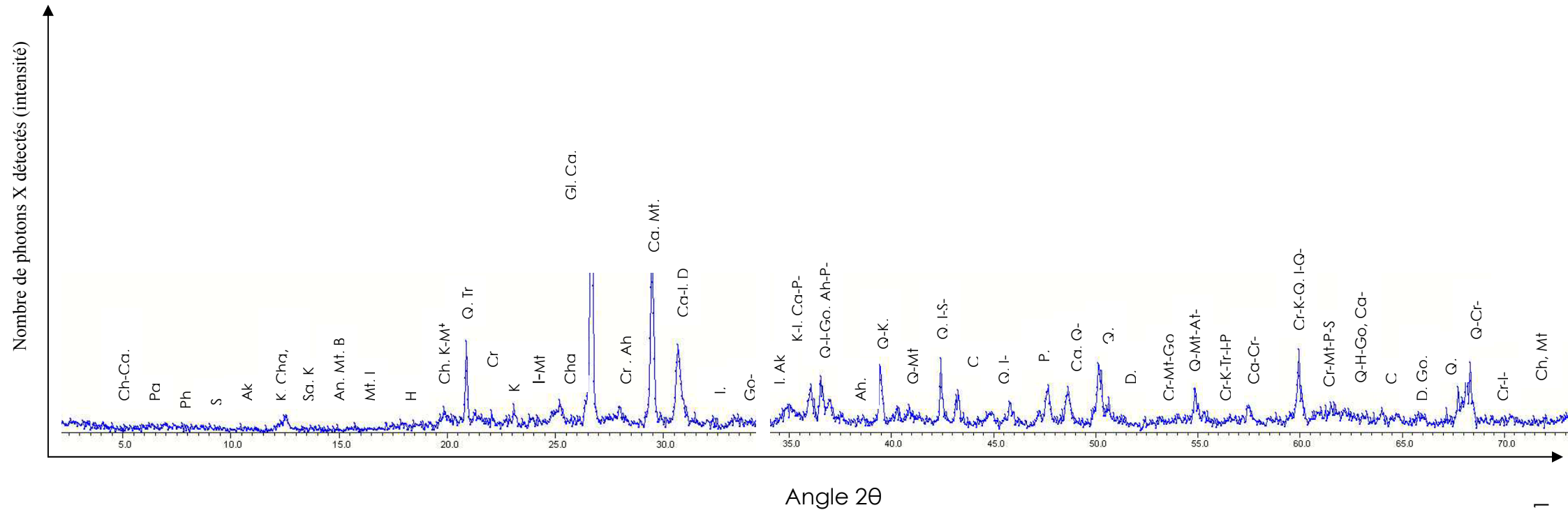


Fig.I.10 : Diffractogramme des argiles d'un glissement près de l'université de Mila.

N.B : **I** : Illite, **Mt** : Montmorillonite, **K** : Kaolinite, **Q** : Quartz, **Ca** : Calcite, **Ch** : Chlorite, **Cha** : Chamosite, **S** : Sidérite, **P** : Pyrite, **Ak** : Akaganiéte, **At** : Attapulгите, **Cr** : Cristobalite, **Go** : Goéthite, **Tr** : Tridimite, **D** : Dickite, **Pa** : Palygorsite, **B** : Biotite, **Ph** : Phlogopite, **An** : Antigorite, **Mca** : Monganocalcite, **Sa** : Saponite, **Ah** : Anhydrite, **H** : Hématite, **Gl** : Clauconite. **N** : Nicrite.

LE GYPSE (1 à 3%), LA CALCITE et la SIDERITE (10 à 29% parfois) accompagnent souvent ces argiles. A ces minéraux s'ajoutent certains impuretés notamment celles des FELDSPATHS en faibles quantités et des MINERAUX FERRIGINEUX (5 à 6%). Ces dernières, avec le calcium, sont des facteurs agrégeants et de stabilisation.

L'analyse chimique de quelques échantillons de sols de la région de Mila montre que les teneurs les plus élevées se rapportent aux éléments AL_2O_3 et SIO_2 . Ceci correspondrait à des minéraux alumino-silicatés, légèrement calcitiques (S. Souiki, 2007 ; K. Khellaf, 2009).

Les argiles rencontrées dans la région d'étude sont finalement formées de mélanges variés de minéraux argileux, se rattachant essentiellement à trois grandes familles : l'Illite, la Montmorillonite et Kaolinite. L'eau absorbée, par conséquent, joue un rôle significatif dans le comportement mécanique de ces minéraux.

4.5/ les calcaires lacustres :

Se sont des calcaires blanchâtres ou colorés, en bancs bien disposés, séparés de minces lits argileux rougeâtres (plus rarement brun orangé), ils sont souvent travertineux, fissurés et affectés de diaclases et de fentes ; ce qui les rend perméables. Le plus souvent ces calcaires correspondent à une micrite homogène, fréquemment grumeleuse, de type mudstone, affectée de fentes centimétriques de dessiccation et à nombreux « bird-eyes ». Mais ils présentent aussi souvent des encroûtements stromatolitiques en « chou-fleur », des pseudo-ooides millimétriques souvent oblitérés par une micritisation secondaire, et des niveaux à encroûtements cylindriques millimétriques correspondant à d'anciens manchons algaires autour de végétaux (P. E. Coiffait, 1992).

Au contact des argiles miocènes, ces calcaires lacustres constituent un binôme lithologique détenant un rôle majeur dans le déclenchement des glissements de terrain. Sur les versants argileux (A Ain Tinn et à El Malha par exemple), d'énormes blocs d'éboulis de calcaire travertineux ont glissés le long des pentes constituant de véritables chaos au milieu desquels apparaissent des émergences d'eau. Ce type d'éboulis vient alimenter les coulées boueuses héritées (H. Amireche, 2001).

VIII/ Conclusion :

La région de Mila fait partie du bassin de Mila, sous bassin du grand bassin néogène Constantinois. Ce dernier appartient au domaine tellien qui constitue les zones externes de la chaîne alpine d'Algérie nord orientale. Les formations présentes dans la région de Mila sont essentiellement des dépôts continentaux et marins transgressifs (dépôts détritiques et évaporitiques du Mio-Pliocène). L'une des caractéristiques géologiques du bassin de Mila est la prédominance des dépôts argileux conduisant de nombreuses instabilités de terrain.

Chapitre II :
Synthèse hydrologique et
hydrogéologique

I/ Introduction

Il est évident que l'eau joue un rôle primordial dans le déclenchement des mouvements de terrain. L'expérience a montré que la plus part des catastrophes liés aux glissements de terrain ont eu lieu durant les saisons des pluies et/ou la fonte des neiges. Cette constatation rend l'eau responsable de la majorité des instabilités des talus et ceci s'explique par deux faits importants :

- La présence d'eau augmente le poids et la poussée des terres mises en jeux dans le glissement surtout quand le massif n'est pas suffisamment perméable.
- La présence d'eau diminue très sensiblement les caractéristiques mécaniques de la plus part des sols.

Ces deux effets conduisent toujours à l'instabilité de terrain. De ce fait, la caractérisation hydrologique et hydrogéologique d'une région est l'un des aspects les plus importants de l'étude des zones instables.

A cet effet, nous essayerons de donner dans la présente étude les principales caractéristiques hydroclimatiques de la région de Mila, notamment les données pluviométriques, les données de la température, l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration. L'ensemble des ces données permet d'établir un bilan hydrique de la région.

II/ Analyse morphométrique du bassin versant

II.1/ Situation géographique :

La ville de Mila appartient au sous bassin de l'Oued Rhumel-Smendou noté 10-06 qui fait partie intégrante du grand bassin versant du Kébir-Rhumel (Fig.II.1). Il est limité au Nord par le sous-bassin Kébir Maritime, à l'Est par le bassin versant du Sybousse, à l'Ouest par le sous-bassin Kébir Amont Endja et au Sud par le sous-bassin du Oued Rhumel Seguen.

II.2/ Les caractéristiques morphométriques :

Les caractéristiques morphométriques d'un bassin influent sur l'écoulement global des eaux provenant des précipitations. Le sous-bassin de l' Oued Rhumel smendou a des caractéristiques morphométriques spectaculaires que les autres sous-bassins du bassin versant du Kébir Rhumel (Tableau.II.1), il possède une forme plus ou moins rectangulaire allongée dans la direction Est-Ouest, celle-ci est représentée par un indice de compacité de Gravilius $C = 1.21$, et un indice des pentes global $I_g = 14.1 \%$, qui aide à la compréhension de l'aptitude au ruissellement dans le secteur. Il s'étend sur une superficie d'environ 1100 km^2 , et d'altitude moyenne calculée à partir de la courbe hypsométrique de l'ordre de 700 à 800 m (A. Mebarki, 1982).

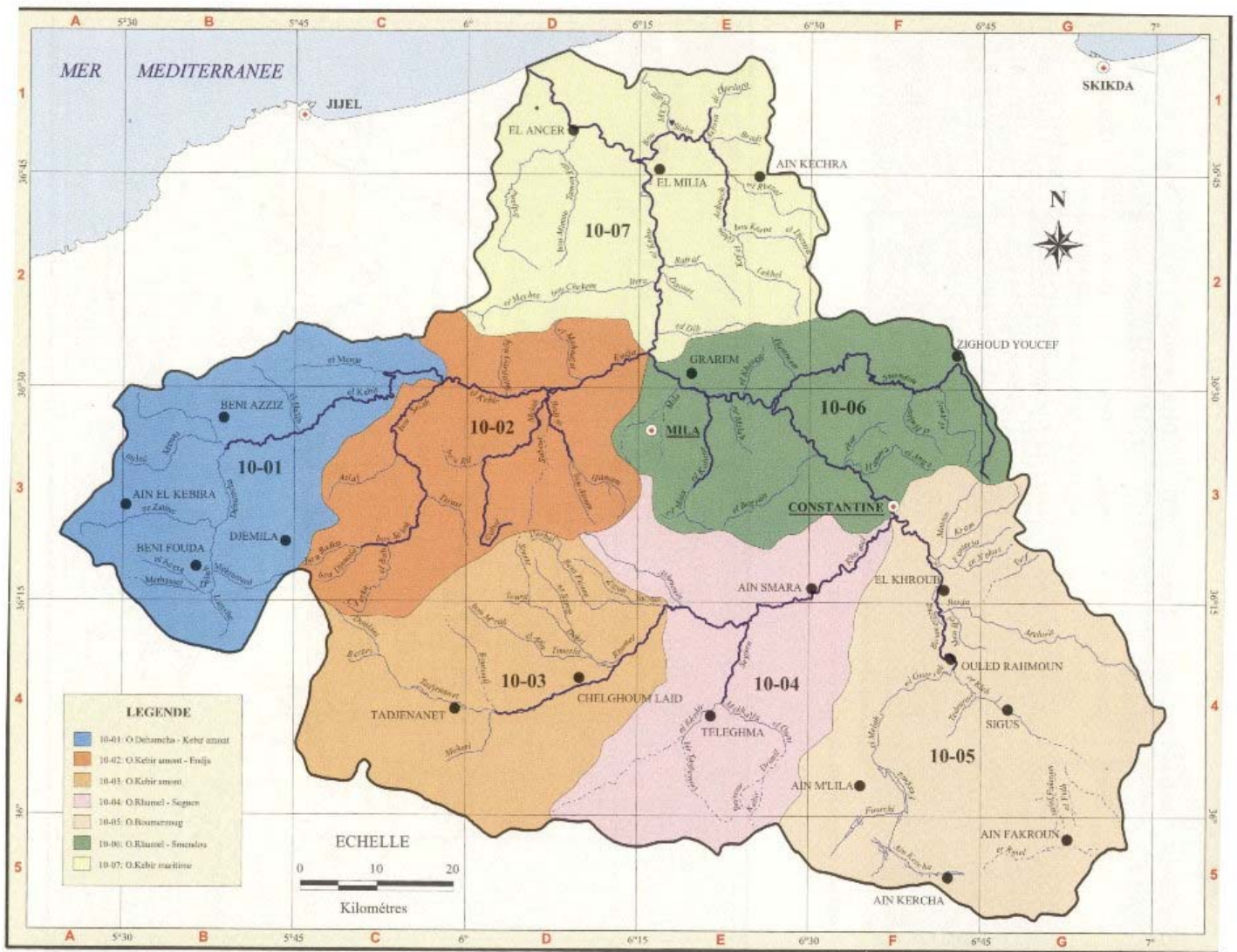


Fig.II.1 : Découpage du bassin versant du Kébir Rhumel (ANRH, 1999).

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant étudié peuvent être récapitulées dans le tableau suivant :

Caractéristiques morphométriques du bassin versant	Valeur correspondante
Superficie (S) en km ²	5293
Périmètre (P) en km	314
Indice de Gravilius (C)	1.21
Longueur du rectangle équivalent (L) en km	48.19
Largeur du rectangle équivalent (I) en km	22.64

Tableau.II.1 : Caractéristiques morphométriques du sous bassin de Rhumel-Smendou.

III/ Analyse des caractéristiques climatiques :

III.1/ Climat et facteurs climatiques du secteur étudié :

Le secteur étudié se trouve à la jonction de deux domaines climatiques différents : un climat tempéré et humide au Nord caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide avec des précipitations annuelles variant entre 900 et 1200 mm et un climat semi aride au Sud, marqué par un écart de température assez important avec des températures qui avoisinent 40°C en été et qui peuvent descendre au dessous de 0°C en hiver et des précipitations de l'ordre de 400 mm/an (Fig. II.2).

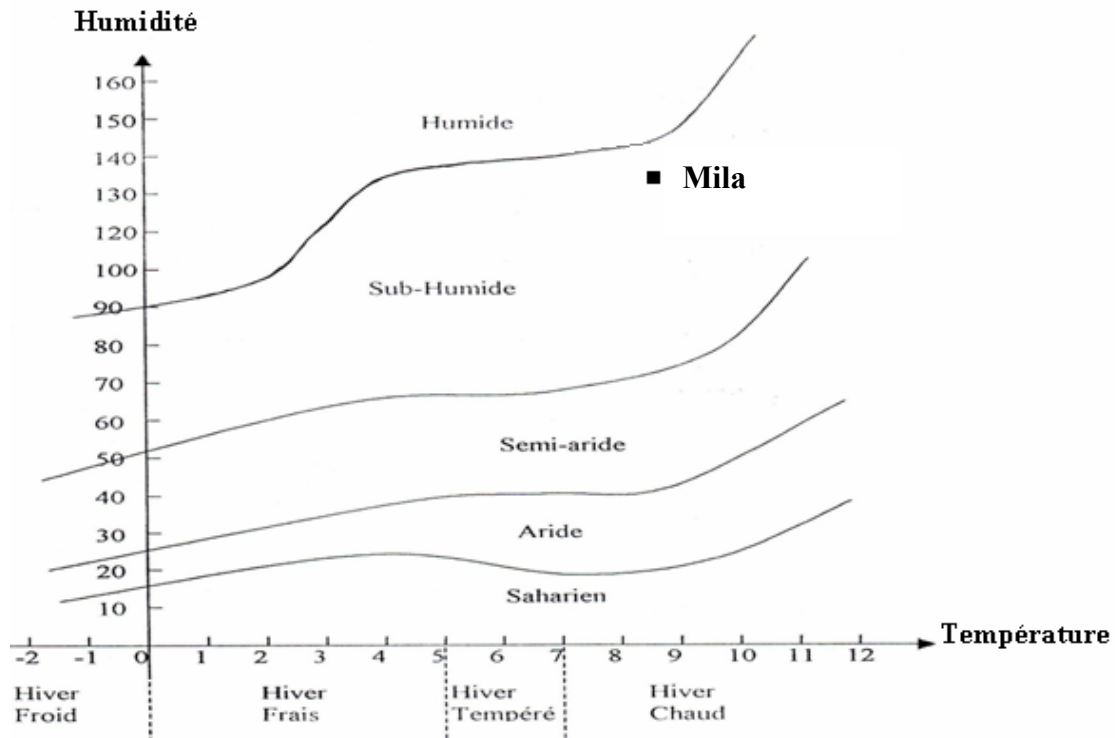


Fig.II.2: Climat du secteur étudié.

En se basant sur les renseignements fournis par les stations météorologiques les plus proches du site, on peut repérer les concentrations anormales et détermine la répartition mensuelle et annuelle des précipitations entre l'atmosphère, le sol et le sous-sol. Pour une superficie connue, cette répartition se fait selon l'équation suivante : $P = ET + R + I$, où les termes : ET, R et I correspondent successivement à l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration (P. Antoine et D. Fabre, 1980).

Les précipitations moyennes et persistantes sont plus dangereuses pour la stabilité d'un sol (surtout au niveau des versants) que les fortes averses de courte durée. Les premières favorisent une infiltration poussée et donc une imprégnation plus profonde et importante des terrains. Les

secondes seront dissipées en grande partie par ruissellement, sans modifier beaucoup la teneur en eau des terrains profonds. (G. Fillat, 1981).

L'estimation de la quantité d'eau imprégnant une région est très indispensable, car l'action de l'eau sur le sol se manifeste par plusieurs modes. La source principale de cette eau est la précipitation (pluviométrie) :

III.2/ La pluviométrie :

A l'échelle de l'Algérie, les cartes pluviométriques montrent une répartition géographique des précipitations caractérisée par une décroissance générale du Nord vers le Sud et de l'Est vers l'Ouest. La pluviométrie varie entre 2000 mm/an sur les hauts reliefs en bordure de la mer méditerranée et jusqu'à moins de 600 mm/an au mois d'Octobre sur les hautes plaines, puis décroît ensuite jusqu'à atteindre une valeur de 100 mm/an dans la région du Sahara central.

Pour évaluer le taux de ruissellement, d'infiltration et de l'alimentation des réserves aquifères, il est nécessaire de connaître la quantité d'eau précipitée sur la région.

La wilaya de Mila se situe dans une zone où la pluviométrie moyenne inter-annuelle est entre 600 et 700 mm.

La station la plus proche de la ville de Mila est celle de Hamala Grarem. Cependant, les données de cette station marquent une lacune entre 1998 et 2000. Pour palier à ce manque, il a été tenu compte aussi les données des stations de Beni Haroun et d'Ain El Bey (Constantine).

D'après les données récentes récoltées de la station de Beni Haroun, nous avons élaboré un graphique des précipitations moyennes mensuelles, sur une période de 5 ans (2003 à 2007). De ces données, il ressort que le mois le plus pluvieux est celui de Décembre avec une moyenne de 159.87 mm, tandis que le mois le moins pluvieux est celui de Juillet avec une moyenne de précipitation de l'ordre de 0.46 mm (Tableau.II.2). En général, l'évolution des précipitations dans le temps est croissante d'Août à Décembre. Par comparaison, on remarque que les données des deux autres stations donnent presque les mêmes résultats (Tableau.II.3 et 4).

Afin d'illustrer la pluviométrie moyenne mensuelle au niveau du bassin versant de la région de Mila, on a élaboré les graphiques de pluviométrie saisonnière (Fig.II.3), on remarque que presque la moitié de la lame reçue par le bassin versant se manifeste en hiver (50.80% pour la station de Beni Haroun (Fig.II.4), 49.88% pour la station de Hamala Grarem (Fig.II.5) et 38.10% pour la station d'Ain El Bey (Fig II.6)). Ces données de pluviométrie laissent apparaître que l'alimentation des cours d'eau et des nappes aquifères par les précipitations se fait principalement en hiver. Les précipitations moyennes inter-annuelles dans la région de Mila est de l'ordre de 612.75 mm (station de Beni Haroun) et de 674.78 mm (station de Hamala Grarem).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
2003	30.10	50.00	38.20	190.60	-	-	-	-	-	-	-	-	308.90
2004	35.30	32.10	145.60	212.90	83.40	32.20	50.20	81.60	60.70	44.00	00.90	00.00	778.90
2005	12.20	19.20	86.90	84.20	128.60	149.10	50.00	103.30	06.20	00.00	00.50	01.70	641.90
2006	35.30	24.10	34.90	151.80	97.80	85.30	37.30	10.60	46.70	00.00	00.00	2.80	526.60
2007	-	-	-	-	10.30	19.10	-	-	-	-	-	-	29.40
Total	112.90	125.40	305.60	639.50	320.10	285.70	137.50	195.50	113.60	44.00	01.40	04.50	2285.70
Moyenne mensuelle	28.22	31.35	76.40	159.87	80.02	71.42	45.83	65.16	37.86	14.66	00.46	01.50	612.75
Moyenne saisonnière	135.97 mm = 22.19 %			311.31 mm = 50.80 %			148.85 mm = 24.29 %			16.62 mm = 2.71 %			

Tableau.II.2 : Précipitations moyennes mensuelles en mm durant la période : 2003 - 2007 (Station de Beni Haroun).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
1984	45.00	200	13.10	380	120	43.00	160	47.90	38.00	00.00	11.00	00.00	1058
1985	47.00	26.50	49.50	63.20	200	80.00	120	37.70	08.00	07.50	00.00	00.00	639.40
1986	14.90	50.80	120.30	157.80	105.70	230	94.00	58.80	40.00	00.00	00.00	00.00	639.40
1987	11.30	25.80	53.30	23.30	110.70	105	100	48,24	20.00	20.50	00.00	00.00	518.14
1988	24.40	0.00	40.30	300	100	64.00	62.00	107	16.00	00.00	00.00	05.70	717.50
1989	36.70	102.10	50.40	27.00	140	00.00	34.00	55.00	60.90	00.00	10.00	12.50	528.60
1990	0.00	08.00	150.00	250	78.50	100	95.00	76.00	60.40	00.00	00.00	00.00	817.90
1991	11.50	96.20	42.00	20.00	100	74.00	82.00	170	72.00	14.00	15.50	00.00	697.20
1992	21.50	20.00	35.00	250	110	95.50	50.00	41.70	60.50	08.00	04.96	10.00	702.20
1993	19.00	00.00	40.50	225	100	28.98	8.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	421.48
1994	41.50	79.80	92.00	84.80	200	40.00	90.00	35.00	04.60	58.80	00.00	00.00	726.50
1995	43.20	40.30	96.70	47.80	85.80	35.00	91.00	81.50	50.40	13.12	00.00	00.00	541.82
1996	32.00	50.00	49.20	60.00	140	30.00	18.00	28.50	15.90	16.00	00.00	16.50	456.10
1997	30.00	70.00	160.00	140	87.47	80.00	63.00	76.00	18.00	17.90	03.00	05.00	750.37
Total	378.00	769.50	992.30	2028.90	1678.17	931.48	1067	863.34	464.70	155.82	44.46	49.70	9214.61
Moyenne mensuelle	27.00	54.96	67.30	144.92	119.86	71.82	76.21	61.67	33.19	11.13	03.17	03.55	674.78
Moyenne saisonnière	149.26 mm = 22.11 %			336.60 mm = 49.88 %			171.07 mm = 25.35 %			17.85 mm = 02.64 %			

Tableau.II.3 : Précipitations moyennes mensuelles en mm durant la période : 1984 - 1997 (Station de Hamala Grarem).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
1990	21.30	09.50	115.40	99.90	56.00	00.00	23.30	33.60	26.70	12.40	01.80	26.30	426.20
1991	43.70	88.30	21.80	21.00	20.90	67.10	92.80	59.30	81.00	08.50	03.10	01.50	509.00
1992	20.60	22.90	116.10	192.80	52.80	33.20	49.50	134.50	97.30	10.70	17.30	10.30	758.00
1993	22.10	11.90	22.00	126.60	49.50	58.00	25.50	12.30	52.80	03.00	02.90	04.80	391.40
1994	28.80	90.60	24.00	49.40	66.10	87.50	18.10	78.80	06.00	00.00	00.30	02.00	451.60
1995	47.50	08.30	42.50	28.40	216.10	17.50	84.70	30.10	05.90	52.40	00.00	01.20	534.60
1996	15.00	10.00	26.00	47.00	88.00	181.00	54.00	67.00	62.00	42.00	21.00	15.00	628.00
1997	38.90	50.20	110.00	65.80	33.10	22.40	59.00	57.70	18.00	33.20	01.20	17.20	447.50
1998	75.20	32.60	135.30	53.10	36.40	52.70	37.40	70.80	49.60	18.30	00.00	08.90	570.30
1999	58.70	35.70	79.20	93.60	73.70	42.10	57.60	31.70	10.50	20.40	03.30	07.70	514.20
2000	18.40	38.30	31.70	57.70	17.40	36.00	14.40	32.90	48.40	43.60	00.00	15.70	390.50
Total	390.20	398.30	724.00	835.30	710.00	597.50	516.30	608.70	494.20	244.50	50.90	110.60	5621.30
Moyenne mensuelle	35.50	36.20	65.80	75.90	64.50	54.30	46.90	55.30	44.90	22.20	04.60	10.10	511.00
Moyenne saisonnière	137.50 mm = 26.90 %			194,70 mm = 38.10 %			147.10 mm = 28.78 %			36.90 mm = 07.22 %			

Tableau.II.4 : Précipitations moyennes mensuelles en mm durant la période : 1990 - 2000 (Station d'Ain El Bey - Constantine).

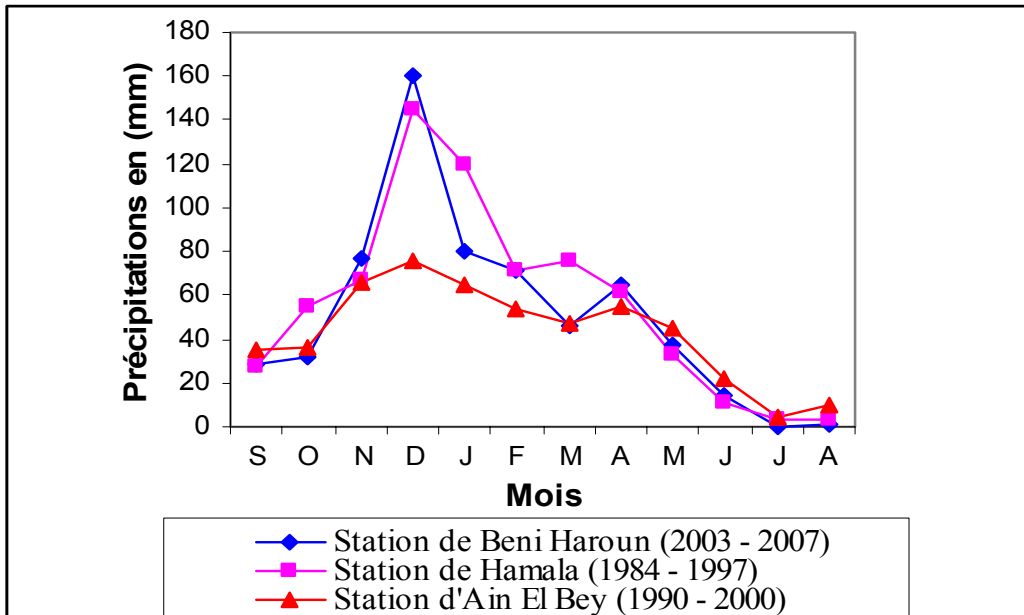


Fig.II.3 : Distribution des précipitations moyennes mensuelles des trois stations.

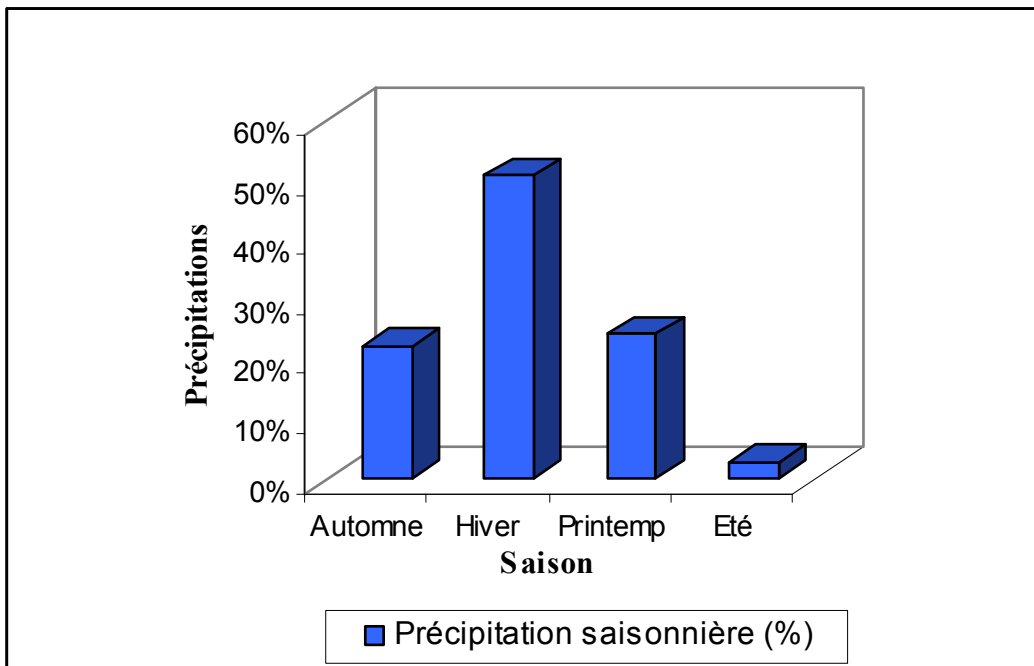


Fig.II.4: Répartition de précipitations moyennes saisonnières durant la période : 2003 – 2007 (Station de Beni Haroun).

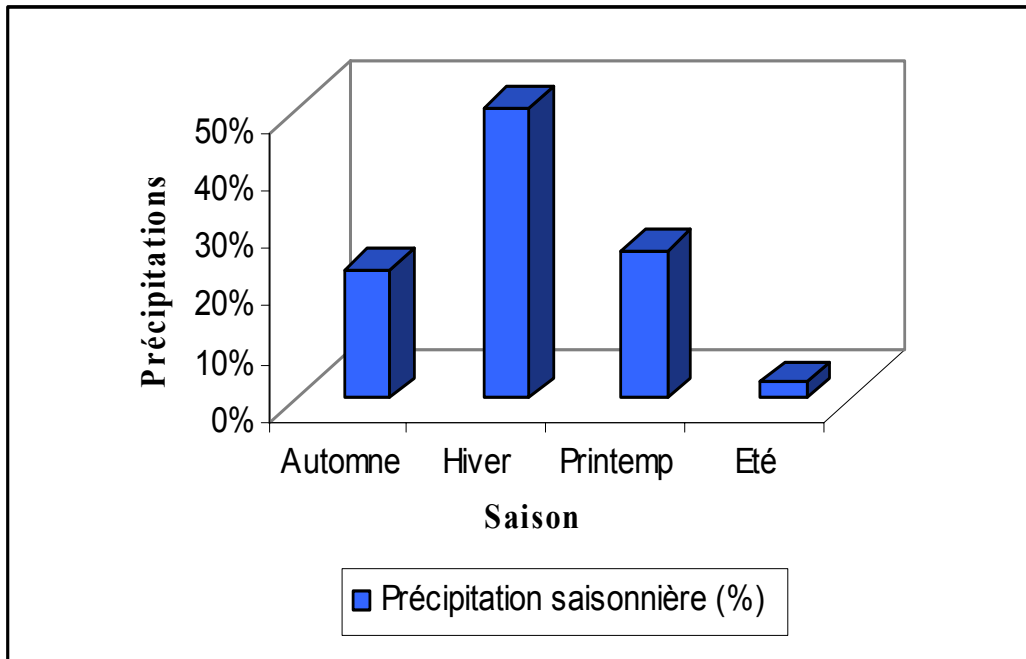


Fig.II.5 : Répartition de précipitations moyennes saisonnières durant la période : 1984 – 1997 (Station de Hamala).

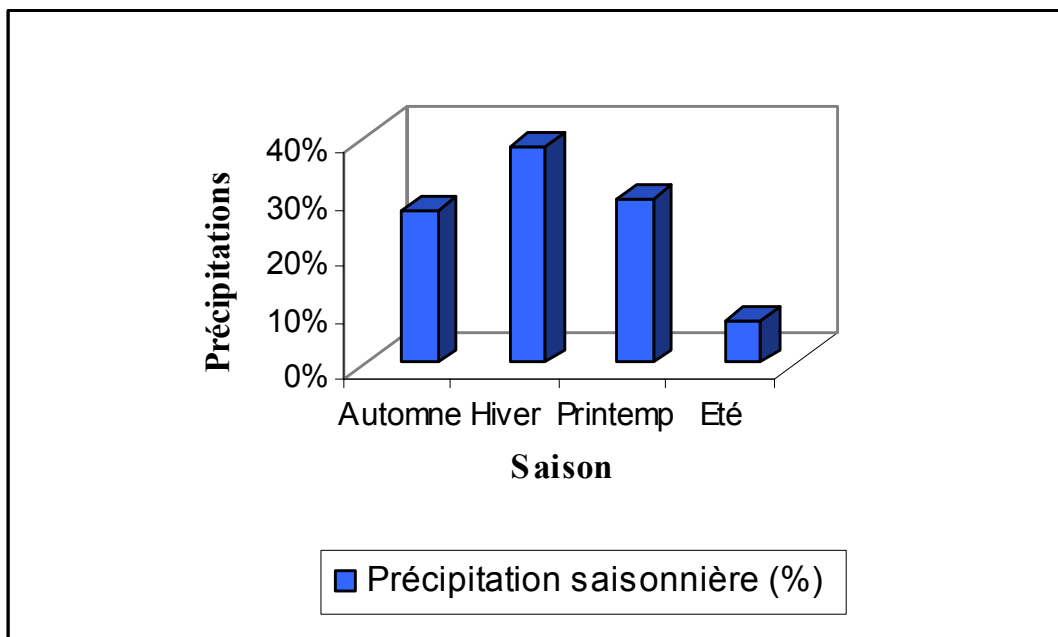


Fig.II.6 : Répartition de précipitations moyennes saisonnières durant la période : 1990 – 2000 (Station de Ain El Bey - Constantine).

III.3/ La température :

La température constitue avec les précipitations l'élément majeur qui régit le climat d'une région. Elle constitue un facteur très important qui intervient dans le calcul de l'évapotranspiration. C'est bien évident que les contrastes importants de température (écart considérable de température) entre le jour et la nuit, ont un effet négatif sur le comportement des sols et des roches. En effet, les contrastes importants de température entraînent la désagrégation mécanique des roches qui facilite le phénomène de gel et dégel.

L'examen des tableaux 5, 6 et 7 montre bien que la température moyenne inter-annuelle est de l'ordre de 15.21°C pour la station de Beni Haroun avec les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre, comme mois les plus chauds (avec un maximum de température au mois de Juillet : 27.40°C). Pour les stations de Hamala et de Constantine, les données de température indiquent des résultats proches à ceux de la station de Beni Haroun :

Station de Hamala Grarem : la température moyenne inter-annuelle est égale à 17.43°C avec les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre comme mois les plus chauds (avec un maximum de température égal à 27.57°C au mois de Juillet).

Station de Constantine : la température moyenne inter-annuelle est de l'ordre de 15.40°C avec les mois les plus chauds sont : Juin, Juillet, Août et Septembre, avec un maximum de température enregistré au mois d'Août (25.90°C).

III.4/ Graphe ombro-thermique :

En étudiant la relation entre la température moyenne mensuelle et les précipitations totales du mois (Fig.II.7 et 8), on peut constater que :

- La courbe de précipitation se situe au dessus de la courbe thermique du mois de Novembre à la fin d'Avril, tandis que du début de Mai jusqu'à la fin d'Octobre, la courbe thermique se trouve au dessus de celle de la pluviométrie.
- La période sèche s'étend du mois d'Avril au mois d'Octobre. Cette période s'étale sur plusieurs mois secs successifs.

Un mois sec est défini selon Gaussen et Bagnouls comme celui ayant un total de précipitation égal ou inférieur au double de la température moyenne du même mois ($P \leq 2T$).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Moyenne
2003	-	21.00	15.50	09.70	-	-	-	-	-	-	-	-	15.40
2004	23.90	21.00	12.46	10.60	09.90	11.90	13.10	14.00	17.00	24.00	26.70	28.00	17.71
2005	23.50	19.60	12.76	09.80	06.70	06.20	10.36	13.50	19.70	24.60	28.10	26.30	16.76
2006	-	22.70	16.69	-	08.60	09.40	13.73	22.10	-	-	-	-	15.53
2007	-	-	-	-	10.40	10.90	-	-	-	-	-	-	10.65
Total	47.40	84.30	57.41	30.10	35.60	38.40	37.19	49.60	36.70	48.60	54.80	54.30	76.05
Moyenne mensuelle	23.70	21.07	14.35	10.03	08.90	09.60	12.39	16.53	18.35	24.30	27.40	27.15	15.21

Tableau.IV.5 : Températures moyennes mensuelles en °C durant la période : 2003 – 2007 (Station de Beni Haroun).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Moyenne
1984	22.94	18.74	13.70	09.78	09.98	11.00	11.95	14.71	18.07	22.89	27.41	26.80	17.25
1985	22.84	18.49	14.00	09.98	08.23	10.88	12.16	14.99	18.97	23.59	27.90	27.50	17.46
1986	22.19	18.29	13.25	09.93	08.48	10.72	11.97	14.50	18.27	23.89	28.00	27.97	17.28
1987	24.09	19.64	13.30	10.33	10.17	09.90	11.82	14.46	18.98	23.29	27.60	28.12	17.64
1988	22.94	18.89	13.75	10.18	08.78	10.80	12.93	14.30	18.97	23.84	27.62	27.32	17.52
1989	22.49	18.94	13.25	10.63	08.48	11.17	12.96	14.36	18.67	23.34	27.16	27.42	17.40
1990	23.74	18.89	12.65	09.83	09.98	10.60	12.56	14.46	17.92	24.14	26.66	26.33	17.33
1991	23.79	18.69	13.70	09.75	08.53	09.87	12.70	14.31	18.82	22.54	26.76	27.00	17.20
1992	23.69	18.74	12.25	09.98	08.23	10.72	12.76	14.06	17.97	22.69	27.16	26.80	17.08
1993	23.64	18.64	13.20	10.80	08.88	10.92	13.98	16.51	18.02	23.59	27.11	27.42	17.72
1994	22.64	18.54	13.00	09.78	08.93	10.97	12.50	14.52	19.02	23.54	30.76	28.60	17.73
1995	22.70	18.92	13.20	10.50	08.70	11.00	12.60	15.59	18.59	24.20	27.30	27.15	17.53
1996	23.49	18.60	13.50	09.81	09.01	10.87	13.96	15.01	18.40	23.80	27.00	27.25	17.57
1997	22.50	18.50	12.84	10.50	09.88	10.60	13.37	14.20	18.01	23.51	27.50	28.00	17.45
Total	323.68	262.51	185.59	141.78	126.26	150.02	178.22	205.98	258.68	328.85	385.94	383.68	244.12
Moyenne mensuelle	23.12	18.75	13.26	10.14	09.01	10.71	12.73	14.71	18.47	23.48	27.57	27.40	17.437

Tableau.II.6 : Températures moyennes mensuelles en °C durant la période : 1984 – 1997 (Station de Hamala).

Année	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Moyenne
1990	24.30	18.50	11.40	05.70	06.80	10.40	10.50	12.20	17.10	24.10	24.50	23.50	15.80
1991	22.20	16.10	10.40	05.80	05.90	06.10	10.80	09.90	12.90	20.70	25.50	25.40	14.30
1992	21.80	16.70	11.90	07.10	05.10	06.80	08.90	11.40	16.00	19.20	22.70	24.90	14.40
1993	21.70	17.80	10.90	07.80	05.00	05.80	08.60	12.30	17.30	22.60	25.40	26.20	15.10
1994	22.90	16.80	12.70	07.90	07.50	08.30	11.30	10.30	19.70	22.50	26.70	28.70	16.30
1995	20.70	16.70	11.50	10.10	05.90	09.70	09.00	11.20	18.20	21.90	25.90	24.50	15.40
1996	19.30	14.50	12.20	09.60	09.10	06.50	10.20	11.90	16.40	19.70	17.20	25.60	14.40
1997	21.10	16.80	11.80	08.40	08.30	09.10	09.10	12.30	19.90	24.90	25.50	25.30	16.00
1998	22.30	14.60	10.10	06.50	07.20	08.20	09.50	13.40	16.30	23.70	26.60	25.50	15.30
1999	23.10	19.30	10.40	07.50	07.20	05.50	10.10	13.40	21.10	24.30	25.50	28.90	16.40
2000	21.90	15.90	12.30	09.10	04.60	08.20	11.20	14.60	20.10	22.30	26.90	26.40	16.10
Total	241.30	183.70	125.60	85.50	72.60	92.80	109.20	132.90	195.00	245.90	272.40	284.90	169.50
Moyenne mensuelle	21.90	16.70	11.40	07.80	06.60	07.70	09.90	12.10	17.70	22.40	24.80	25.90	15.40

Tableau.II.7 : Températures moyennes mensuelles en °C durant la période : 1990 – 2000 (Station de Ain El Bey - Constantine)

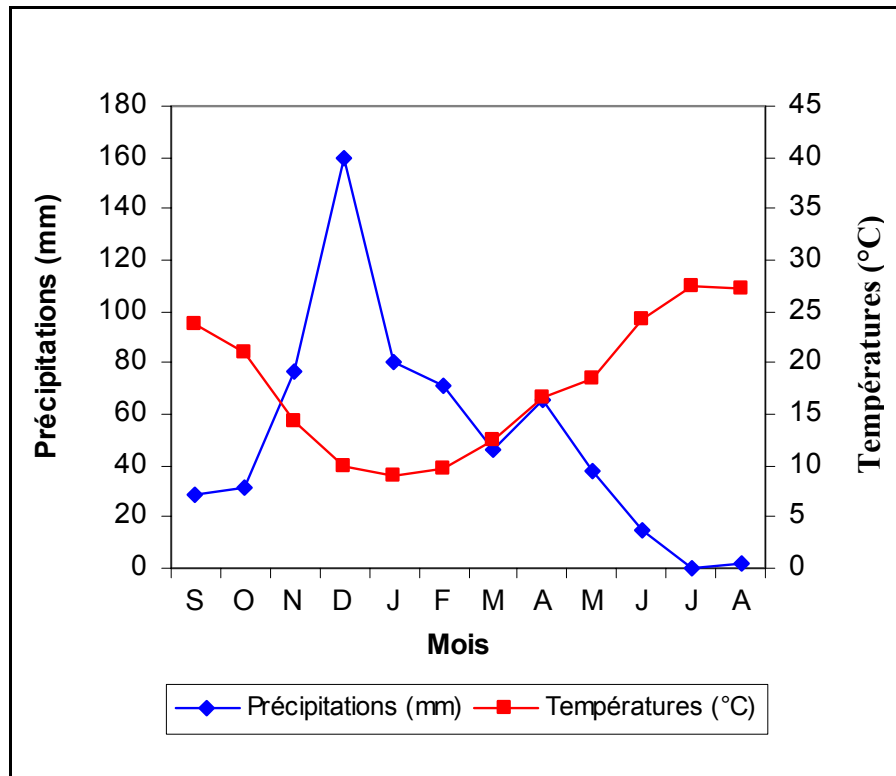


Fig.II.7 : Graphe Ombro-Thermique durant la période : 2003 - 2007 (Station de Beni Haroun).

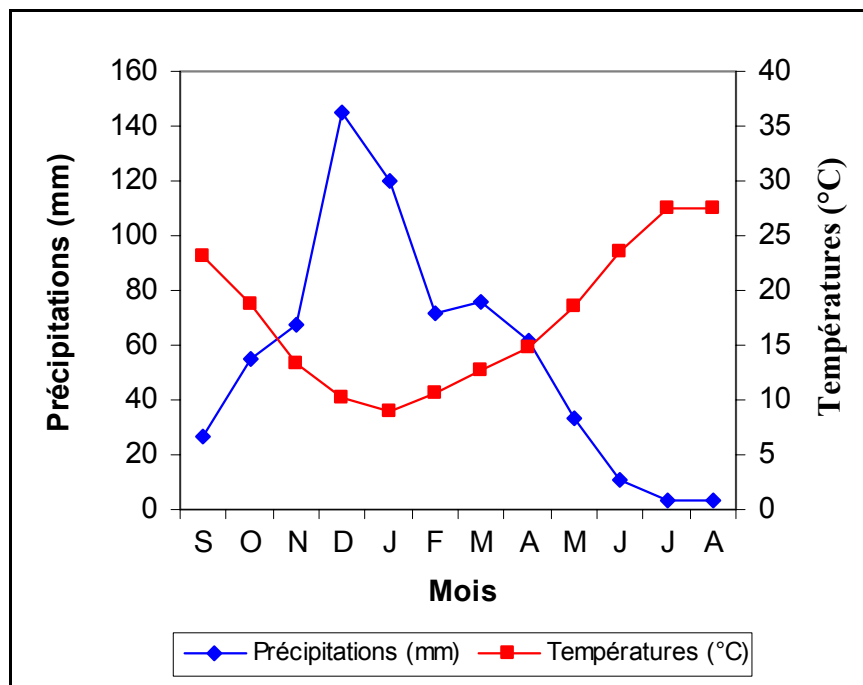


Fig.II.8 : Graphe Ombro-Thermique durant la période : 1984 - 1997 (Station de Hamala Grarem).

III.5/ L'humidité :

C'est un état de climat correspondant à la quantité de vapeur d'eau dans l'air. Elle peut jouer le rôle de facteur catalyseur pour les réactions d'altération chimique des roches à la surface, comme par exemple le phénomène d'oxydation.

En raison du manque de données au niveau des stations pluviométriques de Beni Haroun et de Hamala Grarem, seules les données de la station d'Ain El Bey ont été utilisées. L'humidité relative varie entre un minimum de 50% au mois de Juillet et un maximum de 80% au mois de Décembre et de Janvier (Fig. II.9).

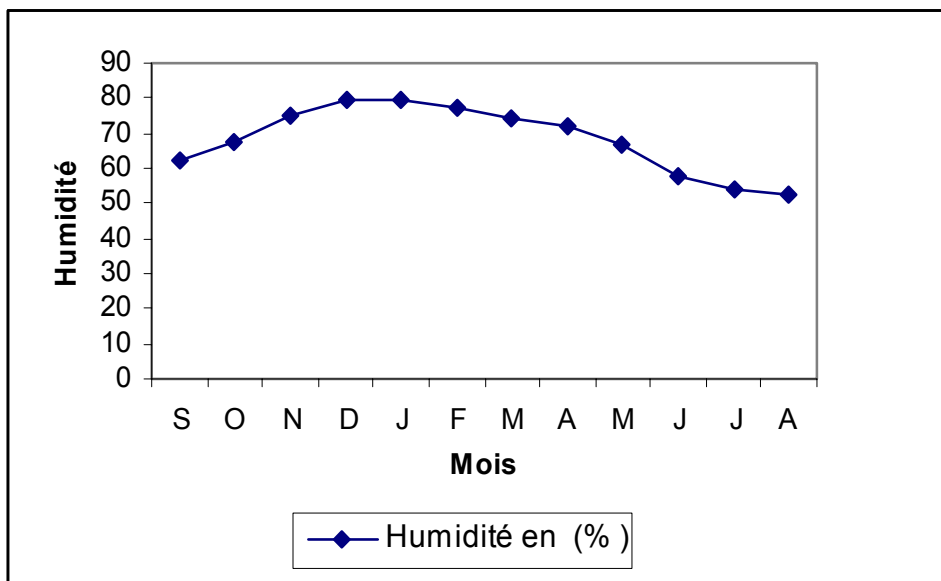


Fig.II.9 : Humidité relative moyenne en % durant la période : 1990 – 1999 (Station de Constantine).

III.6/ L'aridité :

C'est l'état du climat qui permet d'évaluer le phénomène de désagrégation, d'érosion et par conséquent de l'instabilité des sites dans une région. Cet état est exprimé par l'indice d'aridité de

E. De Martonne, donné par la formule :
$$I = \frac{P_{\text{moy}}}{T_{\text{moy}} + 10}$$

Avec : I : Indice d'aridité de E. De Martonne;

P_{moy} : Précipitation moyenne annuelle (mm);

T_{moy} : Température moyenne annuelle (°C).

Aux différentes valeurs de I, correspondent des types de climats :

$I < 5$: le climat est hyper-aride; $5 < I < 7.5$: le climat est désertique; $7.5 < I < 10$: le climat est steppique; $10 < I < 20$: le climat est semi-aride et $20 < I < 30$: le climat est tempéré.

$$\text{Pour la région de Beni Haroun : } I = \frac{612.75}{15.21+10} = 24.30 ;$$

$$\text{La région de Hamala Grarem : } I = \frac{674.78}{17.43+10} = 24.60$$

Donc la région de Mila est caractérisée par un **climat tempéré**.

III.7/ Appréciation du bilan hydrologique :

L'établissement d'un bilan hydrologique est indispensable pour l'évaluation des réserves d'eau transmises ou emmagasinées dans une région. Il est donné par la formule suivante (G. Réméniéras, 1980) :

$$P = ETR + R + I + Wa$$

Avec : P : Précipitation moyenne annuelle (mm);

ETR : Evapotranspiration réelle (mm) ;

R : Ruissellement (mm) ;

I : Infiltration (mm) ;

Wa : Variation des réserves (souvent négligeable).

A/ Calcul de l'évapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) correspond à l'évapotranspiration d'une surface qui serait suffisamment approvisionnée en eau pour évaporer la quantité d'eau maximale permise par les conditions climatiques. A cet effet, Thornthwaite a établi une corrélation entre la température moyenne mensuelle et l'évapotranspiration potentielle mensuelle. La formule utilisée pour le calcul de l'ETP selon Thornthwaite est donnée comme suit : $ETP = 16 [10.T / I]^a$

Avec : ETP : Evapotranspiration potentielle en mm;

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré, exprimé en °C;

I : Indice thermique annuel égal à la somme des indices mensuels des 12 mois de

$$\text{l'année : } I = \sum_{i=1}^{12} i \quad \text{avec : } i = \left[\frac{T}{5} \right]^{1.514} \quad \text{et } a = 0.016 \cdot I + 0.5$$

ETPC = ETP . K , avec : ETPC : Evapotranspiration potentielle mensuelle corrigée;

K : Coefficient de correction.

D'après les données de la station de Beni Haroun : I = 86.46 et a = 1.883;

- station de Hamala Grarem : I = 83.64 et a = 1.838.

- station de Constantine : I = 70.85 et a = 1.633.

B/ Calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) :

Si les précipitations du mois (P) sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle: $ETR = ETP$ et si les précipitations du mois (P) sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle $ETR = \sum Pi + RFU$; celle-ci est supposée mobilisée comme suit :

a) Si RFU antérieure est assez forte pour combler l'insuffisance de précipitation (P) ;
ETR = ETP.

b) Si RFU est insuffisante pour satisfaire l'évapotranspiration potentielle, l'ETR reste inférieure à celle-ci et est égale à la somme des précipitations du mois et des RFU.

1/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 2003-2007 : Station de Beni Haroun (Tableau.II.08) :

I = 86.46, a = 1.883 et RFU = 100 mm.

- **Estimation du ruissellement (R) :**

Selon Thornthwaite : $R = \frac{P^3}{3 \cdot [ETP]^2}$ avec : P = 612.75 mm et ETP = 920.50 mm

$$\Rightarrow R = \frac{(612.75)^3}{3 \cdot [920.50]^2} \Rightarrow R = 90.50 \text{ mm}$$

$$R (\%) = \frac{R(\text{mm}) \times 100}{P(\text{mm})} = \frac{90.50 \times 100}{612.75} \Rightarrow R = 14.77 \%$$

Donc le ruissellement représente 14.77% des précipitations.

- **Calcul de l'infiltration (I) :**

P = ETR + R + I + Wa (Considérons : Wa = 0):

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - ETR - R = Ex - R = 221.91 - 90.50 \Rightarrow I = 131.41 \text{ mm.}$$

$$I (\%) = \frac{I(\text{mm}) \times 100}{P(\text{mm})} = \frac{131.41 \times 100}{612.75} \Rightarrow I = 21.44 \%$$
 de précipitations.

2/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 1984–1997 : Station de Hamala Grarem ((Fig.II.10 et Tableau.II.09) :

I = 83.64, a = 1.838 et RFU = 100 mm.

- **Estimation du ruissellement (R) :**

P = 674.77 mm et ETP = 904.11mm $\Rightarrow R = 125.28 \text{ mm}$ selon la formule de Thornthwaite.

Soit : **R = 18.56 %** c-à-d le ruissellement représente 18.56 % des précipitations.

- **Calcul de l'infiltration (I) :**

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - ETR - R = Ex - R = 267.85 - 125.28 \Rightarrow I = 142.57 \text{ mm.}$$

$$I (\%) = \frac{I(\text{mm}) \times 100}{P(\text{mm})} = \frac{142.57 \times 100}{674.77} \Rightarrow I = 21.12\%$$

3/ Calcul du bilan hydrologique pour la période 1990–1999 : Station de Constantine (Tableau.V.10) :

I = 70.85, a = 1.633 et RFU = 32 mm.

- **Estimation du ruissellement (R) :**

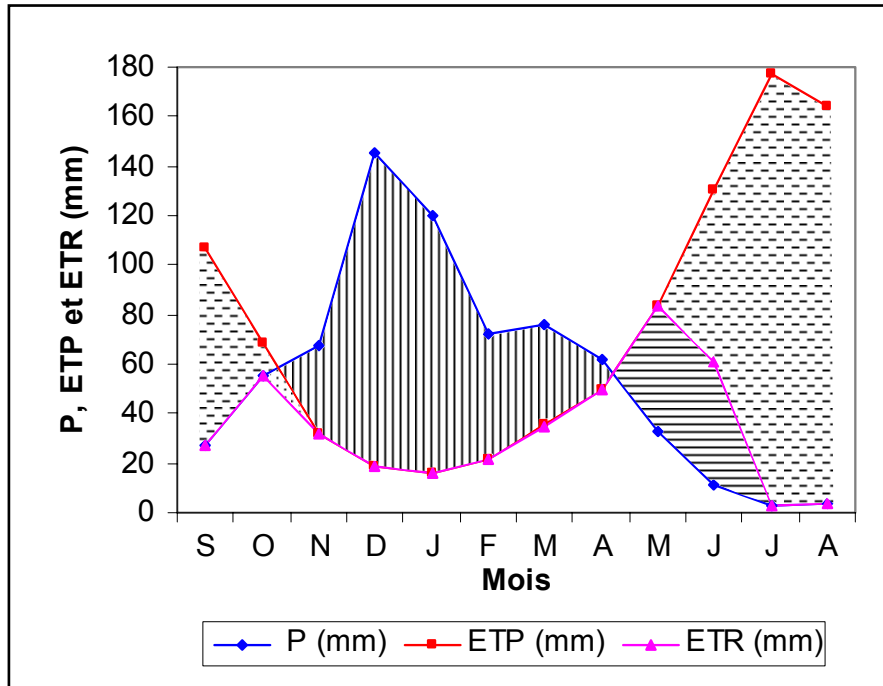
P = 516.20 mm et ETP = 833.02mm $\Rightarrow R = 66.07 \text{ mm}$ selon la formule de Thornthwaite.

Soit : **R = 12.79 %** c-à-d le ruissellement représente 12.79 % des précipitations.

• **Calcul de l'infiltration (I) :**

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - ETR - R = Ex - R = 186.50 - 66.07 \Rightarrow I = 120.43 \text{ mm.}$$

$$I(\%) = \frac{I(\text{mm}) \times 100}{P(\text{mm})} = \frac{120.43 \times 100}{516.20} \Rightarrow I = 23.33\%$$



- : Recharge en eau du sol.
- : Excédent d'eau.
- : Epuisement de réserve.
- : Déficit agricole.

Fig.II.10 : Représentation graphique du bilan hydrologique pour la période 1984 - 1997 (Station de Hamala Grarem).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
T (°C)	23.70	21.07	14.35	10.03	08.90	09.60	12.39	16.53	18.35	24.30	27.40	27.15	-
i	10.54	08.82	04.93	02.86	02.39	02.68	03.95	06.11	07.15	10.95	13.13	12.95	86.46
ETP (mm)	106.84	85.61	41.53	21.16	16.89	19.48	31.50	54.21	65.99	111.99	140.40	138.00	-
K	01.03	00.97	00.86	00.84	00.87	00.85	01.03	01.10	01.21	01.22	01.24	01.16	-
ETPC (mm)	110.04	83.04	35.71	17.77	14.69	16.55	32.44	59.63	79.84	136.62	174.09	160.08	920.5
P (mm)	28.22	31.35	76.40	159.87	80.02	71.42	45.83	65.16	37.86	14.66	00.46	01.50	612.75
P - ETPC (mm)	-81.82	-51.69	40.69	142.10	65.33	54.87	13.39	05.53	-41.98	-121.96	-173.63	-158.58	-
RFU (mm)	00.00	00.00	40.69	100	100	100	100	100	58.02	00.00	00.00	00.00	-
ETR (mm)	28.22	31.35	35.71	17.77	14.69	16.55	32.44	59.63	79.84	72.68	00.46	01.50	390.84
DA = ETPC - ETR	81.82	51.69	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	63.94	173.63	158.58	529.66
Ex = P - ETR	00.00	00.00	00.00	82.79	65.33	54.87	13.39	05.53	00.00	00.00	00.00	00.00	221.91

Tableau.II.08 : Bilan hydrologique - Station de Beni Haroun (Période : 2003 - 2007).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
T (°C)	23.12	18.75	13.26	10.14	09.01	10.71	12.73	14.71	18.47	23.48	27.57	27.40	-
i	10.15	07.39	04.37	02.91	02.43	03.16	04.11	05.12	07.23	10.39	13.25	13.13	83.64
ETP (mm)	103.68	70.55	37.32	22.79	18.34	25.20	34.62	45.16	68.62	106.60	143.20	141.67	817.75
K	01.03	00.97	00.86	00.84	00.87	00.85	01.03	01.10	01.21	01.22	01.24	01.16	-
ETPC (mm)	106.79	68.43	32.09	19.14	15.95	21.42	35.65	49.67	83.03	130.05	177.56	164.33	904.11
P (mm)	27.00	54.96	67.30	144.92	119.86	71.81	76.21	61.67	33.19	11.13	03.17	03.55	674.77
P - ETPC (mm)	-79.79	-13.47	35.21	125.78	103.91	50.39	40.56	12.00	-49.84	-118.92	-174.39	-160.78	-
RFU (mm)	00.00	00.00	35.21	100	100	100	100	100	50.16	00.00	00.00	00.00	-
ETR (mm)	27.00	54.96	32.09	19.14	15.95	21.42	35.65	49.67	83.03	61.29	03.17	03.55	406.92
DA = ETPC - ETR	79.79	13.47	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	68.76	174.39	160.78	497.19
Ex = P - ETR	00.00	00.00	00.00	60.99	103.91	50.39	40.56	12.00	00.00	00.00	00.00	00.00	267.85

Tableau.II.09 : Bilan hydrologique - Station de Hamala Grarem (Période : 1984 - 1997).

Mois	SEP	OCT	NOV	DEC	JAN	FEV	MAR	AVR	MAI	JUN	JUL	AOU	Total
T (°C)	21.90	16.70	11.40	07.80	06.60	07.70	09.90	12.10	17.70	22.4	24.80	25.90	-
i	09.35	06.20	03.48	01.96	01.52	01.92	02.81	03.81	06.77	09.68	11.29	12.06	70.85
ETP (mm)	101.03	64.89	34.78	18.71	14.25	18.32	27.63	38.34	71.36	104.82	123.78	132.87	-
K	01.03	00.97	00.86	00.84	00.87	00.85	01.03	01.10	01.21	01.22	01.24	01.16	-
ETPC (mm)	104.06	62.94	29.91	15.71	12.39	15.57	28.45	42.17	86.34	127.88	153.48	154.12	833.02
P (mm)	35.50	36.20	65.80	75.90	64.50	54.30	46.9	55.30	44.90	22.20	04.60	10.10	516.20
P - ETPC (mm)	-68.56	-26.74	35.89	60.19	52.11	38.73	18.45	13.13	-41.44	-05.68	-48.88	-44.02	-
RFU (mm)	00.00	00.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	32.00	00.00	00.00	00.00	00.00	-
ETR (mm)	35.50	36.20	29.91	15.71	12.39	15.57	28.45	42.17	76.90	22.20	04.60	10.10	329.70
DA = ETPC - ETR	68.56	26.74	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	00.00	09.44	105.68	148.88	144.02	503.24
Ex = P - ETR	00.00	00.00	03.89	60.19	52.11	38.73	18.45	13.13	00.00	00.00	00.00	00.00	186.50

Tableau.II.10 : Bilan hydrologique - Station de Constantine (Période : 1990 - 2000)

C/Interprétation du bilan hydrologique :

L'examen des données récapitulées dans les tableaux précédents et les résultats donnés par les graphes des bilans hydrologiques permet d'en déduire les résultats suivants :

- Les précipitations atteignent leur maximum au mois de Décembre (période durant laquelle l'évapotranspiration potentielle (ETP) atteint son minimum). Cette dernière atteint son maximum au cours de la période sèche plus précisément au mois de Juillet.
- L'allure de la courbe représentant l'ETP donne une meilleure symétrie que celle des précipitations. Ceci peut être expliqué par l'homogénéité de l'ETP durant l'année, qui est due au fait qu'elle est en fonction de la température suivant une loi normale, par contre les précipitations sont hasardeuses et irrégulières d'un mois à un autre ou d'une année à l'autre.
- L'excédent d'eau est enregistré du mois de Novembre au mois d'Avril. L'augmentation du volume d'eau durant cette période (saturation du sol) dont le pourcentage de l'infiltration au niveau du station de Hamala Grarem est de l'ordre de 21.12 %, rend l'instabilité du versant cernant la ville de Mila la plus grande.
- Le déficit agricole s'étend sur la période sèche de l'année où un épuisement des réserves est observé. Les réserves sont saturées et les demandes pour l'irrigation sont satisfaites.
- La recharge du sol en eau commence à partir de la mi-Octobre jusqu'à la mi-Novembre.

III.8/ Conclusion :

Les données hydroclimatiques de la station de Hamala Grarem laissent apparaître que la région de Mila est caractérisée par un climat tempéré, marqué par des précipitations importantes. Ces précipitations jouent un rôle primordial dans l'accélération des mouvements de terrains surtout que 21.12% des eaux de précipitations s'infiltreront dans le sous sol et atteignent les argiles marneuses à gypse et engendrent la diminution de leurs caractéristiques mécaniques (c et ϕ).

L'eau et le contraste thermique sont deux facteurs qui jouent un rôle important dans la désagrégation mécanique et chimique des roches de la région étudiée. Cette désagrégation modifie considérablement les caractéristiques mécaniques des roches. De plus, l'accumulation des eaux au niveau des surfaces de discontinuités (failles, zones de broyages, fissures, joints de stratification, diaclases...etc.) peut déclencher le ripage des bancs rocheux, ainsi que l'ouverture de discontinuités préexistantes.

L'infiltration est très importante, elle est de l'ordre de 142.57mm. Elle joue un rôle très important dans l'instabilité du site, car d'une part les eaux d'infiltration satureront rapidement les terrains de couverture argileuse et lubrifient la surface de contact entre les argiles quaternaires et les couches d'argiles et d'argiles marneuses sous jacentes plus imperméables, ce qui favorise l'apparition de surface de glissement, d'autre part, la circulation des eaux d'infiltration le long

des couloirs des accidents tectoniques fragilise les formations néogènes. En effet, la circulation des eaux le long des zones de faiblesse provoque la dissolution des roches solubles (carbonates, gypse et sel) et un intense soutirage de particules solides très fines (argiles), aboutissant à la désolidarisation des éléments détritiques dans le cas des formations conglomératiques et à la création des vides dans le cas des formations argilo-marneuses gypsifères, ce qui conduit à des effondrements et/ou affaissements en profondeur, accompagnés en surface par des déplacements en masse si la topographie est favorable.

A tout cela s'ajoute le rôle du ruissellement superficiel, surtout en cas de fortes crues ce qui attaque le pied des versants et par conséquent le déclenchement de leurs instabilité.

IV/ Conditions hydrogéologiques du site :

Les eaux souterraines jouent un rôle important dans pratiquement tous les processus géologiques, en particulier dans les glissements de terrain car elles participent à la diminution des caractéristiques mécaniques des sols et par conséquent au déclenchement de leur instabilité. En effet, l'étude hydrogéologique a pour but essentiel de localiser les zones aquifères et de connaître l'organisation des écoulements souterrains (circulation privilégiée des eaux).

La région de Mila ne possède pas d'aquifères importants et l'alimentation en eau a toujours posé des problèmes, malgré que diverses formations sont susceptibles de former des aquifères pour des nappes. La région d'étude manque de données hydrogéologiques, pour cela on va se baser sur les données lithologiques des formations formant le secteur d'étude.

Les formations lithologiques susceptibles de former des aquifères favorables sont représentées essentiellement par :

- Les formations quaternaires : les alluvions quaternaires surtout de Oued Rhumel et Oued El Kotton peuvent renfermer une nappe superficielle intéressante et utile aux cultures.
- Les grès sableux interstratifiés à divers niveaux dans la puissante série argilo-marneuse à gypse du Mio-Pliocène et les lentilles de sables constituent un bon aquifère.
- Les calcaires lacustres caractérisés par une capacité de stockage d'eau importante variée selon leur état de fracturation et de karstification.
- Les zones de broyage des grands accidents tectonique constituent généralement des zones favorables pour l'infiltration, la circulation et l'emmagasinement des eaux. En effet, ces zones constituant de bons aquifères montrent souvent des résurgences de sources.

Il est nécessaire de signaler que les travaux effectués sur : la RN 27 et 79, le barrage de Beni Haroun et le viaduc sur Oued Dib ont montré l'apparition brusque de sources d'eau.

En effet, l'existence possible de ces nappes participe à l'accentuation des phénomènes de mouvements de terrains, notamment les glissements de terrains dans la région de Mila.

V/ Conclusion :

Les conditions hydrologiques et hydrogéologiques du site étudié jouent un rôle très important dans le déclenchement des mouvements de terrain. Cette influence est liée principalement aux aspects suivants :

➤ La quantité importante des eaux d'infiltration au niveau du site étudié constitue le facteur principal de l'apparition des problèmes d'instabilité. Ces eaux d'infiltration saturant le terrain de couverture argileuse et lubrifient la surface de contact entre cette couverture et les formations sous jacentes, ce qui conduit au déclenchement des mouvements superficiels. Ces derniers se manifestent par d'importantes coulées boueuses et glissements superficiels. Par ailleurs, ces infiltrations participent à l'apparition brusque de glissements profonds affectant les formations néogènes le long des couloirs des accidents tectoniques.

➤ La dégradation progressive, du pied du versant de la ville de Mila, par la nappe superficielle de l'oued Rhumel engendrant la suppression de la butée de pied de ce versant et pouvait entraîner le déclenchement de glissements en amont.

➤ Les circulations des eaux souterraines le long des couloirs des grands accidents peuvent engendrer des phénomènes de dissolution des formations solubles (carbonates et gypse) et un soutirage des fines (argiles), ce qui entraînerait la fragilisation progressive des formations et la dégradation de leurs caractéristiques mécaniques.

L'impact du facteur hydrogéologique sur les mouvements de terrain dans la région de Mila est considérable et doit donc faire l'objet d'une attention particulière.

Chapitre III :
Cadre géomorphologique

I/ Introduction

L'étude géomorphologique et les cartes géomorphologiques sont utiles pour expliquer l'évolution récente du paysage : formation des vallées, des terrasses, configuration des pentes et processus en action dans le paysage à l'époque actuelle. Il s'agit d'un élément essentiel dans la cartographie géotechnique et qui est souvent un facteur décisif dans les études précédant des recherches géotechniques. Il est aussi un facteur primordial pour l'estimation du degré de l'aléa naturel lié aux mouvements de terrains.

La caractérisation géomorphologique d'un bassin aide beaucoup dans la compréhension de l'évolution du relief et ses mécanismes.

Lorsqu'on établit des cartes géotechniques, l'évaluation des conditions géomorphologiques ne saurait être une simple description de la topographie de la surface. On doit expliquer les relations entre les conditions de surface et le cadre géologique, l'origine et l'évolution de chaque élément géomorphologique, l'influence des conditions géomorphologiques sur l'hydrologie et les processus géodynamiques externes (érosion, mouvement de pentes, activité sismique...) (G. Olivier et J-P. Renet, 1976).

On va s'intéresser dans ce chapitre de présenter, d'une manière générale, les principales entités géomorphologiques de la région d'étude -commune de Mila- et essayer d'établir les cartes de facteurs déclencheurs des instabilités à savoir la carte des pentes, la carte lithologique, la carte du réseau hydrographique et la carte des indices d'instabilité.

II/ Présentation géomorphologique générale de la commune de Mila

Le cadre exact de notre étude est celui de la commune de Mila, chef-lieu de wilaya, situé au Nord-Est de l'Algérie et couvre environ 130.60 Km². Le paysage de Mila est très nettement marqué et en dépendance directe de la constitution géologique du pays. Il constitue un vaste cadre montagneux cernant la dépression de Ferdjioua-Redjas-Mila.

La commune de Mila est inscrite dans le couloir dit « intramontagnard » et s'intègre au bassin du même nom. Elle se trouve en contact avec deux grands ensembles morpho-structuraux nettement opposés : au Nord la chaîne numidique qui forme une imposante barrière montagneuse face aux influences maritimes et au Sud les hautes plaines du Constantinois marquées par une rupture beaucoup moins nette. Le relief est beaucoup plus accidenté et se présente sous forme de basses collines d'une altitude moyenne de 500m, entaillées par un réseau d'Oueds assez dense (A. Mebarki, 1984).

Les facteurs météoriques (torrentialité des précipitations surtout) et les fortes pentes donnent lieu à un milieu instable caractérisé par des processus morphodynamiques divers et très actifs. Les conséquences sont perceptibles sur le plan pédologique à travers des sols

lacérés par les ravins et emportés par les coulées boueuses et les glissements. La faible perméabilité des terrains et la forte discontinuité spatiale du couvert végétal limitent les possibilités en eaux souterraines et favorisent, au contraire, le ruissellement ; ce dernier a pour corollaire un réseau d'Oueds soumis directement aux variations climatiques et dont les principaux collecteurs sont l'Oued El Kotton et l'Oued Mila débouchant sur l'Oued Rhumel à l'aval. Les cours d'eaux sont généralement de moyenne densité de charriage vu leur disposition géographique et l'intensité pluviométrique (A. Mebarki, 1984).

II.1/ Paysage naturel et cultures:

L'aspect général de la région de Mila est typiquement montagneux cernant une dépression accidentée : paysage de collines moyennement à fortement vallonné, grandes étendues avec relief apparent de teinte général rougeâtre, sans arbre ou peu boisé. Consacré aux céréales, le pays n'est au Printemps qu'un immense tapis vert moulant le relief ondulé ou mamelonné, à l'Automne après les labours, il n'y a plus qu'une seule couleur : le brun rougeâtre des argiles et marnes du Mio-Pliocène. A l'horizon les reliefs s'élèvent doucement vers le Nord, brutalement au midi où s'individualisent au-dessous de la dépression les massifs calcaires crétacés (*In PDAU de Mila, 2007*).

II.2/ Orographie :

La région de Mila se particularise par un aspect orographique important. En effet, elle est marquée par un relief très accidenté, montrant des contrastes topographiques remarquables, avec notamment des massifs culminants à des hauteurs très élevées et de profonds ravins et talwegs. Mila se situe sur un versant qui s'étend de Oued Rhumel au Nord d'une altitude atteignant les 200m et la ligne de crête du Marchau au Sud dont le point le plus culminant est de 1075m d'altitude. La pente de ce versant est de 7%, sans oublier les affleurements locaux dans la région comme celui de Djebel Akhal avec une altitude de 1256m, Sidi Boukhsar (483m), El Kherba (880m) et enfin Ain Nachma avec une altitude de 645m. Par ailleurs, elle montre des pentes variant entre 35 à 60 % (Au niveau des corniches calcaires et versants argilo-marneux). La catégorie du relief de la région varie de 2 à 3 (A. Mebarki, 1984).

II.3/ Relief :

La commune de Mila appartient à l'immense bassin de Mila-Redjas-Ferdjioua. Elle singularise par l'occupation d'un site qui est une synthèse des principaux reliefs (plaines, colline, piémonts et espace montagneux). Cette synthèse naturelle pourrait être à la base de la formation d'une entité spatiale homogène. Les différents éléments topographiques s'établissent dans les proportions suivantes (*In PDAU de Mila, 2007*) :

Plaines et vallées 55%, collines et piémonts 30%, montagnes 15%.

II.4/ Ensembles physiques:

La commune de Mila chevauche sur quatre ensembles physiques bien séparés :

Zone montagneuse : Les massifs montagneux sont organisés à partir de deux lignes principales de relief : Au Nord, l'horizon est fermé par la ligne de crête qui va des hauteurs de Zeghaïa au massif de djebel Boucherif – Ouakissène. Au Sud le Dj Belaid empêche l'accès au Bassin de Mila-Constantine et ne s'abaisse vers le Nord qu'à la localité de Mila et le djebel Akhal, qui est un massif rocheux tronqué au Nord par une faille, auquel s'adosse à l'Ouest un plateau pliocène.

Zone des piémonts : Sa localisation se fait à la base des corniches calcaires du djebel Belaid et se prolonge jusqu'au chemin vicinal reliant les localités d'Ouled Bouhamma et Bouhallof, ce versant constitué d'éboulis à blocs et d'argiles grises, offre un relief moins mouvementé, favorable en certains endroits, le long du chemin vicinal, pour l'urbanisation.

Zone des collines : Elle couvre pratiquement 85% du territoire de Mila. Le centre de la région est du domaine de la dépression Mila-Redjas-Ferdjioua, qui est une région accidentée de collines mamelonnées aux arbres rares. Comme tout relief de collines, il est conditionné tout d'abord par la nature géologique de son dépôt. Les formations étant toutes meubles (argiles et marnes à intercalation de gypse), ces étendues caractérisent une morphologie très différente : chevelu hydrographique serré, versants de pente moyenne à forte affectés par la solifluxion, à l'exception de l'ancienne ville de Mila qui est construite sur des terrains plus ou moins stables à pente moyenne à faible. La naissance de ces mouvements, qui se poursuivent de nos jours, paraît liée aux caractéristiques géotechniques de ces sols. Outre l'aspect chaotique des pentes, la permanence de cette évolution apparaît très rapidement sur le terrain : érosion, ravinement et surcreusement intense au niveau des talwegs, cicatrices de glissement, sols dépourvus de végétation. Ces phénomènes sont confirmés dans de sites semblables par de grands glissements affectant des constructions au cours de ces dernières années. Nombreuses routes traversent des versants argilo- marneux instables et fluants. Leur entretien est difficile, il en est de même pour les pistes, impraticables dès que les précipitations deviennent abondantes. Ce sont des zones à pente moyenne à forte, caractérisées par des sols très délicats favorisant une implantation humaine autour du chef lieu de Wilaya de Mila (*In PDAU de Mila, 2007*). Cet ensemble à vocation céréalière aussi, nécessite une grande protection contre l'érosion au niveau des talwegs par une campagne de reboisement très poussé et à long terme.

Zone des vallées : La plus importante vallée est celle d'Oued El Kotton bordant la commune de Mila à l'Est, elle débute d'Ain Tinn et se prolonge vers le Nord. Les vallées des Oueds Mila, Boukansir et Mekraoued n'offrent aucun intérêt, autre que le drainage des eaux de

surface. Le réseau hydrographique est organisé autour de la commune de direction Nord-Sud constitué de vallées légèrement encaissées dans les argiles.

II.5/ Hydrographie:

Les éléments fondamentaux de l'hydrologie locale sont les Oueds El Kotton, Mekraoued, Boukansir et Mila qui drainent tout le territoire de la commune, ils ne contiennent pratiquement pas d'eau pendant l'été et ne présentent donc aucune utilité pour l'économie locale, par contre du fait de leur fort débit lors de la période des pluies et de leur érosion active, ils représentent un danger pour la stabilité des sols et les constructions éventuelles, implantées dans leur voisinage. Les eaux drainées vont arriver à l'Oued Rhumel qui à son tour rejoint plus au Nord l'Oued El Kebir.

III/ Etablissement des cartes de facteurs :

La reconnaissance de terrain et l'utilisation des cartes topographiques et photo- aériennes a comporté le recensement méticuleux :

- Des indices qui mettent en évidence une instabilité déclarée,
- Des indices qui permettent de supposer une instabilité potentielle,
- Des facteurs défavorables à la stabilité (pentes, eau, lithologie, structure...).

Pour ce faire, nous avons dressé des cartes d'observation de terrain à savoir ; la carte lithologique, la carte des indices et des zones d'instabilité sur laquelle figure le réseau hydrographique et les linéaments, et la carte des pentes. Ces cartes, présentées à une échelle au 1/50000^e et au 1/20000^e, vont nous permettre, ultérieurement, de définir les limites des zones exposées à des risques de mouvements de terrains déclarés ou potentiels.

III.1/ Etude des photographies aériennes :

Si l'étude d'un secteur géographique par photographies aériennes ne peut en aucune façon suffire à l'établissement d'une carte d'instabilité, elle reste néanmoins le point de départ indispensable à toute étude de terrain, et le complément nécessaire à la synthèse des observations ponctuelles recueillies. L'observation stéréoscopique attentive permet souvent de déceler des indices d'instabilité pas toujours évidents au niveau d'un lever de terrain. En outre l'étude des photographies aériennes est une pratique importante pour définir l'extension d'un phénomène et préciser son évolution (si l'on possède plusieurs missions de prise de vue étagées dans le temps) (G. Olivier et J-P. Renet, 1976).

Dans notre secteur d'étude, nous avons établi une carte des formes d'érosion, de mouvements de terrain et de fracturation de la commune de Mila (Fig.III.1) à partir des photo-aériennes à l'échelle 1/20000^e, mission 1979 et 1996 (boîte de Constantine et de Ferdjioua).

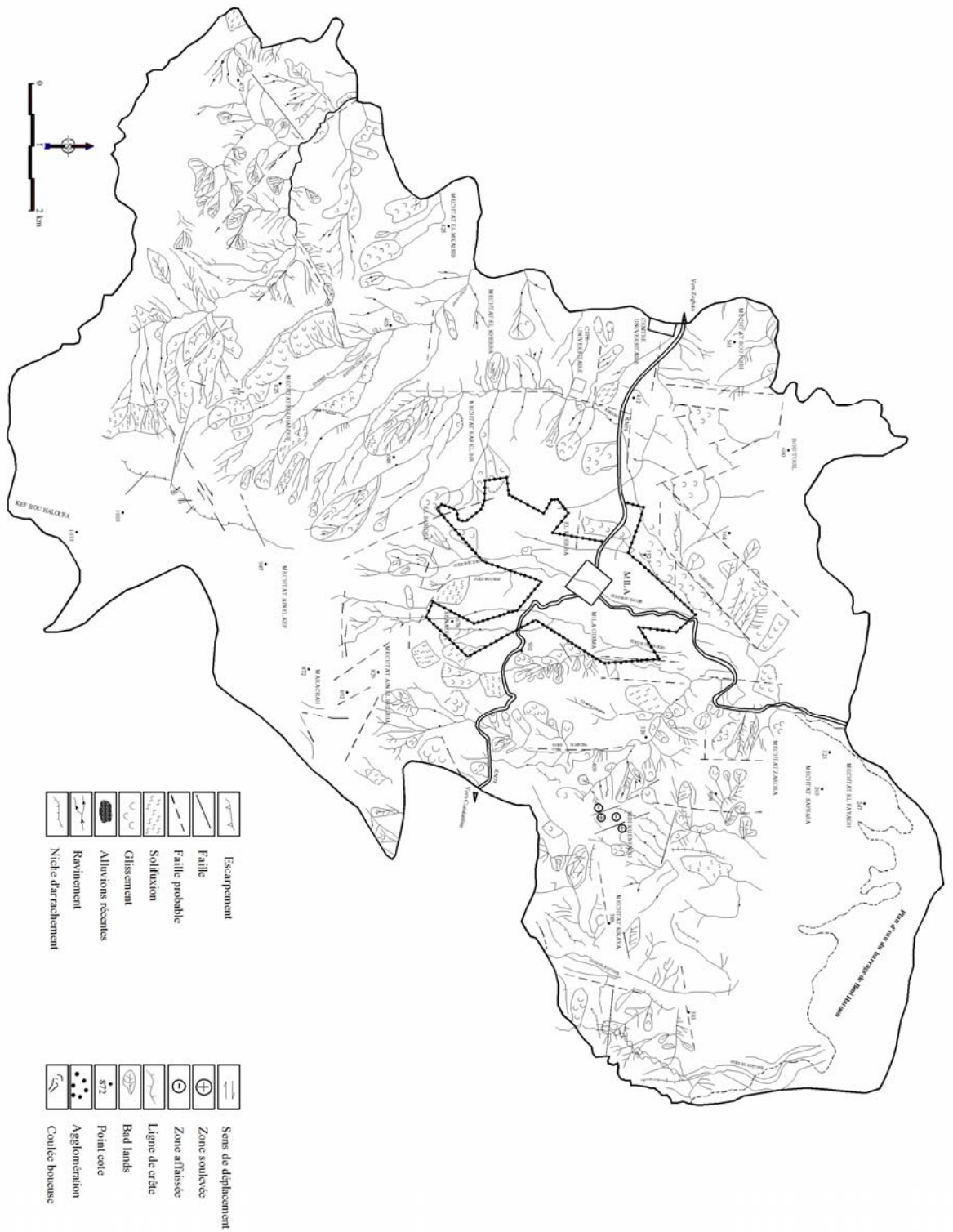


Fig. III.1 : Carte des formes d'érosion et de fracturation.

III.2/ Commentaire de la carte des formes d'érosion et de fracturation :

La majorité des mouvements de terrain se trouvent dans l'environ immédiat des cours d'eau, des talwegs ou sur les versants (Fig.III.1). Les facteurs essentiels générateurs de ces mouvements de terrain seraient de trois (3) ordres : l'hydrographie, dont le réseau hydrographique suit parfois des linéaments tectoniques ou fractures, la lithologie et la pente.

Les différents mouvements de terrain, à savoir : solifluxion, coulées de boue, glissement et éboulement affectent la quasi-totalité des terrains de la région. La gravité de ces phénomènes se manifeste par des déformations qui génèrent parfois des catastrophes naturelles inattendues. Les mouvements de terrain ainsi cartographiés indiquent des directions dans la plupart des cas, très préférentielles. Dans ces cas, ils suivent les directions SW-NE, SE-NW et E-W. La région est affectée par un réseau de faille réparti comme suit :

- Côté Sud-Ouest de la commune : affecté par des failles de direction NW-SE conjuguées avec la NE-SW et une seule faille S-N qui se trouve à la limite de Oued Bou Hallouf.

- Secteur Nord : prédominance des directions N-S et un petit faisceau sensiblement N160° (NW-SE) au Sud de Boutouil et à l'Est de Machtet Boufouh.

- Côté N-E et les environs de Sidi Krenounou : on trouve quelques segments de failles de direction E-W.

- La ville est traversée par un faisceau N-S, cette direction circonscrit un réseau hydrographique orienté dans la même direction qui n'est la conséquence que d'un grand linéament N-S traversant la région. Le réseau hydrographique est orienté N140° qui est une direction tectoniquement active avec la N-S.

Les accidents tectoniques N-S sont associés par des zones de broyage qui ont deux composantes une verticale et l'autre horizontale génératrice des instabilités (effondrements, glissements...).

Les mouvements de versants les plus répandus concernent les terrains argileux, ils s'expriment sous forme de glissements de terrain, coulées boueuses et solifluxion, les surfaces mobilisées peuvent être considérables. Les parties les plus vulnérables à ces mouvements recouvrent pratiquement toute la région. Toutefois, les parties Sud-Ouest et Nord-Est sont les plus exposées compte tenu de la géomorphologie des terrains qui semble d'ailleurs prévaloir en amont de la région. Il existe un autre type de mouvement moins répandu qui se produit dans les formations rocheuses, il s'agit des éboulements rocheux au Sud-Est de la carte.

Les directions préférentielles des différents mouvements répertoriés dans la région suivent naturellement les directions topographiques et dépendent principalement du caractère morphologique et du réseau hydrographique et qui définissent, en effet, l'ampleur des

mouvements de terrain rencontrés sur place et les délimitent aussi dans le temps et dans l'espace. Les principaux cours d'eau qui traversent la commune de Mila sont, du Sud au Nord : Oued El Hammam, Bouhalouf, Oued Mila, Oued El Mkhauad et Oued El Kotton. Oued El Kherba (qui devient Oued Mila au Nord) est contrôlé ou conditionné par la tectonique, il commence avec une direction majeure NW-SE, puis devient N-S, ensuite E-W et devient NE-SW jusqu'à la confluence avec Oued Rhumel.

Le franchissement de la région de Mila par ces cours d'eau a davantage accentué l'action érosive des eaux superficielles. Ainsi les écoulements superficiels sont caractérisés par la présence d'une ramification très dense de talwegs drainant les eaux de surface et couvrant les pentes naturelles, une partie des eaux s'infiltré dans le sol et conduit à son humidification. Des indices témoignent de la présence d'eau souterraine : sources d'eau résurgentes, marres d'eau.... La présence de formations argileuses affectées par le phénomène de retrait survenu au cours de la période chaude favorise donc les infiltrations d'eau dans de le terrain à travers les fentes de retrait. Ces formations sont généralement vulnérables vis-à-vis de l'altération dont l'influence est liée directement à la modification des caractéristiques physico-mécaniques des sols. Les niveaux aquifères sont rencontrés dans les formations perméables. Par contre les niveaux argileux constituent des écrans imperméables.

Les quelques replats existants retiennent les eaux en stagnation, on les retrouve essentiellement aux confins de la ville de Mila. Le barrage de Beni Haroun est le bassin de rétention et de convergence de toutes les eaux de ruissellement de la région.

De plus, on ajoute le problème de surcreusement des lits des cours d'eau dû à la régression de la stabilité des berges. Ce surcreusement est nettement remarquable en amont des versants naturels. La régression de la stabilité de ces versants perturbe parfois l'écoulement des eaux de surface. Ainsi l'absence d'une végétation adéquate contribue à l'évolution des différents mouvements de terrain.

Plusieurs zones de bad-lands ont été repérées, elles affectent les fortes pentes dépourvues de végétations. Ce phénomène progresse d'une façon très spectaculaire, il évolue d'ailleurs dans les parties les plus hautes de la région de Mila.

N.B : La définition des différents termes de mouvements de terrain sera donnée en détail dans le prochain chapitre (chapitre IV).

III.3/ Carte du réseau hydrographique (Fig.III.2):

Cette carte a été établie à partir de la carte topographique de Mila-Est et Mila-Ouest éditée en 2006. Le réseau hydrographique est très dense, ceci a une relation étroite avec la nature lithologique des terrains (argile et marne à gypse facilement érodable) et la pente. Le régime

hydraulique de la région est alimenté par une forte pluviométrie dont le ruissellement ravine intensément les versants et les côtes abruptes. De nombreuses sources ressurgissent aux pieds des versants où les cultures maraîchères se sont bien développées. Les écoulements de surface ont un caractère endoréique, les eaux convergent ainsi vers de nombreuses dépressions.

De nombreux cours d'eau sillonnent la région de Mila, ils confluent vers trois principaux Oueds : Oued El Kotton drainant l'extrême partie Nord-Est, Oued El Kherba qui devient Oued Mila drainant l'Ouest et le Nord-Ouest de la commune, et Oued El Mekhaouad qui draine la partie centrale (Fig.III.2).

La direction du réseau hydrographique reste marquée par la configuration topographique, la tectonique semble avoir été déterminante dans le tracé des Oueds, cette direction dans le Constantinois serait associée à une épisode compressive Nord-Sud à N180° (P.E. Coiffait, 1992).

Le réseau hydrographique est de type arborescent (au côté Sud-Ouest) et apparemment bien hiérarchisé (au centre de la commune). Dans la partie Sud-Ouest de la carte, la majorité des cours d'eau sont orientés NW-SE avec une direction conjuguée orientée NE-SW, ces directions coïncident généralement avec des failles. Les affluents convergent autour des collecteurs principaux tels que Oued El Kherba, Oued Ayout et Oued El Hammam. Aux environs de la ville de Mila, de l'amont à l'aval, le chevelu hydrographique est orienté S-N. Les directions majeures des cours d'eau au côté Nord de la carte sont NE-SW. Cette aire est très ravinée et limitée dans sa partie Nord par le barrage de Béni Haroune dont les berges sont soumises à une action érosive intense (érosion régressive). Ces affouillements sont a posteriori très progressifs générant ainsi une déstabilisation des versants déjà à l'état d'un équilibre précaire. Le réseau hydrographique est ramifié à des exécutoires principaux, le tout conflue vers le barrage de Beni Haroune.

L'Oued M'aircha draine le flanc Nord du massif de Marachau, de direction N-S et possède divers affluents. Oued El Mekhaouad et Oued Boukanzir draine la partie centrale de la commune et la ville de Mila, ils prennent naissance dans le Sud où Oued Boujenne et Oued Bouhad se convergent. Oued Ayout et Oued El Kherba apparaissent comme un drain à réseau penné. Il forme un petit bassin en gouttière allongée et alimenté par de petits affluents.

Les écoulements qui partent vers l'extérieur de la commune s'écoulent de Oued El Hammem et Oued Bou Hallouf vers Oued Rdjas.

En général, le drainage dominant est de type dendritique car guidé par de nombreuses failles en échelon, ceci favorise un écoulement rapide, une concentration des eaux, une érosion intense et un sapement important dans les zones concaves des méandres.

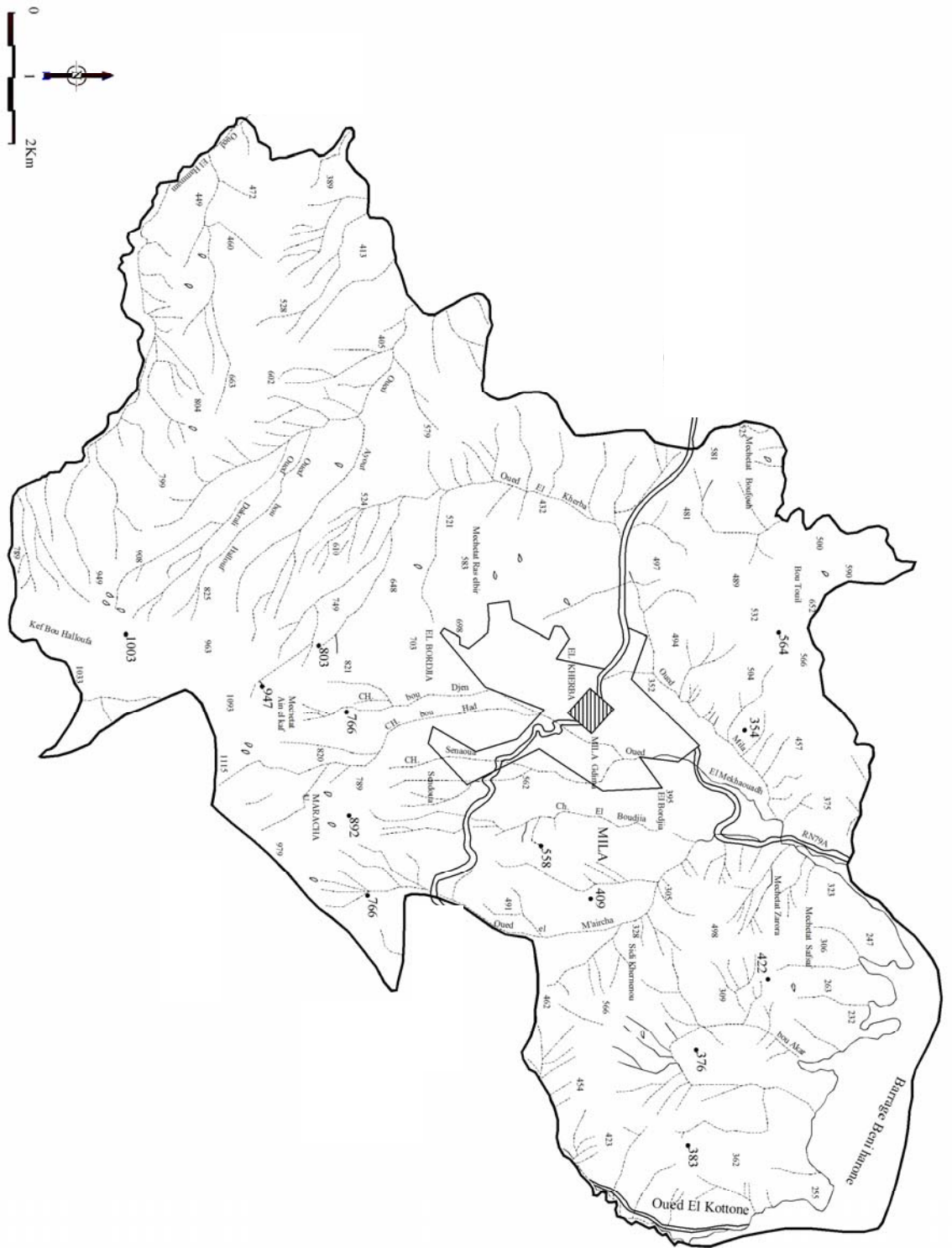


Fig.III.2 : Carte du réseau hydrographique de la commune de Mila.

III.4/ Carte des pentes (Fig. III.3):

La pente est l'un des facteurs essentiels de l'instabilité des terrains, car elle accélère le mouvement des eaux et le charriage des matériaux.

La carte des pentes de la commune de Mila a été établie à partir de la carte topographique au 1/50000^e de Mila (on dispose pas de carte topographique au 1/25000^e ou de plan topographique de la commune de Mila).

Le site de Mila est fortement accidenté ; les plus fortes pentes dominent la zone avec des directions favorables aux mouvements de terres. Ainsi la quasi-majorité des côtes ont une direction Sud-Nord. Le pourcentage le plus élevé est prépondérant dans la partie Est et Nord - Est, il s'agit des pentes de plus de vingt cinq pourcent (25%). Les faibles pentes sont effectivement très rares. Les versants à pentes très prononcées contournent d'ailleurs la ville de Mila; un léger replat se localise à la sortie de la ville en allant vers Jijel. Les versants culminant entre 500 et 1100m sont la plupart du temps exposés aux mouvements de terrain.

Nous avons choisis les catégories 0-3%, 3-12.5%, 12.5-25% et +25% qui sont des pentes couramment utilisées dans les études des mouvements de terrain. Notons que plus de 60% de l'ensemble des terrains a une pente entre 3-25% et 35% au moins supérieure à 25%.

III.5/ Carte lithologique de la commune de Mila (Fig.III.4) :

Plusieurs paramètres géologiques interviennent dans le déclenchement des mouvements de masses tel que : lithologie tendre, pendage défavorable des couches, activité tectonique...etc. Les formations meubles sont largement répandues dans de la commune de Mila et constituées essentiellement par des dépôts argileux, des cônes de déjection et des éboulis, des alluvions et des marnes. Les couches des argiles et de marnes ont un faible pendage. Les argiles gypseuses couvrent une grande partie du territoire de la commune de Mila et ont parfois des épaisseurs sérieuses, tandis que les calcaires lacustres plus ou moins durs ont une petite extension.

III.6/ Carte du couvert végétal :

Le couvert végétal dans la commune de Mila est peu important et saisonnier, il se résume principalement aux cultures céréalières et aux herbes sauvages. Ce faible couvert végétal favorise considérablement l'érosion de sol.

D'après la carte pédologique de la Wilaya de Mila, établie par le bureau d'études BNEDER en 1997, la seule couverture végétale formée de forêt, dans la commune de Mila, se situe à l'extrême Nord-Est.

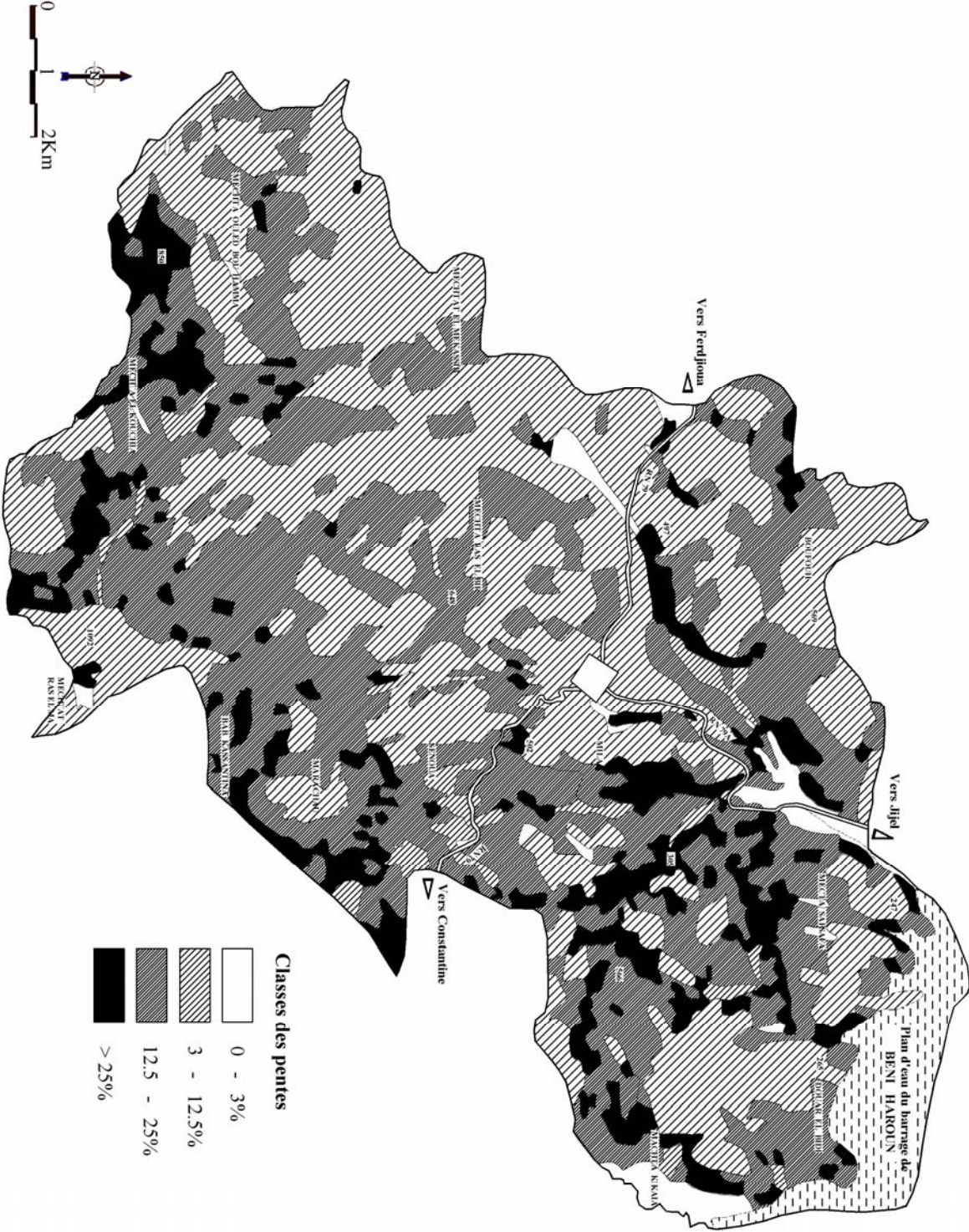


Fig.III.3 : Carte de pente de la commune de Mila.

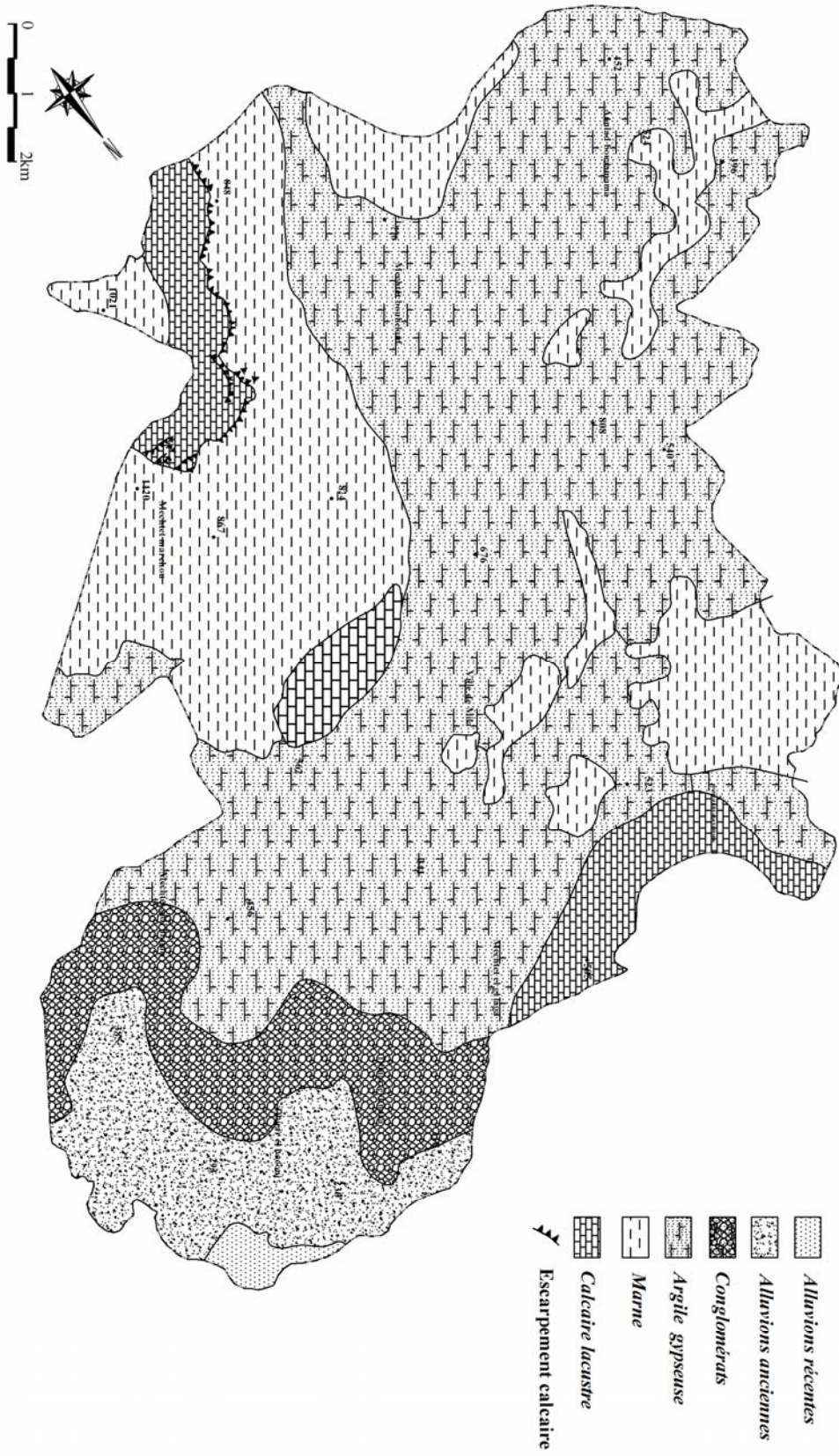


Fig.III.4 : Carte lithologique de la commune de Mila.

IV/ Conclusion :

Le secteur d'étude offre l'avantage de présenter une grande variété d'instabilité. Cette diversité est liée à la complexité lithologique et structurale ainsi qu'à l'importance des dénivellations faisant intervenir des pentes et des conditions climatiques différentes.

L'examen des pentes naturelles montre qu'elles sont généralement inférieures à 2/3. Le point culminant est à 1120 m et la dénivelée maximale est de 890 m, les écarts climatiques sont assez marqués dans cette région. Les formations meubles ont une grande extension par rapport à celles rocheuses. Du fait de l'altitude et de la pédologie, la végétation arbustive est peu développée, ce qui facilite grandement l'action des phénomènes d'érosion. Les Oueds s'écoulent du Sud vers le Nord et reçoivent des torrents affluant des versants exposés à l'Est et à l'Ouest.

D'une manière générale les grands terrassements qui accompagnent la construction des routes ainsi que des réalisations des projets communaux, exécutés surtout dans les régions collinaires, ne font qu'accroître les surfaces de glissements des versants dépourvus de végétation. Ces interventions humaines sont à considérer comme une attaque contre l'équilibre des versants naturels d'autant que des précautions dans ces cas, n'ont pas été prises en compte. A ce stade de l'analyse des côtes des versants, le niveau de vulnérabilité de la région vis-à-vis des phénomènes de l'érosion et d'altérabilité est à appréhender.

Chapitre IV:
Mouvements de terrain et
formes érosives

I/ Introduction

Depuis plusieurs décennies les scientifiques ont tenté, par divers moyens, de comprendre les mécanismes et les processus qui génèrent les mouvements de terrain. Ces processus initialement naturels sont devenus au fil du dernier siècle de plus en plus liés aux activités anthropiques.

Les problèmes de stabilité de terrains et des versants se rencontrent fréquemment dans la construction des bâtiments, de routes, des canaux et des digues de barrages. Certaines pentes naturelles peuvent devenir instables aux simples perturbations et engendrent des problèmes d'instabilité qui peuvent être catastrophiques et provoquent des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts matériels considérables.

L'analyse géologique du secteur d'étude a permis différencier les formations du substratum et les formations superficielles meubles (du Mio-Plio-Quaternaire) discordantes. Ces dernières recouvrent une partie importante des versants exposés aux processus d'érosion se manifestant sous forme de mouvements de terrains.

III/ Définition et classification des mouvements de terrain

L'étude des mouvements de terrain sous-entend la prévention de ces derniers (J.L. Favre et *al*, 1992; F. Robin, 1993; F. Mayoraz et *al*, 1997; S. Reizig, 1998), ainsi que l'analyse des causes et facteurs qui conditionnent les mouvements.

On retrouve sous le terme de mouvements de terrain toute manifestation de déplacement d'une masse géologique sous l'effet de la pesanteur et de l'action conjuguée de facteurs permanents et de facteurs déclenchants (J.P. Mougin, 1973; A.M. Maltrait, 1975; Q. Zaruba et V. Mencl, 1982; CH. Bonnard, 1984; C. Azimi et P. Desvarreux, 1986, 1996; E.N. Bromhead, 1992; J.E. Slosson, 1992; P. Antoine et A. Giraud, 1993; R.K. Bhandari et K. Jeyatharan, 1994), ces facteurs peuvent rompre l'équilibre naturel et amorcer un processus de rupture de masse sur un site auparavant stable.

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris : ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau ou par les travaux de l'homme. Leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique mais leur prévision reste un domaine de recherche.

Les classifications des mouvements de terrain qui sont à la base de l'analyse des instabilités sont définies par des critères de reconnaissance basés sur la morphologie, la dynamique et la cinématique des mouvements (M.T. Lebourg, 2000).

II.1/ Les critères de reconnaissance :

Parmi les critères classiques de reconnaissance, on trouve :

- **Les propriétés physiques et mécaniques** des matériaux instables : elles sont reconnues et quantifiées sur le terrain ou en laboratoire (poids volumique (γ), porosité (n), indice des vides

(e), teneur en eau (w), la résistance au cisaillement, ...).

- **L'état de la pente et la morphologie** du versant : la pente d'un versant joue un rôle important dans la stabilité et, suivant la nature des terrains, elle ne doit pas dépasser un seuil limite. Par exemple, la pente d'un versant de matériau pulvérulent (sans cohésion) est théoriquement stable, si l'angle de la pente ne dépasse pas l'angle de frottement interne (ou angle de talus naturel). La morphologie d'un versant est modelée, par les actions météorologiques et les mécanismes de l'altération superficielle.

- **Les surfaces de ruptures et les discontinuités** : la localisation ou la définition des surfaces de glissements peut se faire par deux approches :

- soit la surface de rupture délimite la partie du terrain qui a subi un déplacement non nul de la partie de terrain qui n'a subi aucun déplacement. On rencontre ce type de rupture dans les terrains meubles (argiles glaciaires, lacustres ou d'altération, marnes argileuses, matériaux relativement cohérents),

- soit la surface de rupture est une zone d'épaisseur variable où l'on distingue une masse de terrain ayant subi de petits aux importants déplacements. Cette zone sépare la masse de terrain qui n'a subi aucun déplacement de celle qui s'est déplacée. Cette zone enregistre, lors du mouvement, un très fort remaniement, on parle parfois de zones broyées (caractérisées dans la géologie par des formations mylonitiques dans les roches indurées). La définition de la surface de rupture constitue dans la reconnaissance des mouvements de terrain, un point important. A. Millies-Lacroix (1981) a proposé, dans sa classification des talus et versants instables, un classement en fonction des types de discontinuités, de la nature du matériau et du glissement. La classification de Millies-Lacroix (Tableau IV.1) n'est qu'un exemple dans la multitude des classifications proposées depuis Collin en 1846, qui fait intervenir l'ensemble des critères géologiques, géomorphologiques, dynamiques, cinématiques...etc. On retrouve les classifications de P. Desvarreux (1970), J.P. Mougin (1973), G. Colas et G. Pilot (1976), D.J. Varnes (1978), ... jusqu'aux plus récentes avec F. Léone (1996) et S. Gominet, 2005.

Trois grandes familles de mouvements de terrain se rencontrent généralement dans la nature :

- Les affaissements et effondrements ;
- Les éboulements et chutes de pierres ;
- Les glissements de terrains.

II.2/ Morphologie et dynamique des mouvements de terrain :

II.2.1/ Les affaissements et les effondrements sont des mouvements gravitaires à composante essentiellement verticale qui résultent de l'évolution de cavités souterraines (Fig.IV.1). Ils se manifestent par un fléchissement lent et progressif des terrains de couverture dans le cas des

affaissements et par une rupture brutale du toit d'une cavité dans le cas des effondrements. Ces cavités peuvent être d'origine naturelle ou artificielle (S. Gominet, 2005).

Type de discontinuité	Surface de séparation	Surface visible après le mouvement	Nature du matériau	Dynamique
Rupture franche et irrégulière, car fonction des défauts de la roche	Rupture, cassure ou décrochement	Totalement à partiellement visible	Roche (consolidée)	Chute
Cisaillement avec surface plus ou moins lisse.	Surface plane, circulaire ou courbe	Partiellement visible en amont	Sol ou roche Sol (peu remanié)	Glissement
Surface ou zone irrégulière et rugueuse avec friction et arrachage du substratum	Surface de frottement ou de charriage	En partie à totalement cachée	Sol ou sol et roche (remaniés)	Coulée
Zone de friction	Déformation ou rupture progressive	Totalement cachée	Sol	Fluage lent

Tableau IV.1 : Les surfaces de séparation avec le substratum en place (A. Millies- Lacroix, 1981).

Les **affaissements** se caractérisent par une dépression topographique sans rupture apparente. On rencontre les affaissements dans les régions minières où il y a rupture en profondeur des galeries de mines.

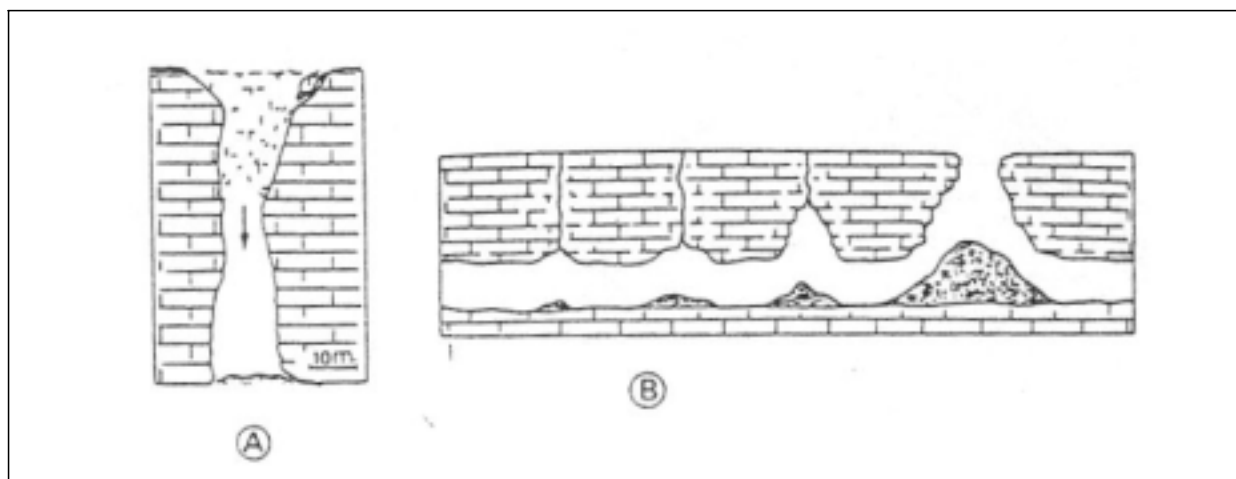


Figure IV.1 : Effondrement de voûtes karstiques (G. C. Flageollet, 1989).

Légende : A) aven formé par effondrement du toit d'un puits, B) formation progressive d'une cloche d'effondrement.

Les **effondrements** de terrain provoquent une dépression topographique importante avec rupture apparente. Les effondrements se rencontrent dans les régions calcaires, là où il y a des cavités karstiques, mais aussi au-dessus des vides artificiels (carrières, mines souterraines).

Les affaissements de grandes extensions se produisent généralement au-dessus des zones d'exploitation profondes tandis que les effondrements naissent plutôt au-dessus des zones d'exploitation à faible profondeur.

Pour lutter contre ces phénomènes, il est nécessaire de s'assurer que les terrains envisagés à supporter des constructions ne sont pas situés au-dessus des cavités, ou bien eux même ne sont pas exposés aux phénomènes ayant tendance à créer des vides (phénomènes de karstification, lessivage...etc) (G. Filliat, 1981; J.C. Flageollet, 1989).

II.2.2/ Eboulements et chutes de pierres, écroulements, basculements :

L'évolution naturelle des falaises et des versants rocheux engendre des chutes de pierres et de blocs ou des éboulements en masse, ils se manifestent par des ruptures rapides et brutales affectant les sites en falaises sous l'action de la pesanteur, ils résultent du développement de fissures préexistantes dans la roche (G. Filliat, 1981 ; J.C. Flageollet, 1989).

Les **chutes** de blocs sont des mouvements ponctuels en milieu rocheux fracturé et fissuré. On considère que les dislocations des massifs sont généralement dues à la présence de discontinuités, dont la persistance et l'évolution sont fonction de l'altération des formations, de la cryofracturation, de l'action sismique... Quand les blocs se détachent des parois, ils peuvent parcourir des distances très grandes. On rencontre, en zone de montagne, de très nombreuses chutes de blocs et les traces laissées par ces derniers sont bien visibles dans le paysage, avec une élimination quasiment complète de la végétation arborée le long du trajet du dit bloc et des empreintes profondes laissées dans le sol.

Les **écroulements** sont des chutes soudaines de masses rocheuses importantes. L'écroulement type est représenté par l'effondrement de pans de falaise en plusieurs blocs (Fig.IV.2). Les terrains les plus propices à ces manifestations sont les formations massives, fracturées, pouvant former de hautes falaises (calcaires, roches cristallines et cristallophylliennes) (A. Benaissa, 2003). Les masses mises en jeu sont très variables, cela va de quelques mètres cubes pour les petits écroulements à plusieurs centaines de millions de mètres cubes. Le traitement des écroulements relève de la mécanique des roches.

II.2.3/ Les glissements de terrain :

Il s'agit d'un déplacement lent d'une masse de terrain (masse cohérente généralement argileuse) le long d'une surface de rupture courbe ou plane avec une vitesse variable de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour. Il est ainsi possible de classer les glissements de terrain en fonction de leur vitesse de déplacement en deux grands ensembles :

Les glissements **lents** entraînent une déformation progressive de terrains, parfois accompagnée de rupture mais en principe d'aucune accélération brutale. Ces mouvements ne sont pas toujours perceptibles par l'homme, il s'agit de phénomènes de solifluxion (Creep). Dans

ce cas il n'y a pas de plan de rupture.

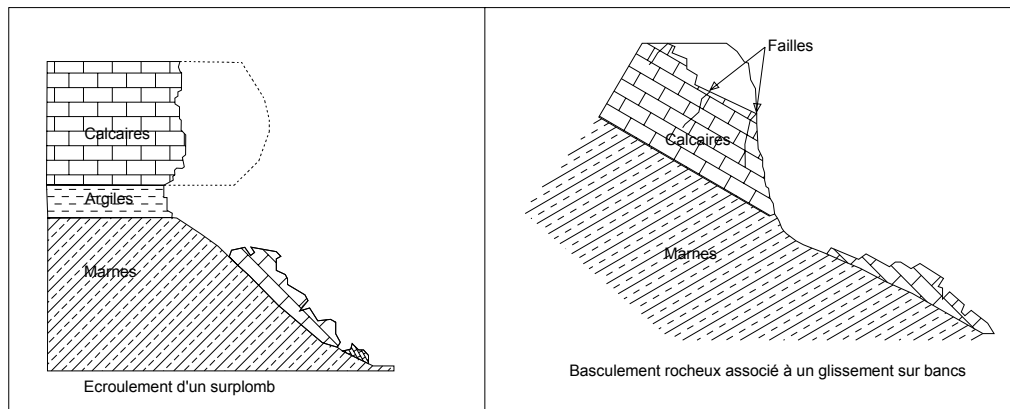


Figure IV.2 : Exemples d'écroulement rocheux (G. Colas et G. Pilot, 1976).

➤ Les glissements **rapides** se propagent de manière brutale et soudaine, avec un plan de rupture bien défini. Il s'agit de glissements de terrain au sens propre et coulées boueuses.

L'extension des glissements de terrain est variable, allant du simple glissement de talus très localisé au mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant.

Les profondeurs des surfaces de glissement varient de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de profondeur. On parle de glissements superficiels dont les signes visibles en surface sont souvent spectaculaires (fissures dans les murs des habitations, bourrelets dans les champs, poteaux ou arbres penchés...) et de glissements profonds qui présentent moins d'indices observables (S. Gominet, 2005).

Le bloc diagramme de la figure VI.3 illustre les principales caractéristiques d'un glissement profond. En effet le diagramme montre une surface de rupture très nette le long de laquelle les matériaux impliqués dans le glissement de terrain se déplacent au-dessus de matériaux que le phénomène n'affecte pas. La surface de rupture s'étend sur une profondeur considérable de sorte qu'un glissement de terrain ne saurait être considéré comme un phénomène superficiel (W.J. Eden, 1973).

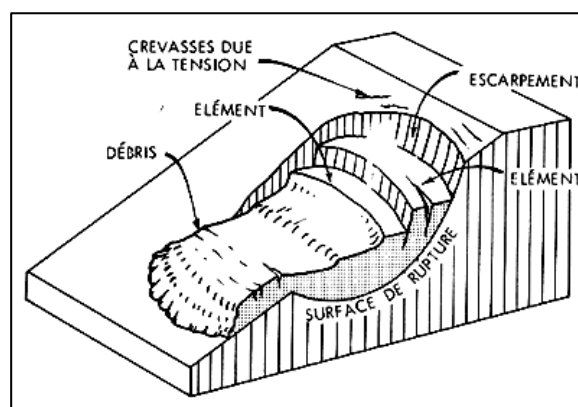


Figure IV.3 : Bloc diagramme d'un glissement profond.

De point de vue rhéologique, G. Filliat en 1981 a classé les glissements de terrain en deux grandes familles : les glissements proprement dits, et les glissements par fluage et coulées boueuses.

II.2.3.1/ Les glissements proprement dits :

Ils correspondent à une déformation élastoplastique caractérisée par l'apparition d'une surface de cisaillement relativement bien déterminée, le phénomène peut alors être étudié par un calcul de stabilité (méthode d'équilibre limite).

La littérature dans un souci d'homogénéisation, mais aussi de modélisation et de simplification, propose de distinguer deux formes caractéristiques de glissements de terrain : les glissements de type circulaire et translationnel (G. Colas et G. Pilot, 1976; J.C. Flageollet, 1989) (Fig.IV.4). La forme "parfaite" de ces deux cas n'est que rarement observable et la forme d'un glissement de terrain est assimilée à une combinaison des deux formes et voir même de formes plus complexes. On parle généralement de forme quelconque.

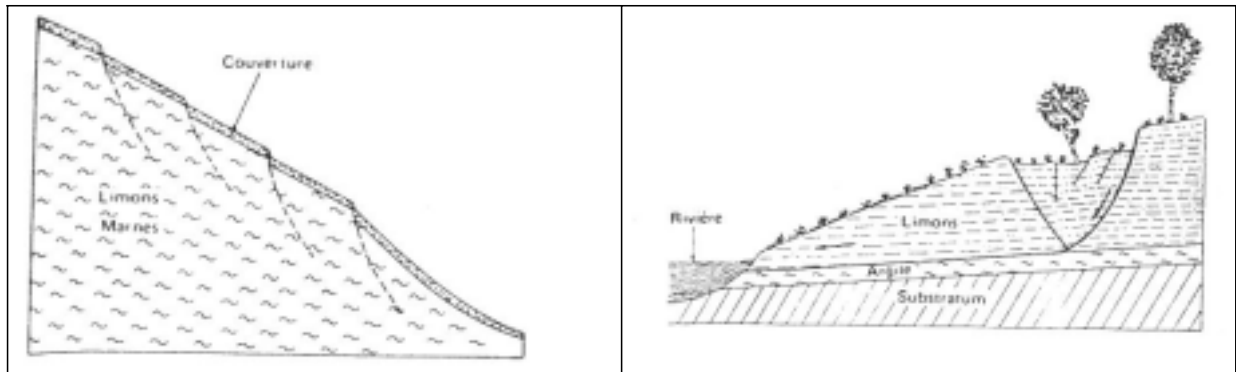


Figure IV.4 : Types des glissements proprement dits (Colas et Pilot, 1976).

Les glissements circulaires : C'est le type de glissement le plus fréquent, il se développe en principe dans un milieu homogène et isotrope. Les glissements circulaires ou rotationnels se produisent plus généralement dans les sols et parfois les roches homogènes où il n'y a pas de discontinuités géologiques suffisamment persistantes ou si la fracturation est suffisamment intense pour permettre une telle surface de glissement. En général les sols affectés par ce type de mouvement sont les sols fins (argileux) (G. Filliat, 1981). La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à une portion de cylindre. Pour les calculs de stabilité, on assimile la surface du glissement circulaire à un arc de cercle et le mouvement s'apparente à une rotation de la masse autour du centre du cercle. L'analyse de l'équilibre par le calcul est alors abordable par des méthodes classiques tel que : Bishop, Fellenius, Janbu et Goldstein (G. Philipponnat, 1987).

Les glissements circulaires sont caractérisés par : (Fig.IV.5)

- Des fissures de traction, en tête.

- Un escarpement correspondant à l'amont de la surface de glissement.
- Un bourrelet formé par des matériaux glissés, à la base.

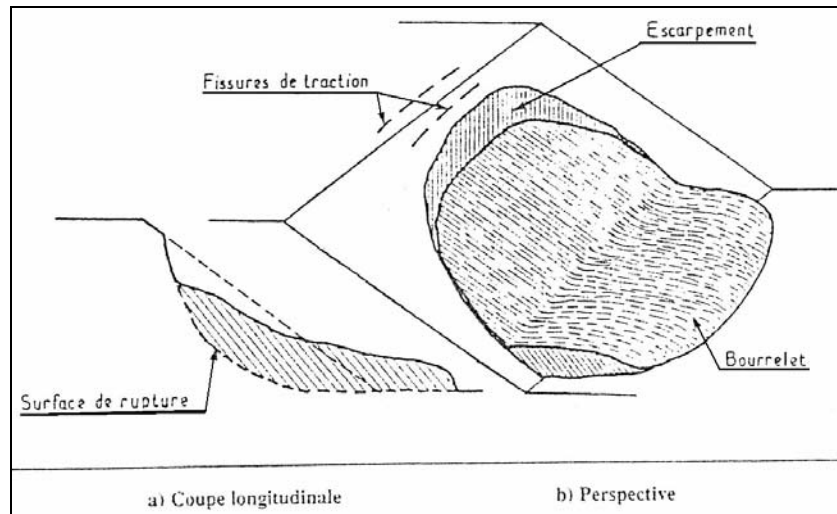


Figure IV.5 : Eléments descriptifs d'un glissement rotationnel (G. Philipponnat, 1987).

Un glissement rotationnel peut se développer par reprise de la rotation et par apparition de surfaces de ruptures nouvelles plus profondes. Ces surfaces sont plus ou moins emboîtées avec la première. Il arrive aussi que les glissements circulaires soient complexes, ceci est du à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, donnant par conséquent la naissance à un glissement en amont. Quant à la surcharge en aval, elle peut favoriser le déclenchement d'un troisième glissement : l'ensemble forme des **glissements en chaîne**.

Les **glissements plans** ou **translationnels** : C'est un mouvement de translation sur un plan incliné qui s'établit le plus souvent sur une discontinuité à pendage dirigé vers l'aval : joints de stratification, surface de contact entre un terrain de couverture et un substratum en place, plan de schistosité...etc. En général, la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques sur laquelle s'exerce souvent la pression de l'eau (Fig.IV.6). Une telle couche est appelée "couche savon" (G. Filliat, 1981, G. Philipponnat, 1987).

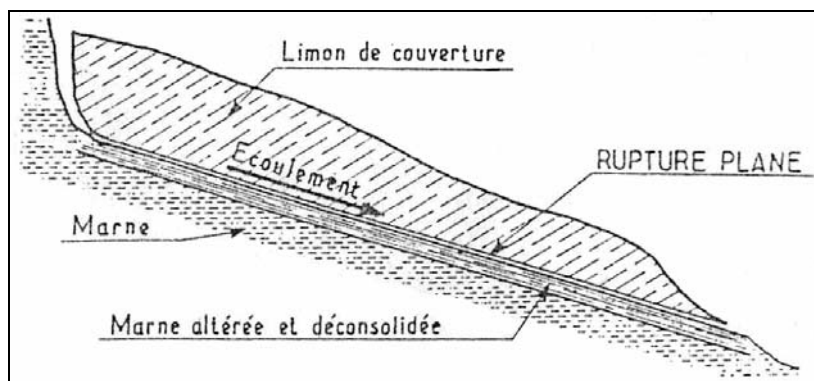


Figure IV.6 : Schéma descriptif d'un glissement plan (G. Philipponnat, 1987).

Les glissements plans peuvent être parfois assimilés à des écroulements, car ils font intervenir des masses rocheuses qui glissent sur leurs joints de stratification en provoquant, de par leur soudaineté, une impression d'écroulement. Les discontinuités qui favorisent le glissement le long d'un versant sont inclinées dans le sens de la pente et constituent des surfaces de glissements potentiels (Fig.IV.7).

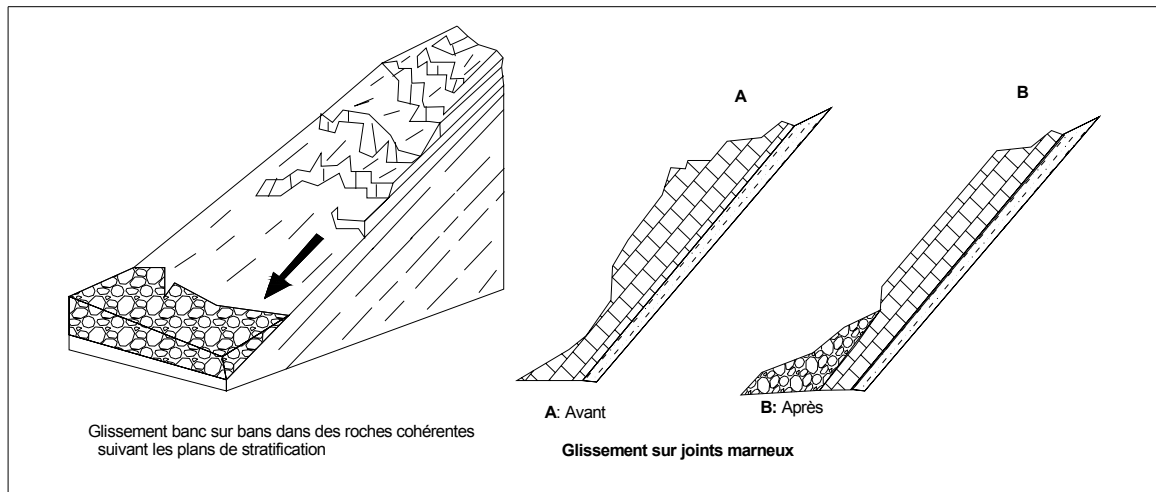


Figure IV.7 : Ripage d'une masse rocheuse (L. Trévisant, 1971).

Les indices morphologiques annonciateurs de la présence d'une instabilité sont la dysharmonie des courbes de niveaux, la présence de bourrelets et versants mamelonnés, des fissurations de bâtiments, le dérangement dans les clôtures, le désalignement des plantations, les fissures de tractions à l'arrière du glissement et les arbres basculés.

De nombreux auteurs considèrent les arbres poussant de travers comme étant des signes caractéristiques de mouvement important, alors qu'ils ne sont que le témoignage d'un mouvement épidermique du sol (J.P. Barlow, 2000). Sur le terrain, et particulièrement en secteur montagneux, il est très fréquent de voir des arbres dont la base du tronc à une direction de croissance perpendiculaire à la pente, avec un changement de direction vers la verticale. Cette forme prise par l'arbre est le fruit de nombreuses années d'évolutions où l'on retrouve des phénomènes de **reptation superficielle** du sol.

Les **glissements quelconques** sont sans aucun doute les glissements les plus fréquents et qui ont des caractéristiques semblables aux autres glissements précédemment définis.

Dans la nature les terrains ne sont ni homogènes ni isotropes. En effet, ils existent beaucoup de glissements dont la surface de rupture est moins géométrique et même tout à fait quelconque. Cette forme de rupture a posé des difficultés pour le calcul manuel qui impose l'hypothèse de rupture de géométrie simple. Actuellement, le développement de logiciels tel que : Geo-Slope, Nixes et Trolls, Plaxis...etc. permet de cerner cette difficulté.

II.2.3.2/ Glissements par fluage et coulées boueuses :

Ils se caractérisent par une déformation de type viscoplastique ou fluide.

II.2.3.2.1/ Glissement par fluage :

Le fluage est un mouvement de terrain très sournois. Il se fait très lentement, sans surface de rupture nette (sauf au stade ultime, à la rupture de sol), il est dû à des sollicitations mécaniques et hydrauliques atteignant le domaine plastique donc proche de la rupture.

La figure IV.8 montre une couche de marne fluant sous le poids excessif du massif calcaire limité par une falaise, les sollicitations (σ_v) vont entraîner la fissuration du banc de calcaire et l'écrasement de la falaise par la suite.

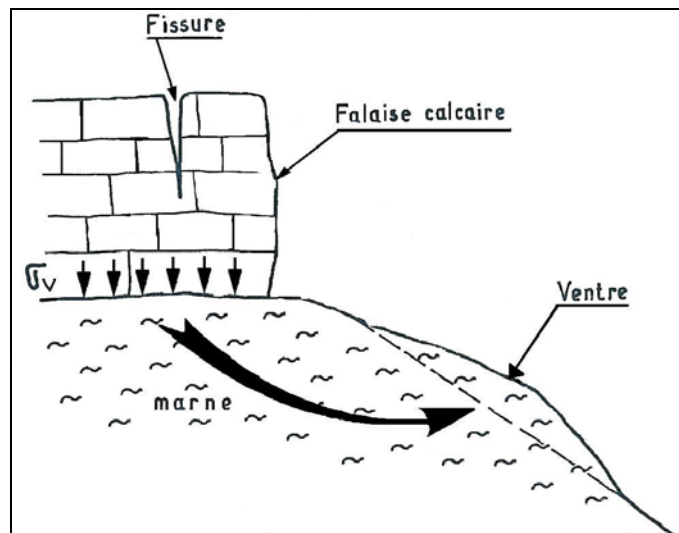


Figure IV.8 : Exemple d'un fluage (G. Philipponnat, 1987).

Un cas particulier de fluage est la **solifluxion**, il s'agit d'un phénomène superficiel provoqué par les variations volumiques du sol au cours des saisons (gel et dégel, alternance de saisons sèches et pluvieuses), cette variation entraîne la fracturation du milieu et un accroissement de sa teneur en eau, conduisant en fin à une reptation du sol vers l'aval (G. Philipponnat, 1987). Le mouvement de solifluxion génère d'amples ondulations sous la pression de la masse qui se trouve en haut du versant. Les surfaces de ces mouvements sont légèrement déformées et présentent une série de bombements plus ou moins évasés. La micro-topographie développée fait apparaître une succession de petits bourrelets et de légères creux. Donc la solifluxion se manifeste par une topographie moutonnée et boursouflée, phénomène remarquable sur l'ensemble des versants telliens (F. Rullan-Perchirin, 1985; A. Marre, 1987; H. Amireche, 2001).

II.2.3.2.2/ Les coulées boueuses :

Il s'agit d'écoulement visqueux ou fluide des matériaux meubles (argiles, limons à blocs, terrain d'altération...) gorgés d'eau, ces mouvements se produisent essentiellement en montagnes comme ils puissent se présenter même sur des pentes très faibles, leurs vitesses d'avancement sont liées au degré de saturation en eau du sol et plus généralement aux pressions interstitielles, les masses en mouvement peuvent atteindre plusieurs millions de mètre cubes (G. Filliat, 1981 ; G. Philipponnat, 1987 et A. Benaïssa, 2003).

Les coulées sont caractérisées par une disparition des structures du sol ou de la roche, par une vitesse de déplacement plus grande et par une consistance plus ou moins visqueuse des matériaux transportés. La matrice est le plus souvent argileuse (coulées de boue) et les blocs sont d'origine quelconque. On dit parfois que les coulées sont des **mouvements complexes**.

La morphologie d'une coulée boueuse s'apparente à celle d'un torrent : la zone d'arrachement à une forme d'amphithéâtre (les coulées débutent généralement par une niche) terminé en entonnoir sur un chenal d'écoulement obstrué par des matériaux grossiers emballés dans une matrice limono-argileuse. A l'aval, la coulée se termine sous la forme d'un vaste cône chaotique, la masse du matériel affecté est beaucoup plus grande et forme une langue dont la largeur atteint souvent plusieurs centaines de mètres et dont la longueur peut être de l'ordre du kilomètre. La langue est bosselée présentant un profil transversal convexe (Fig.IV.9).

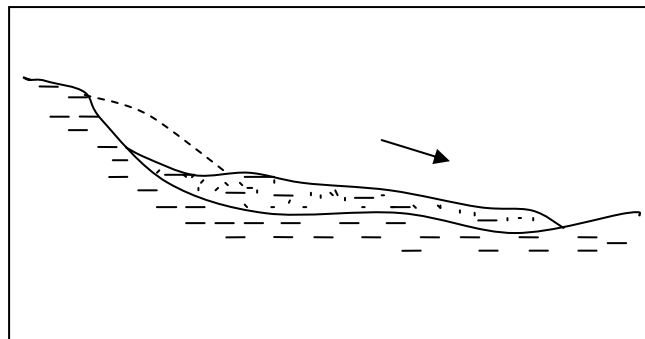


Figure IV.9 : Schéma illustratif d'une coulée boueuse (A. Benaïssa, 2003).

III/ les facteurs intervenant dans les processus d'instabilité

A chaque fois que l'on étudie un mouvement de terrain, se pose toujours la question de savoir pourquoi il y a-t-il eu rupture de l'équilibre ? La rupture de l'équilibre d'un massif sous-entend la modification d'au moins un des paramètres participant à la stabilité. L'équilibre d'un massif peut être donné par un facteur de sécurité pris comme étant le rapport entre la somme des forces stabilisatrices et déstabilisatrices. Celles-ci sont guidées par les forces de volume, les propriétés rhéologiques, la géométrie ainsi que l'action de l'eau, de la pesanteur, de la sismicité et l'action anthropique. La qualification et la quantification de ces paramètres permettent de mieux comprendre et d'appréhender les instabilités. Parmi ces paramètres, on

constate que le principal facteur générateur de glissement de terrain est l'eau (J.L Durville, 1992 ; J.L. Durville et G. Lacube, 1992, M.T. Lebourg, 2000).

III.1/ Action et influence de l'eau :

Il apparaît que l'eau souterraine, et surtout ses fluctuations dues aux conditions météorologiques, sont une des principales causes de déclenchement ou d'accélération des mouvements de versants notamment les glissements de terrain.

Sur les pentes, l'action déstabilisatrice de l'eau libre ou infiltrée dans le sol est multiple (C. Chapeau et J.L. Durville, 2005) :

- Accroissement du poids volumique des sols par augmentation de la teneur en eau et par conséquent diminution du coefficient de sécurité.

- Changement de comportement rhéologique : le sol passe de l'état solide à l'état de fluide visqueux (si on rapproche de la limite de liquidité); certaines coulées de boue sont ainsi engendrées par l'imbibition d'une masse de sol.

- Réduire la consistance des sols; un accroissement de la teneur en eau d'une argile mène à son ramollissement continu, autrement dit à un accroissement progressif de sa déformabilité sous une charge donnée.

- L'eau conduit aussi à un ramollissement chimique, elle modifie la structure de certaines argiles par floculation ou défloculation des colloïdes. Elle favorise l'échange des cations qui sont associés dans les complexes d'absorption de l'argile, le passage, par exemple, d'une Montmorillonite Na à une Montmorillonite Ca s'accompagne d'un accroissement de consistance du milieu, l'échange inverse mène à une réduction (H. Amireche, 2001). Ce phénomène est fréquent dans la région de Mila.

- A long terme, les circulations d'eau souterraine peuvent engendrer une altération progressive des terrains encaissants, avec dégradation de leurs caractéristiques mécaniques (C et ϕ) et réduction de la résistance au cisaillement.

- Action mécanique défavorable des pressions d'eau souterraine par déjaugage des grains solides du sol conduisant à leur déplacement. On dira que l'eau joue un rôle moteur sur un versant, également un soutirage des particules fines au pied des versants ce qui conduit à un ameublissement de ces derniers.

III.2/ La nature géologique des terrains :

De manière générale, les glissements de terrain se déclenchent sur des terrains dits « vulnérables » c'est-à-dire les terrains à granulométrie fine tels que les silts, les limons et surtout les argiles constituées par de la Montmorillonite. Ils peuvent apparaître aussi dans les terrains grenus, suffisamment chargés en argile, pour qu'elle impose son comportement.

Le comportement mécanique des sols grenus tient au pourcentage des vides laissé entre les grains de sables, plus il est grand, plus la circulation de l'eau libre est facile. Ainsi les propriétés mécaniques de ce type de sol dépendent avant tout de l'état des grains (lâches ou serrés c'est-à-dire la compacité). Ce type de structure peut aisément s'effondrer sous l'effet d'une action extérieure. En effet, les caractéristiques mécaniques d'un matériau, sa perméabilité, son état d'altération sont autant de paramètres conditionnant la pente limite d'équilibre et en l'occurrence du mouvement (M.T. Lebourg, 2000).

III.3/ Action de la pesanteur :

La géomorphologie du site est un élément moteur du glissement, il est classiquement admis qu'un massif horizontal n'a aucune tendance à glisser, mais que le même massif incliné d'un certain angle peut devenir instable (dans ce cas le massif peut être un sol pulvérulent ou un rocher fracturé avec une cohésion nulle sur le plan des fissures).

Le massif est caractérisé par deux angles : φ ; angle de frottement interne et θ ; angle du talus. Il est généralement admis que l'équilibre du talus dépend de l'intersection de ces deux angles (G. Philipponnat, 1987), en effet :

Si : $\varphi > \theta$ le massif est en équilibre.

$\varphi < \theta$ le massif est instable.

L'importance de la pente de terrain va permettre le développement de certains types de glissement. Une pente faible sera suffisante pour le déclenchement des phénomènes de **solifluxion** ou de **fluage**. L'action de la pesanteur, en tant que facteur de mouvement, est intimement liée à l'action anthropique, car le plus souvent l'homme change les conditions du milieu vers et parfois au-delà de la limite de rupture, soit par surcharge, soit par suppression de la butée en pied (L. Besson, 1996).

III.4/ Actions anthropiques :

Certains aménagements de terrain provoquent des déséquilibres qui, généralement à l'échelle humaine, passent inaperçus, mais lorsqu'une situation est à l'état d'équilibre précaire, la moindre intervention peut générer des désordres importants (G. Pilot, 1982). L'activité humaine peut conduire aux cas suivants :

- La construction d'ouvrages sur les versants provoque de fréquents glissements avec surcharge et génération de fortes pressions interstitielles ou bien une diminution de la perméabilité des sols sous-jacents avec une perturbation de l'écoulement de la nappe et augmentation des pressions interstitielles.

- Le terrassement ou la création d'un talus routier peut entraîner la suppression de la butée au pied de versant et activer le glissement.

III.5/ Actions séismiques :

La stabilité d'un massif est fonction du rapport des forces stabilisantes sur les forces déstabilisantes. Lors d'un séisme, il y a émission d'ondes sismiques (ou ondes élastiques) qui se propagent dans le sol. On distingue deux types d'ondes : les ondes de volume (ondes longitudinales et ondes transversales) et les ondes de surface (ondes de Love et ondes de Rayleigh). Généralement, les séismes engendrent des ondes de surface caractérisées, lors de leur passage, par un mouvement horizontal de va-et-vient. Ces ondes sont dispersives, c'est-à-dire que leur célérité est fonction de leur fréquence. Les ondes de Rayleigh agitent le sol selon une trajectoire elliptique. Ces ondes ont une amplitude qui décroît exponentiellement avec la profondeur (J.L. Durville et G. Sève, 1996).

Les ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire qui s'ajoute dans le bilan des forces d'un massif. Ce nouvel état pose un problème dynamique complexe, qui est représenté par une accélération. Cette accélération intervient dans le bilan d'équilibre et fonctionne comme une force déstabilisatrice. Cette déstabilisation peut se manifester immédiatement et peut provoquer des glissements de terrain, des coulées, des chutes de blocs et des dérangements engendrés par la thixotropie des sables. A plus long terme, si le phénomène se manifeste régulièrement, il peut y avoir modification de la résistance (fatigue du matériau) et rupture (passage pour le matériau de sa résistance de pic à sa résistance résiduelle).

IV/ analyse des mouvements de terrain dans le secteur d'étude :

La région d'étude, commune de Mila, offre une diversité de forme d'érosion allant du simple décollement, aux griffures, en passant par les glissements de terrain, les coulées boueuses, aux ravinements et aux bad-lands. La dynamique de ses milieux réside particulièrement dans leur constitution physique : une dominance de terrains meubles imperméables, surmontés parfois par des bastions calcaires. Celle-ci accentue actuellement l'instabilité des versants et leur donne souvent des formes montueuses. A ces facteurs viennent s'y ajouter d'autres aussi bien naturels qu'anthropiques. Tout ceci combine finalement pour généraliser et activer d'une manière spectaculaire les mécanismes érosifs. La dynamique de ces versants a permis de dégager quatre grandes familles (voir Fig.III.1 du chapitre III) :

IV.1/ Les boursouffures de solifluxion : Elles sont fréquentes dans les zones à roches plastiques (argiles et marnes (sableuses) qui ont tendance à se gonfler et ne cessent de se déformer). Elles sont responsables des ondulations et bossellements marquant les versants. Les eaux de ruissellement s'infiltrent dans les formations superficielles et mettent en charge les formations ramollies plus perméables en provoquant ainsi toute une série de loupe de solifluxion et de niches d'arrachement. Les arrachements se localisent le long des principaux Oueds et sont le résultat des sapements latéraux, ceux-ci provoquent des appels au vide se traduisant par des

foûrages groupés en paquets dans la majorité des versants (fac-similé IV.1).

Ces mouvements, de taille pluri-métrique, se présentent en déchirures semi-circulaires souvent parallèles. Le rejet de l'escarpement est de l'ordre de quelques centimètres, accompagné de migration de matériel vers l'aval des versants. Dans certains cas, et en période pluvieuse, les couches superficielles minces franchissent leur seuil de plasticité voire même de liquidité et donnent de petites coulées boueuses.

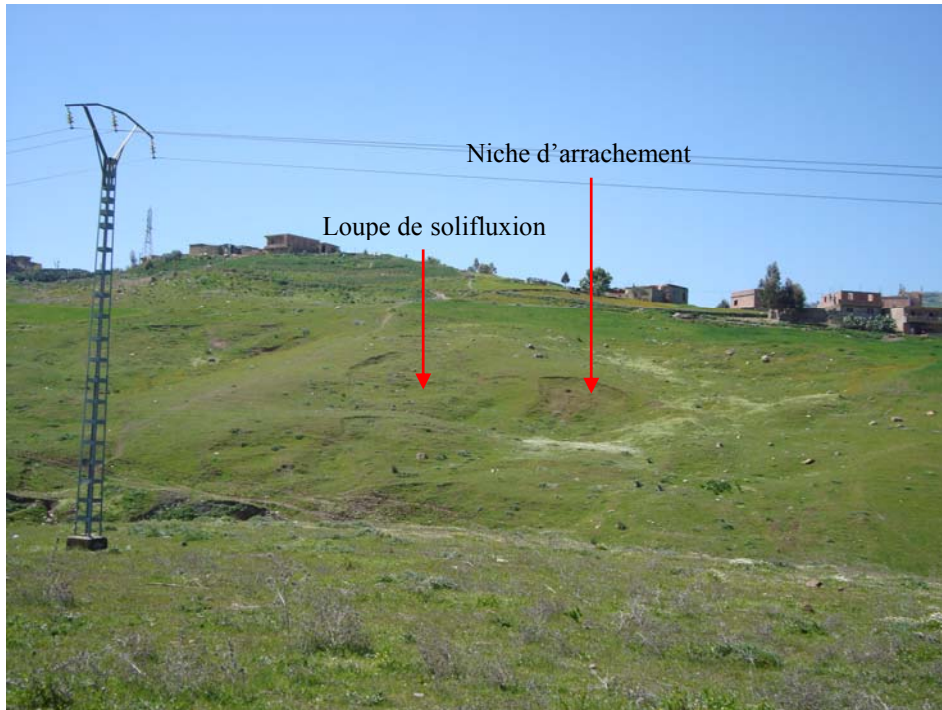
IV.2/ Les glissements de terrains : Dans la commune de Mila, aussi bien en milieu rural qu'en milieu urbain, la morphologie des glissements de terrains est fort variée. Cette variété est présente tant dans les milieux pulvérulents que dans ceux cohérents. Cependant deux grands types de glissements s'individualisent :

Les glissements rotationnels : Les formes de tailles modestes et réduites sont de quelques dizaines de mètres, elles sont parfois de 100 à 200 m de longueur et de 10 à 30 m de largeur (H. Amireche, 2001). Le mouvement est toujours imprégné d'une cicatrice de départ ou s'emboîtent de temps en temps des séries de niches d'arrachement donnant des glissements emboîtés. Dans ces derniers, le mouvement est multiple et se complique. Il est caractéristique des zones à argile gypseuse. La zone de départ des glissements est souvent circulaire, rarement cunéiforme ou en escaliers. L'escarpement est subvertical et la masse glisse d'un mouvement de rotation en s'affaissant vers l'aval créant une contre-pente. Les fissures transversales ont par endroit des ouvertures dépassant les 20 cm. Ces glissements ont été accentués, dans la plupart des cas, par la suppression des butées aux pieds des talus (fac-similé IV.2). La rupture des collecteurs des eaux usées a entraîné, par endroit, l'écoulement des eaux à ciel ouvert. Ces mécanismes ont généré un ravinement important. L'affouillement des pieds des talus accentue également l'instabilité des pentes marno-argileuses. La majorité des glissements restent cependant superficiels, dès fois étendus et complexes quand ils résultent de la suppression des butées.

Ce type de mouvement présente plusieurs générations imbriquées les unes dans les autres, est le plus souvent multiples. Ces glissements donnent aux versants une topographie chaotique (bossellements, ondulations) marquée par de nombreuses contre-pentes ou jaillissent de temps à autre des points d'eau (fac-similé IV.3). Ils sont souvent marqués par de petites ravines courtes avec entailles récentes et de petits cônes de déjections favorisant les petits affaissements latéraux.

Glissements plans : Ils se localisent essentiellement le long des Oueds et chaâbats. Les matériaux glissent par petits paquets sur les pentes des versants, ces mouvements sont accentués par le sapement des berges des Oueds à la base des rives concaves. Certains glissements progressent par de grands affaissements successifs vers l'aval des cours d'eau. Dans quelques secteurs, ils se complexifient car les points d'impact sur les rives concaves ne cessent de se déporter vers l'aval des méandres. Ces mouvements présentent une succession de plans,

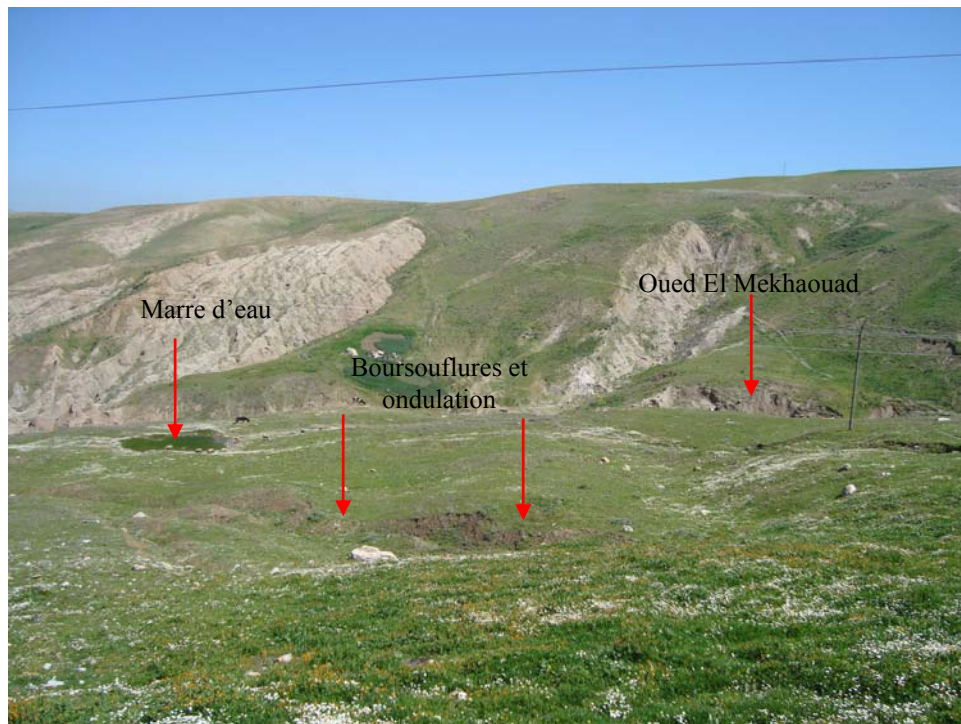
subverticaux, parallèles, le long desquels se fait la descente des paquets vers le lit des Oueds. A ce niveau, ces derniers sont charriés par les crues. Ces types de glissements peuvent s'étendre sur des dizaines voire quelques centaines de mètres linéaires et dont l'épaisseur atteint 1.5 à 2 m (H. Amireche, 2001). Les principaux glissements sont généralement de type simple, évoluant en un glissement-coulée. Cette cinématique est phénoménale surtout lors des pluies et écoulements exceptionnels.



Fac-similé IV.1 : loupes de solifluxion et foirage en paquet dans un versant.



Fac-similé IV.2 : Glissement engendré par suppression des butées au pied d'un talus (RN 79a).



Fac-similé IV.3 : Boursouflures et marre d'eau près au pied d'Oued Mekhaoued.

IV.3/ Les coulées : les coulées de boue et surtout les coulées à blocs formées de blocs anguleux, de galets et de matériaux limono-argileux, ont une matrice fine et elles sont charriables. Ces coulées ne sont pas étendues dans la région, fluides ou de forme réduite, Elles jonchent les abords des Oueds (dans l'amont de Oued El Kherba (fac-similé IV.4) et Oued M'aircha) ou au pied des crêtes calcaires (au Nord de Marachau par exemple).



Fac-similé IV.4 : Coulée à blocs en amont de Oued El Kherba.

IV.4/ Bad-lands : terrains meubles où la faible végétation et le ruissellement important ont contribué à la formation d'intense et profondes ravines. Dans la commune de Mila, les bad-lands se manifestent dans les collines et les versants cernant des oueds et chaâbats, constitués d'argile et marne à gypse.

IV.5/ Chute de blocs et éboulements (fac-similé IV.5): Se sont observés aux versants et pieds des corniches calcaires du Marachau (Sud de la commune).



Fac-similé IV.5 : Escarpement et chute de blocs au Marachau.

V/ Méthodes de calcul de stabilité des glissements de terrain :

1/ Introduction : le calcul de la stabilité peut être effectué dans deux circonstances bien distinctes : avant ou après déclenchement de mouvement (glissement) :

Dans le premier cas, le versant est apparemment stable, l'objectif du calcul de stabilité est alors de définir une surface de glissement qui aurait le plus de chances d'apparaître.

Autrement dit, le calcul de stabilité permet à la fois : d'apprécier la marge de sécurité du versant vis-à-vis de la rupture, de définir dans le site la zone la plus menacée par l'instabilité et d'examiner l'influence de certains travaux (terrassements, constructions,...etc.) sur la marge de sécurité qui a été définie pour le versant vierge. Cette étape de calcul apparaît donc très importante car elle permet de choisir les paramètres nécessaires pour l'ouvrage, afin de garantir la stabilité de l'ensemble (ouvrage et site).

Contrairement à ce premier cas, dans le cas où le glissement est déjà apparu sur le versant (c'est le cas de notre étude), le calcul de la stabilité s'effectue donc pour apprécier la marge de sécurité qui sépare l'état actuel du site de l'état d'équilibre. Dans ce deuxième cas, les valeurs des paramètres nécessaires à introduire dans le calcul sont en principe données par les

investigations déjà exécutées sur site, ce sont donc des valeurs réelles tel que : La géométrie de la surface du glissement, les caractéristiques géotechniques du terrain surtout ceux sur la surface de glissement, les forces extérieures à prendre en compte... etc. Dans ce cas, le calcul de stabilité présente aussi un grand intérêt, car il permet de repérer les causes qui jouent un rôle décisif dans l'apparition du glissement et de définir les dispositifs confortatifs nécessaires pour limiter le risque.

2/ Méthodes de calcul :

Selon la forme de la surface de glissement adoptée, plusieurs méthodes de calcul de la stabilité ont été développées par les chercheurs et ceci pour estimer l'état d'équilibre du versant en se basant sur la valeur du coefficient de sécurité F_s . Le fait, est que, l'application de ce coefficient a pour raison de se tenir éloigné de la rupture, autrement dit, il donne pour le talus une marge de sécurité qui le sépare de la rupture.

2.1/ Méthode globale :

Il est à noter que les premières indications sur la stabilité globale d'un massif homogène peuvent être données à partir de la méthode globale. Cette méthode nous permet aussi d'énumérer d'une manière générale toutes les forces qui peuvent entrer en jeu en sollicitant le corps en question.

La méthode globale consiste à ce que le massif soit homogène et isotrope et il est défini par les caractéristiques suivantes : C , φ et γ , si le milieu est aquifère la pression interstitielle U se rajoute à ces paramètres (G. Filliat, 1981 ; J. Costet et G. Sanglérat, 1983).

Dans la Fig.IV.10, on étudie l'équilibre du massif en supposant que : la rupture va se produire le long de la ligne AMB assimilée à un arc de cercle de centre O et de rayon r . le mouvement du corps (1) se ramène donc à une rotation de centre O . le problème qui se pose est : quelles sont les forces susceptibles d'intervenir dans l'équilibre du corps (1) ?

- Tout d'abord, le poids W des terres, appliqué au centre de gravité G .
- Les forces de résistance au cisaillement mobilisées le long de la ligne de rupture AMB .

La résistance en un point M est la somme :

- D'une résistance due à la cohésion \vec{c}'' , portée par la tangente en M , en admettant que la valeur de c'' soit constante en tout point de AMB , $c'' = \frac{c}{F_s}$ avec : F_s : le coefficient de sécurité recherché.

La résultante de ces forces \vec{K}'' est parallèle à AB et passe par le point D tel que :

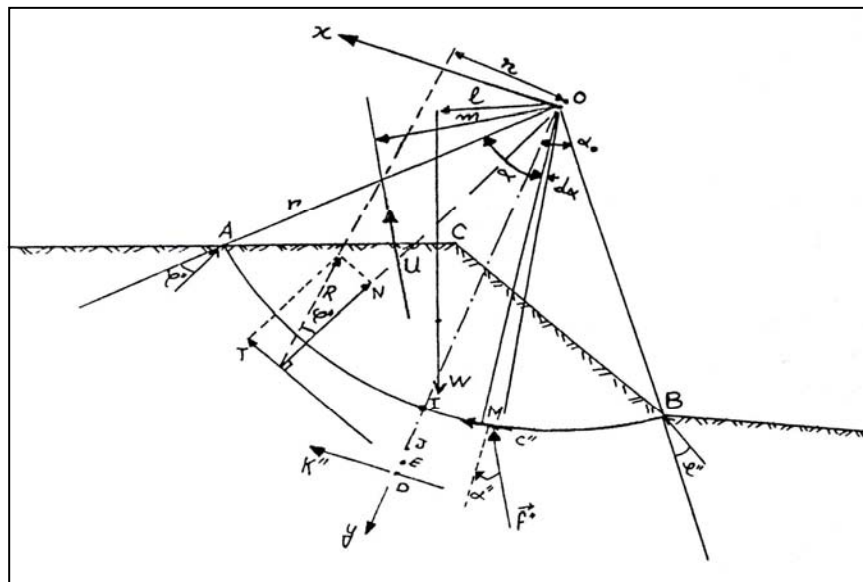
$OD = r \frac{\alpha_0}{\sin \alpha_0}$, et a pour intensité : $K'' = 2 r \sin \alpha_0 c''$ d'où le moment de cette force par rapport au centre O est égale à : $2 r^2 \alpha_0 c''$.

- D'une résistance due au frottement dont la résultante est \vec{R} .
- Les efforts transmis par l'eau de la nappe admettent pour résultante U appelée pression interstitielle.

L'équilibre du volume $ACBMA$ est acquis si : la somme géométrique des forces appliquées est nulle, et également la somme de leurs moments par rapport au centre O est nulle, alors :

$$\vec{W} + \vec{U} + \vec{K}'' + \vec{R} = \vec{0} \text{ d'où la somme des moments : } Wl - Um - Rn - 2r^2 \alpha_0 \frac{c}{F_s} = 0.$$

Dans ces équations, les forces \vec{W} , \vec{U} et \vec{K}'' sont parfaitement connues, il ne reste que le problème de la distribution des contraintes le long de la ligne AMB , ni donc sur l'intensité ou la direction de la force \vec{R} , c'est bien là que réside la difficulté du problème. Les différentes méthodes misent au point pour le calcul de la stabilité diffèrent les unes des autres par la manière dont elles traitent cette difficulté. Vu la multiplicité de ces méthodes, nous exposerons ici les méthodes qui nous avons utilisé dans nos calculs (J. Costet et G. Sanglérat, 1983).



**Fig.IV.10 : Différentes forces agissant sur une masse en mouvement
(J. Costet et G. Sanglérat, 1983).**

2.2/ Méthode des tranches :

La méthode des tranches est une méthode suédoise due à Petterson (1916), qui a subi plusieurs adaptations au fil des ans tel que son développement par Fellenius en 1927 pour les ruptures circulaires, par Bishop en 1954 et en fin elle a été étendue aux ruptures non circulaires par Nonveiller en 1965.

La méthode des tranches consiste à diviser un volume instable en un certain nombre de tranches verticales et à étudier l'équilibre de chaque tranche indépendamment sur la ligne de rupture, sous l'action des forces et des moments qui la sollicitent.

En général, cette méthode peut prendre en compte un maximum de complexités : surface topographique de forme quelconque, surface de rupture non circulaire, hétérogénéité des terrains, forces extérieures quelconques (charge supplémentaire au talus...etc.), écoulement des eaux souterraines. Elle peut être alors bien adaptée à l'étude des versants naturels qui sont généralement des cas complexes (G. Filliat, 1981 ; J. Costet et G. Sanglérat, 1983).

2.2.1/ Méthode de Fellenius :

C'est la méthode la plus simple pour l'analyse de stabilité des talus, considérons un talus constitué d'un certain nombre de couches de sols de caractéristiques différentes : c_i , φ_i et γ_i (Fig.IV.11). Fellenius suppose que la ligne de glissement est circulaire, on veut vérifier la stabilité de ce talus vis-à-vis du risque de glissement par le calcul de leur coefficient de sécurité. La méthode consiste à découper le volume du sol concerné (compris dans l'arc EMF) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux.

Le découpage des couches se fait de telle façon que l'intersection du cercle de glissement et d'une limite de couches (points G et H) correspond à une limite entre deux tranches.

Nous prenons comme exemple, l'étude d'équilibre de la tranche ($ABCD$), les forces agissant sur cette tranche sont les suivantes :

- Le poids W .
- La réaction R_n du milieu sous-jacent sur l'arc AB .
- Les réactions sur les faces verticales AD et BC décomposées en réactions horizontales H_n et H_{n+1} en réactions verticales V_n et V_{n+1} , ce sont les forces intertranches.
- Les pressions hydrauliques.

Par rapport au centre O du cercle de glissement, on définit :

- Le moment moteur, comme celui du poids des terres W , de l'eau interstitielle et des surcharges éventuelles, qui tend à provoquer le glissement.
- Les moments résistants, comme ceux des réactions s'opposant globalement au glissement de la tranche : moment de R_n , H_n , H_{n+1} , V_n et V_{n+1} .

Le coefficient de sécurité est donné par le rapport :

$$F_s = \frac{\sum_{EF} \text{des moments résistants maximaux}}{\sum_{EF} \text{des moments moteurs}}$$

En considérant la somme des moments sur tout l'arc EF , on constate que la somme des moments des forces intertranches est nulle. Fellenius a fait une hypothèse qui simplifie

considérablement les calculs, à savoir que la seule force agissant sur l'arc AB est le poids W , qui est décomposé en deux forces, l'une normale à AB (N_n) et l'autre tangentielle (T_n).

Dans ces conditions, le moment résistant maximal est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n , d'après la loi de coulomb, elle s'écrit :

$$(R_n)_t = c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i \dots \dots \dots (1)$$

La somme des moments pour toutes les tranches est :

$$\sum_{n=1}^{n=m} R \cdot (c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i) \dots \dots \dots (2)$$

avec : m : nombre total de tranches,

c_i et φ_i : caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est situé AB .

L'expression du coefficient de sécurité F_s sera :
$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} (c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n} \dots \dots \dots (3)$$

Avec les notations définies sur la Fig.IV.12.b, la formule (3) peut s'écrire :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} \left(c_i \frac{b}{\cos \alpha} + W \cos \alpha \tan \varphi_i \right)}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha} \dots \dots \dots (4)$$

Cas de l'existence de la nappe (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003) :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} \left[c_i \frac{b}{\cos \alpha} + \left(W \cos \alpha - \frac{u \cdot b}{\cos \alpha} \right) \tan \varphi_i \right]}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha} \dots \dots \dots (5)$$

avec : $u = Z_w \cdot \gamma_w$ (u : pression interstitielle, Z_w : hauteur d'eau et γ_w : poids volumique d'eau).

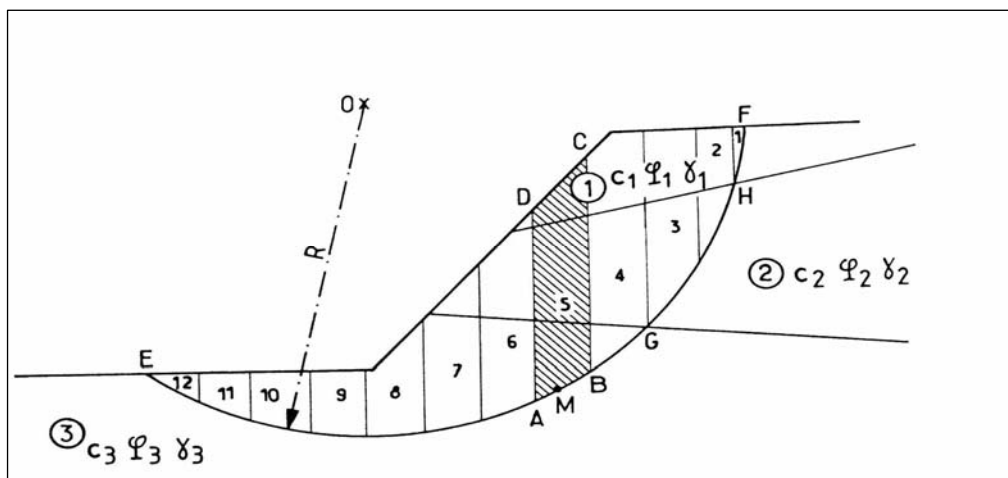
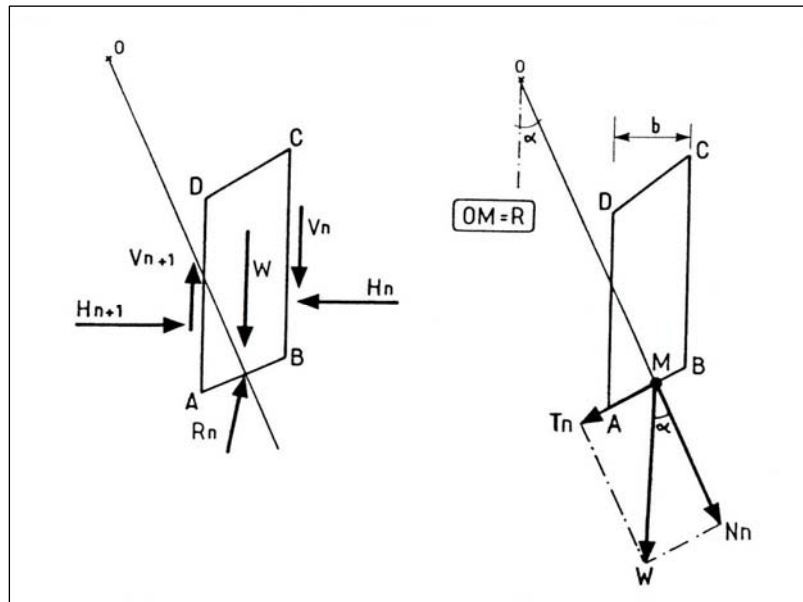


Fig.IV.11 : Découpage en tranches d'un talus (B. Hubert et al, 2003).



a) Décomposition complète b) Hypothèse de Fellenius

Fig.IV.11 : Forces agissant sur la tranche n (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003).

2.2.2/ Méthode de Bishop simplifiée :

En 1954, Bishop a apporté une amélioration à la méthode précédente (de Fellenius), et ceci en considérant que, pour toute tranche étudiée, $V_n - V_{n+1} = 0$ ce qui permet à considérer les efforts intertranches uniquement horizontaux.

Le coefficient de sécurité F_s s'exprime par cette méthode comme suit :

$$F_s = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=m} W \sin \alpha} \cdot \sum_{n=1}^{n=m} \frac{(W - u_n \cdot b) \tan \varphi_i + c_i \cdot b}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \varphi_i}{F_s}}$$

Tous les termes sont connus et F_s est calculé par itérations successives, la première itération est faite en adoptant, comme valeur F_{s0} , le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius. La méthode simplifiée de Bishop est généralement utilisée au traitement par ordinateur. On a vu comment calculer le coefficient de sécurité F_s pour un cercle donné a priori. Pour connaître F_s réel d'un talus, il faut définir le cercle donnant la valeur minimale de F_s , c'est en effet, le long de cette surface de glissement que la rupture se produira.

3/ Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité :

Le facteur de sécurité minimal F_s adopté est assez rarement inférieur à 1.5. Il peut quelquefois être égal à 2, voire à 2.5 pour des ouvrages dont la stabilité doit être garantie à tout prix (grand risque pour les personnes, site exceptionnel), ou pour des méthodes dont l'incertitude est grande (analyse en contrainte totale avec risque d'erreur sur la valeur de la cohésion drainée C_u). Pour certains sites peu importants ou pour certains ouvrages courants, et lorsqu'il n'y a pas de risque pour la vie humaine, on peut accepter des valeurs plus faibles pendant un moment très court ou pour des fréquences faibles : 1.2 voire 1.1, mais pour pouvoir se rapprocher ainsi de 1,

c'est-à-dire de la rupture, il faut être sûr de la validité des hypothèses et des paramètres adoptés, ce qui souvent est difficile en géotechnique.

Les valeurs de F_S en fonction de l'importance de l'ouvrage et des conditions particulières qui l'entoure sont résumées dans le Tableau.IV.2:

F_S	Etat de l'ouvrage
< 1	danger
1.0 - 1.25	sécurité contestable
1.25 - 1.4	sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants sécurité contestable pour les barrages, ou bien quand la rupture serait catastrophique
> 1.4	satisfaisante pour les barrages

Tableau.IV.2 : Valeurs de coefficient de sécurité F_S données en fonction de l'importance de l'ouvrage (G. Filliat, 1981).

La définition des seuils des facteurs de sécurité dépend de l'approche adoptée, des fréquences de sollicitations de l'ouvrage en question et du risque créé par la rupture. En condition normale, Fellenius propose un seuil égal à 1.25, alors que $F_S = 1.5$ pour Bishop (l'approche de Fellenius est plus conservatoire que celle de Bishop).

V/ Conclusion :

Le territoire de la commune de Mila offre l'avantage de présenter une grande variété d'instabilité. Les critères qui définissent une instabilité déclarée peuvent être soit nets : c'est le cas par exemple des arrachements de terrain en tête de glissement ; soit plus contestables et apparaître seulement comme un indice tels : topographie « moutonnée », un tassement de terrain ou un désordre décelé sur un ouvrage. Mais le problème est plus délicat lorsqu'il faut se prononcer sur une instabilité présumée potentielle et l'on alors attache uniquement à l'analyse des facteurs défavorables tels que rocher fissuré et désorganisé une zone très humide, une pente forte pour un matériau donné...etc.

Les affleurements dans la commune de Mila sont à dominance argileuse, donnant lieu à des fluages (Solifluxions) et à des glissements, généralement, superficiels. Ainsi, les marnes et les argiles constituent un complexe relativement imperméable. Les coefficients de ruissellement y sont d'autant plus élevés que la couverture végétale est plus faible et les pentes élevées. La concentration de ruissellement est généralisée, ce qui donne naissance à des formes de ravinements variés, actifs générateurs de transports solides.

Chapitre V :
Caractéristiques
géotechniques de quelques
sites en mouvements

I/ Introduction :

Les reconnaissances et les études géotechniques complètent celles réalisées par la géologie et l'hydrogéologie. Elles doivent permettre de préciser la description des terrains en question, leurs états de comportement pendant l'exécution puis l'exploitation de l'ouvrage concerné, et enfin de définir les méthodes d'exécution, le dimensionnement des ouvrages et/ou les traitements spéciaux à envisager pendant la construction (D. Cordary, 1994).

La géotechnique appelle à la géologie pour définir la nature lithologique des différents terrains rencontrés, leurs positions spatiales relatives et leur évolution possible et permet ainsi un choix et une adaptation des ouvrages aux sites (P. Antoine, 1992).

Le programme des reconnaissances géologiques et géotechniques des sols se fait en fonction des caractéristiques de l'ouvrage à réaliser et des conditions géologiques et géomorphologiques du site dans lequel il sera implanté.

II/ Généralités sur les moyens de reconnaissances géotechniques :

Une campagne de reconnaissance commence généralement par une étude au bureau sur l'archives et se termine au laboratoire où on réalise des essais sur des échantillons prélevés :

II.1/ Inventaire des données existantes :

- Documents et études donnant des indications sur les caractéristiques mécaniques des sols et roches dans les conditions analogues à celles de l'ouvrage étudié.
- Archives de construction d'ouvrages analogues situés à proximité ou dans les massifs similaires
- L'ensemble des cartes disponibles sur la région (cartes géologiques, hydrogéologiques, géotechnique, topographiques...).

II.2/ Observation sur terrain (levé géologique de surface) :

- Le géologue doit l'effectuer avec le plus grand soin; ceci permet souvent d'éviter des travaux d'investigations coûteuses et permet aussi une interprétation optimum des résultats de ces investigations. L'étendue de la zone à lever dépend de la complexité de l'environnement géologique de l'ouvrage.
- Le levé géologique doit comprendre : le levé des affleurements et leur lithologie, l'inventaire des éléments concernant la tectonique et les discontinuités (plissements, failles, stratification, schistosité, fissures...), la description des accidents de surface (glissement, effondrement...).
- Une synthèse entre le travail de terrain et la documentation existante donnera des indications sur les travaux d'investigation à réaliser et le choix du site.

Les données géologiques de notre secteur d'étude mettent en évidence une composition lithologique représentée essentiellement par des argiles et des marnes à gypse, telles

formations présentent des caractéristiques médiocres et constituent généralement le siège de nombreux problèmes d'instabilité notamment les glissements éventuels. A cet effet, une campagne de reconnaissance géotechnique doit être ajoutée pour bien dimensionner les travaux de protection capables d'arrêter ou de réduire ces risques à un niveau acceptable.

II.3/ Les reconnaissances géotechniques

Les reconnaissances géotechniques sont nécessaires pour une description correcte des terrains et l'estimation de leurs propriétés physiques et mécaniques qui seront utilisés dans les calculs. Il existe, généralement deux types de reconnaissance géotechnique (reconnaissance ou essais in-situ et essais en laboratoire) :

II.3.1/ Les essais et moyens de reconnaissance in-situ :

Toute étude géotechnique doit commencer par une reconnaissance in-situ qui permet de déterminer les caractéristiques des sols en place dont va dépendre le type de la fondation. Plusieurs types d'essais et mesures in-situ peuvent être réalisées à différentes étapes de l'étude d'un ouvrage. Dans cet aperçu théorique, on va citer les moyens de reconnaissance in-situ réalisés dans la commune de Mila et qu'on dispose de données.

A/ Les sondages carottés :

L'investigation par sondages mécaniques constitue une étape très importante dans n'importe quelle étude géotechnique, ils sont également destinés à :

- Etablir une coupe lithologique de prospection constituée de terrains traversés donc donner une bonne identification des sols en profondeur.
- Prélever des échantillons de sol intacts ou remaniés destinés aux essais de laboratoire.
- Réaliser des essais in-situ (pressiométriques, inclinométriques, piézométriques...etc.) ou de diagraphies.
- Repérer les zones de faiblesse ainsi que les traces de cisaillement dans les matériaux cohérents.

Les sondages peuvent être destructifs (peu coûteux et apportant peu d'information) ou carottés (beaucoup plus chers avec prélèvement d'échantillons) et qui ne sont nécessaires que pour une reconnaissance détaillée du terrain (A. Benaissa, 2003; G.Philipponat, 1987).

B/ Le pénétromètre dynamique ou Dynamic Penetration Test (DPT):

B.1/ But de l'essai : Il permet la détermination de la résistance mécanique d'un sol. Ce type d'essai, consiste à faire pénétrer dans le sol par battage des tiges métalliques à l'aide d'un mouton tombant en chute libre. On mesure ensuite à intervalles d'enfoncement régulier, l'énergie nécessaire correspondante (J. Cost et G. Sanglérat, 1983).

B.2/ Principe de l'essai D.P.T : L'essai consiste à battre un train de tiges finissant par une pointe conique dans le sol à l'aide d'un mouton de masse M tombant d'une hauteur fixe H et de mesurer le nombre de coups N_d nécessaire pour faire pénétrer la pointe sur une hauteur h .

L'essai est en général rapide, le comportement du sol est donc non drainé notamment dans le cas des sols fins saturés.

B.3/ Domaine d'utilisation de l'essai D.P.T :

L'essai peut se faire pour le balayage du terrain en phase de reconnaissance préliminaire. Une telle opération permet par la suite d'orienter la reconnaissance géotechnique détaillée (nombre et position des sondages...). Cet essai est aussi utilisé pour l'analyse qualitative d'un terrain (localisation d'un substratum, mise en évidence des cavités...), comme il est utilisé pour l'étude d'un modeste projet de fondations où l'investigation géotechnique est, pour des raisons économiques, limitée.

Le champ d'application de cet essai s'est élargi et il est actuellement courant de réaliser des campagnes d'essai de pénétration dynamique **D.P.T** pour :

- ◆ Zoner un site en phase de reconnaissance et définir ainsi son aptitude à recevoir une construction donnée.
- ◆ Définir le toit d'un substratum rocheux.
- ◆ Etudier l'homogénéité spatiale du terrain par recoupement des différents sondages pénétrométriques,
- ◆ Etudier les sites où il est impossible de réaliser des massifs de réaction (site aquatique, sol tourbeux, terrain encombré...), ce qui présente un avantage important par rapport à d'autres essais in-situ.
- ◆ Etudier la pénétrabilité des pieux et des rideaux de palplanches.
- ◆ Caractériser la résistance des sols raides et compacts (refus de pénétration statique).
- ◆ Etudier les dépôts alluvionnaires ou graveleux où l'éboulement et la présence des gros cailloux rendent délicats les autres essais in situ (A. Bouafia, 2004).

B.4/ Présentation des résultats d'essais :

Les résultats de l'essai sont en général reportés sur un graphique arithmétique ou semi-log (Fig. V.1) donnant, en fonction de la profondeur atteinte :

- 1) Le nombre de coups N_d correspondant à un enfoncement de 10, 20, 25, ou 30cm (graphe des mesures).
- 2) la résistance de pointe au battage déduite couramment de la formule des **Hollandais** avec un coefficient de sécurité égal à un (1). (Après exploitation des mesures).

Cette résistance est souvent appelée « Résistance dynamique conventionnelle R_d » qui est calculée comme suit (J. Cost et G. Sanglérat, 1983) :

$$R_d = \frac{M^2 \cdot H}{A} \cdot \frac{1}{M + Pz} \cdot \frac{1}{e}$$

Avec: R_d : Résistance dynamique de pointe en (daN / cm²),

M : Poids du mouton en (daN),

H : Hauteur de chute du mouton en (cm),

A : Section de la pointe en (cm²),

Pz : Poids des tiges en (daN) à la profondeur (z) et e : enfoncement par coup (m).

Remarque :

On exprime (R_d) en fonction de (z) généralement avec un pas $\Delta z = 0,50m$.

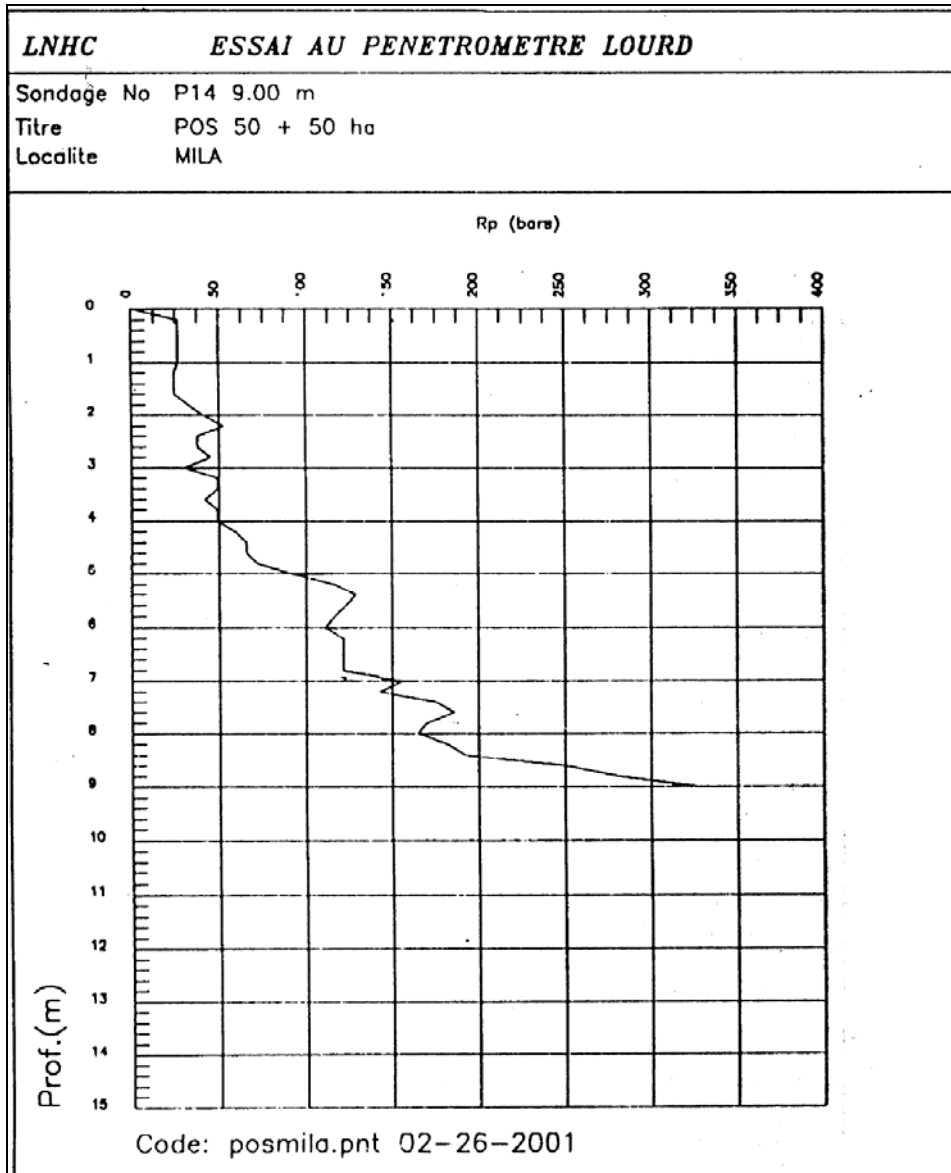


Fig.V.1: Représentation graphique d'un essai pénétrométrique.

Les essais de pénétromètre dynamique sont effectués dans le but :

- D'avoir une estimation qualitative;
- Détecter des anomalies souterraines;
- Définir des zones d'égale résistance;
- Estimer empiriquement la contrainte admissible du sol (Q_{adm});
- Fixer d'une manière approximative le type et la profondeur d'ancrage des fondations dans la formation la plus résistante.

II.3.2/ Les moyens d'étude au laboratoire :

Les essais de laboratoire ont pour but de déterminer les paramètres physiques et mécaniques du sol en vue d'estimer son état naturel. Ces essais se font sur des échantillons prélevés à partir des carottes paraffinées de sondages. Pour qu'un essai donne des résultats précis et fiables, il faut que l'échantillon soit représentatif (J. Costet et G. Sanglérat, 1981).

II.3.2.1/ Essais d'identification :

Il est habituel de caractériser les sols à l'aide d'essais relativement simples. Ces essais sont appelés "**essais d'identification**", ils nous permettent de déterminer la nature du sol, sa structure et ses propriétés physico-chimiques avec précision (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003) :

A/ L'analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer les proportions des grains de différentes tailles dans le sol. Elle s'effectue par :

- Tamisage pour les grains d'un diamètre supérieur à $80\mu\text{m}$.
- Sédimentométrie pour les grains les plus fins.

Les résultats sont exprimés sous forme d'une "**courbe granulométrique**". Cette courbe contribue à l'identification du matériau et permet de prévoir certaines de ses propriétés. Elle est notamment utilisée pour la classification des sols grenus, qui nécessite le calcul de deux coefficients de forme :

◀ Le coefficient d'uniformité (coefficient de Hazen) :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{Si : } C_u > 5 \text{ la granulométrie est dite étalée (continue).}$$

$$C_u < 2 \text{ la granulométrie est dite étroite (uniforme).}$$

◀ Le coefficient de courbure :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \quad \text{: Pour un sol bien gradué : } C_u > 5 \text{ et } 1 < C_c < 3.$$

D_{10} , D_{30} et D_{60} étant respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% d'éléments de dimension inférieure.

Interprétation des résultats granulométriques :

Les sols naturels sont toujours soumis aux différents facteurs d'altération et d'érosion donnant naissance aux matériaux qui se différencient par leur forme et leur volume. Le volume de ces matériaux varie entre des cailloux (et même des blocs) et des grains plus fins tel que les silts et les argiles. Les formes et les volumes des grains nous donnent une idée sur les facteurs d'altération et de transport affectant ces grains, ainsi que leurs dimensions jouent un rôle très important dans la stabilité des sols : les sédiments de gros sables et graviers sont plus stables lorsqu'ils sont secs, par contre les sables fins, les silts et les argiles sont généralement le siège de nombreux mouvements de terrains et leur instabilité augmente encore plus en présence d'eau.

B/ La teneur en eau :

Elle définit le rapport en pourcentage (%) du poids d'eau W_w que le sol contient, au poids W_s de ses éléments secs. L'obtention des éléments secs s'obtient par dessiccation du sol pendant 24 heures dans une étuve à 106° (P. Habib, 1997), on aura :

$$W (\%) = W_w / W_s \cdot 100 \quad \text{avec : } W_w : \text{ poids de l'eau dans l'échantillon.}$$

$$W_s : \text{ poids des grains solides dans l'échantillon.}$$

La teneur en eau est le paramètre le plus important dont sa variation modifie toutes les propriétés physiques du sol. Connaissant la valeur de la teneur en eau on peut avoir l'état dans lequel le sol se trouve, à titre d'exemple le tableau V.1 donne une classification adoptée par FAER en fonction de ce paramètre :

W	Etat
01-25 %	Légèrement humide
25-50 %	Humide
50-75 %	Mouillé
75-90 %	Détrempé
100 %	Saturé

Tableau V.1 : Etat hydrique des sols selon leur teneur en eau.

C/ Les densités :

L'essai de la densité permet d'obtenir les caractéristiques physiques du sol sous plusieurs formes (densité sèche, densité humide, densité apparente et densité déjaugée).

- **La densité humide γ_h :**

C'est le poids volumique du sol à l'état humide : $\gamma_h = W / V$ avec :

W : poids de l'échantillon humide et V : volume total.

- **La densité sèche γ_d :**

C'est le poids volumique du sol à l'état sec : $\gamma_d = W_s / V$ avec :

W_s : poids des grains solides et V : volume total.

Le tableau ci-après donne une classification du sol selon ces deux paramètres (J. Costet et G. Sanglérat, 1981) :

Nature du sol	γ_h	γ_d
Sable	17 à 20 Kn/m ³	14 à 18 Kn/m ³
Argile	16 à 22 Kn/m ³	10 à 20 Kn/m ³
Tourbe	13 à 17 Kn/m ³	03 à 10 Kn/m ³

Tableau V.2 : Classification des sols selon leur densités.

D/ Les limites d'Atterberg :

Compte tenu de leur structure, les argiles ont la propriété d'absorber une quantité d'eau très importante, ou au contraire, de se dessécher, ceux-ci sont en fonction des conditions auxquelles elles sont soumises. Quelque soit la nature des argiles, celles-ci malaxées avec une quantité d'eau, se transforment en boue (argile à un comportement liquide). Au contraire, si les argiles sont suffisamment desséchées, les grains sont très serrés, et les liaisons deviennent très intenses (les argiles ont un comportement solide). Entre ces deux états extrêmes, l'argile est malléable (les argiles ont un comportement plastique).

Les limites d'Atterberg sont donc des teneurs en eau, pour les obtenir, les essais s'effectuent sur la fraction du matériau passant au tamis de 0,40mm (400 μ m).

♦ Limite de liquidité W_L : qui sépare l'état plastique de l'état liquide. Elle se détermine à l'aide de l'appareil de Casagrande (B. Hubert et G. Philipponnat., 2003).

♦ Limite de plasticité W_P : qui sépare l'état solide avec retrait de l'état plastique. La limite de plasticité et la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner avec le sol des rouleaux de 3mm de diamètre sans qu'ils se rompent.

♦ Limite de retrait W_s : se situe entre un état solide sans retrait et un état solide avec retrait. C'est la teneur en eau juste suffisante pour remplir les vides du sol au moment où il atteint par séchage son volume minimal.

L'indice de plasticité I_p : c'est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité. Il donne l'étendue du domaine de plasticité du sol : $I_p = W_L - W_p$.

L'indice de consistance I_c , ou teneur en eau relative par rapport aux limites de liquidité et de plasticité : $I_c = (W_L - W) / I_p$ avec W : teneur en eau naturelle.

L'indice de plasticité permet de définir le degré de plasticité d'un sol comme le montre le tableau (tableau V.3).

En utilisant les résultats des limites d'Atterberg, le sol peut être classé par le biais de diagramme de plasticité de Casagrande (fig. V.2).

Indice de plasticité	Degré de plasticité
0 - 5	Non plastique
5 - 15	Peu plastique
15 - 40	Plastique
> 40	Très plastique

Tableau V.3 : Classification des sols suivant l'indice de plasticité.

Les classifications du sol les plus utilisées et les plus récentes sont celles qui tiennent compte de plusieurs paramètres en même temps, comme la classification LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) des sols grenus et le diagramme de plasticité de Casagrande.

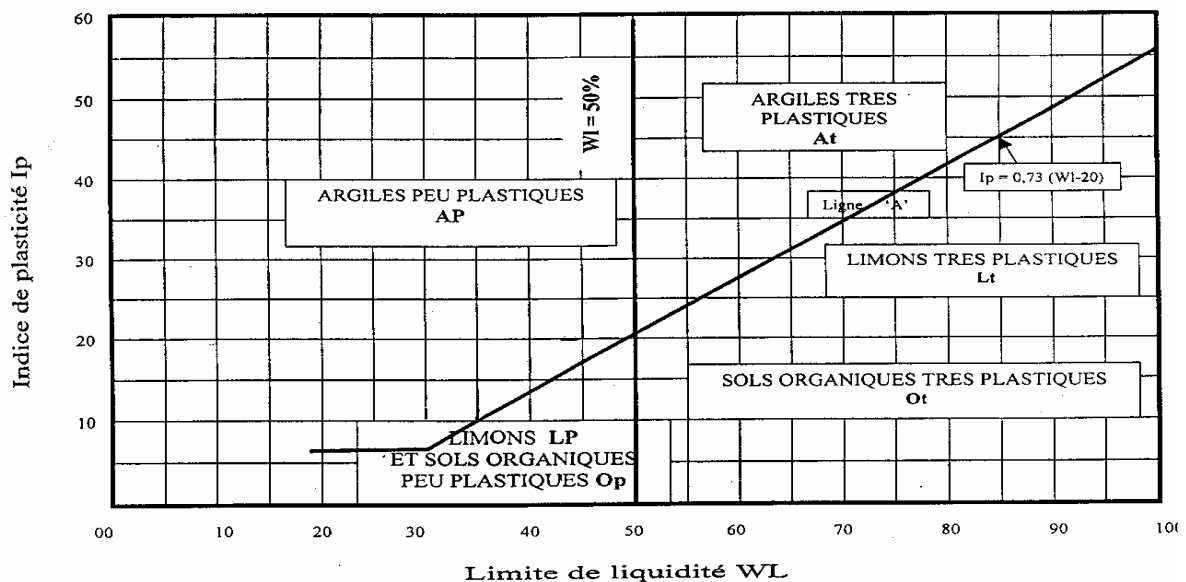


Fig.V.2 : Diagramme de plasticité de Casagrande.

- **Estimation du gonflement des sols :**

Selon les valeurs de l'indice de plasticité I_p , on peut évaluer le gonflement possible des sols. Généralement les sols gonflants ont un très grand indice de plasticité (Tableau V.4).

Gonflement potentiel	I_p (%)
Faible	0 - 15
Moyen	15 - 25
Elevé	25 - 55
Très élevé	> 55

Tableau V.4 : Estimation du gonflement des sols suivant l'indice de plasticité

II.3.2.2/ Essais mécaniques :

II.3.2.2.1/ Essai de cisaillement rectiligne (Fig.V.3) :

A/ Description de l'essai : Dans cet essai, l'échantillon est placé dans un cylindre constitué de deux demi-boîtes (C_1) et (C_2) qui peuvent coulisser horizontalement l'une sur l'autre.

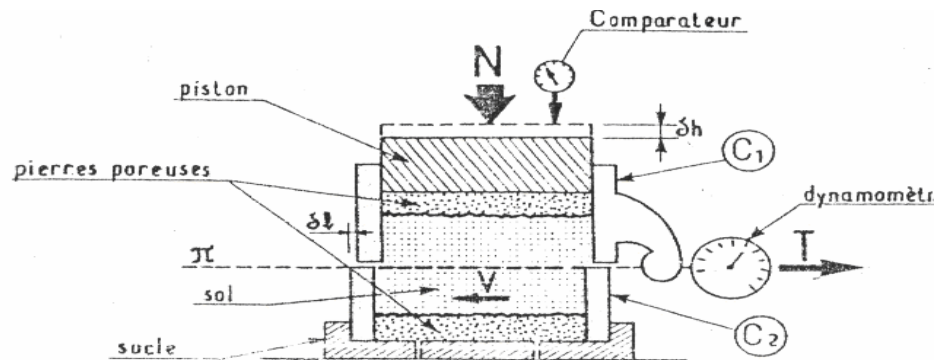


Fig.V.3: Cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande.

Deux pierres poreuses permettent le drainage du sol. L'appareil comporte un dispositif permettant d'appliquer sur l'échantillon une charge verticale (N) par l'intermédiaire d'un piston. L'essai consiste à tirer horizontalement sur la demi-boîte inférieure de façon à cisailier le sol selon le plan (π), il se fait à vitesse constante (V). L'effort horizontal (T) est mesuré sur la demi-boîte supérieure ainsi que les déplacements horizontaux relatifs (δl) correspondants.

La variation d'épaisseur (δh) de l'échantillon est également mesurée par un comparateur. Cette variation peut correspondre à un tassement (le sol est dit contractant) ou à un gonflement (le sol est alors de type dilatant). Soit : (S) la section de l'échantillon selon le plan (π) : $\sigma = N/S$, la contrainte normale appliquée à l'échantillon ;

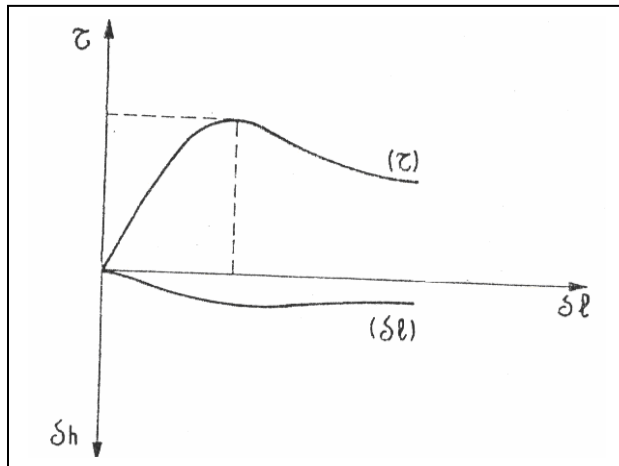
$\tau = T/S$, la contrainte de cisaillement maximale mesurée à la rupture.

Remarque : (σ) reste constante au cours de l'essai et (τ) varie au cours de l'essai de 0 à τ_{max} (Fig.V.4.a).

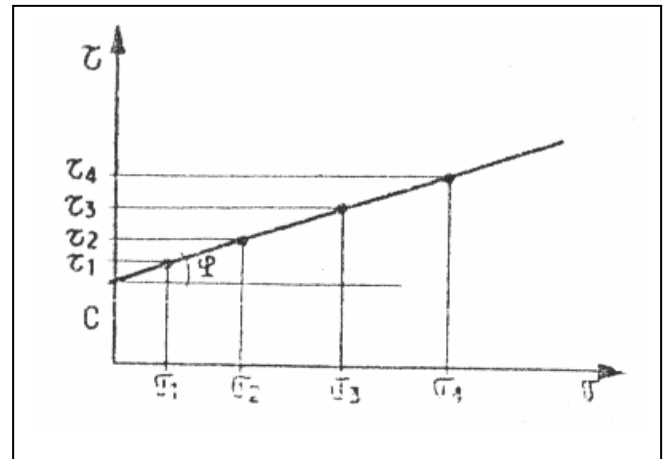
Si l'essai est réalisé sur plusieurs éprouvettes d'un même sol avec des contraintes normales différentes, par exemple σ_1 , σ_2 , σ_3 et σ_4 , la courbe intrinsèque du sol peut être

déterminée en portant sur le diagramme de coulomb (τ , σ) les points correspondants aux contraintes maximales mesurées (τ_1 , τ_2 , τ_3 et τ_4) (Fig.V.4.b), c'est-à-dire les couples (σ_i , $\tau_{i\max}$) de chaque essai. Les valeurs de l'angle de frottement interne (φ) et de cohésion (c) dépendent des conditions d'essai (vitesse de déplacement, drainage assuré ou non, etc ...).

En général, il nous faut trois couples (τ , σ) pour tracer la courbe intrinsèque du sol étudié.



a- Essai sous $\sigma_i = cte$
 Courbe τ/δ_l et δ_h/δ_l
 (Résultat d'un seul essai de cisaillement)



b- Détermination des caractéristiques de plasticité (φ) et (C)
 (Courbe intrinsèque du sol)

Fig.V.4 : Les courbes d'essai de cisaillement

B/ Principales caractéristiques mécaniques d'un sol :

Les valeurs de la cohésion (c) et de l'angle de frottement interne (φ) dépendent des conditions d'essais (drainage, vitesse de chargement, consolidation...), nous allons donc être amené à distinguer trois grandes familles de paramètres :

➤ **Essai non consolidé non drainé (φ_{uu} et C_{uu}) :** Si le sol est saturé $\varphi_{uu} = 0$, on réservera donc ce type d'essais pour le calcul des ouvrages à court terme.

➤ **Essai consolidé non drainé (φ_{cu} et C_{cu}) :** Ces essais sont rapides mais nécessitent la mesure de la pression interstitielle. Compte tenu du postulat de Terzaghi on peut déterminer les propriétés des sols saturés en contraintes effectives.

➤ **Essai consolidé drainé (φ_{cd}) et (C_{cd}) ou (C' et φ') :**

Se sont des essais lents (d'autant plus que la perméabilité est faible). Ils conviennent pour des sols saturés ou non, de perméabilité assez élevée. (B. Hubert et G. Philipponnat., 2003).

II.3.2.2.2/ Essai oedométrique : L'essai de compressibilité à l'oedomètre a pour but d'étudier la consolidation d'échantillon de sol intact ou remanié, soumis à des charges

verticales, drainé suivant cette direction et maintenu latéralement par une paroi rigide (J.P. Tisot, 1983). L'essai permet de suivre la consolidation au cours du temps et de déterminer les relations entre les charges et les déformations obtenues sous ces charges (après consolidation). Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes :

- la courbe de compressibilité, qui indique le tassement total en fonction du logarithme de la contrainte appliquée. Il donne la pression de préconsolidation σ_p .
- La courbe de consolidation, qui donne le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous l'application d'une contrainte constante.

A partir de ces courbes, on peut déduire plusieurs paramètres nécessaires pour le calcul du tassement ou pour la classification du sol selon leur compressibilité : le coefficient de consolidation C_v , l'indice de compressibilité C_c , l'indice de gonflement C_s et la contrainte de préconsolidation σ_p (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003).

L'établissement de la courbe de compressibilité se fait de la façon suivante : des contraintes normales sont appliquées à l'échantillon par paliers successifs en présence d'eau, le tassement (ou le gonflement au déchargement) est mesuré sous chaque palier de chargement jusqu'à ce qu'une stabilisation soit pratiquement atteinte. La durée d'application de chaque charge est généralement de 24 heures.

On représente ci-après une classification du sol donnée selon leur indice de compressibilité C_c (G. Philipponnat, 1979) :

$C_c < 0.020$	Sol incompressible
$0.020 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.100$	Sol peu compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c > 0.500$	Sol extrêmement compressible

Tableau V.5 : Classification des sols d'après leur C_c .

♦ **Le coefficient de gonflement C_g** : c'est la pente de la courbe de déchargement (à ne pas confondre ce coefficient avec l'indice de gonflement (C_s)). On peut également classer le sol vis-à-vis le gonflement en fonction de C_g comme suit :

$C_g < 0,005$: sol non gonflant et $C_g > 0,005$: sol pouvant gonfler, $C_g > 0.02$: sol gonflant.

III/ Propriétés géotechniques de quelques sites en mouvement dans la commune de Mila:

A partir des vingtaines d'études de sol qu'on a pu récolté lors de notre enquête, soit des études de points particuliers (écoles, réservoirs, blocs administratifs, bâtiments...) ou celles qui s'inscrivent dans le cadre des études des POS et PDAU de la commune de Mila, les rapports de sols montrent des caractéristiques géotechniques très médiocres (sols fins gonflants, compressibles, de faible cohésion, présence du gypse...).

On va présenter dans ce chapitre les caractéristiques géotechniques de quelques sites instables, deux dans la ville de Mila et deux en dehors de la ville.

III.A/ Site des 185 logements :

A.1/ Situation géographique du site :

La cité des 185 logements appartient au POS 50 + 50 (Fig.V.5), il est situé à l'Ouest du centre ville de Mila, et se délimite par la route nationale RN79 reliant la ville de Mila à celle de Ferdjioua au Nord, les logements évolutifs 334 lots du terrain au Sud, le centre ville de Mila à l'Est, et les 140 logements semi collectifs promotionnels à l'Ouest.

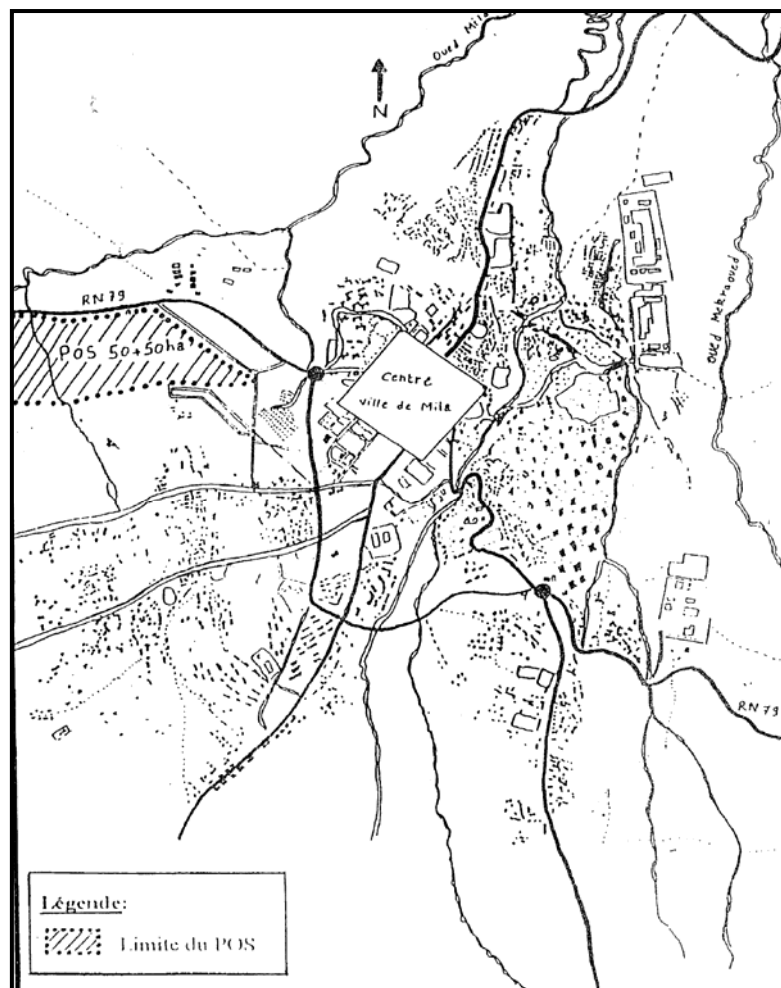


Fig.V.5 : Situation géographique du site 185 logements (POS 50+50).

A.2/ Description de la cité des 185 logements et des désordres survenus :

La cité des 185 logements se situe au Nord–Ouest de la ville de Mila et elle est composée de 17 bâtiments réalisés en gradin de R+4 faisant un programme de logements sociaux repartis sur quatre tranches réalisées comme suit : 40/100 logements tranche 2000, 90/90 logements tranche 2001, 25/140 logements tranche 1999 et 30 /30 logements tranche 2002 (Fac-similé.V.1).



Fac-similé V.1 : Vue générale de la cité de 185 logements à Mila.

Systeme constructif :

Tous les blocs de type R+4 sont construits en système traditionnel (auto-stables : poteaux et poutres) reposant sur des semelles filantes croisées dans les deux sens. L'ancrage des bâtiments est à environ de 2.50 m par rapport à la côte du terrain naturel et rigidifié par un voile périphérique de 15 cm d'épaisseur (OPGI de Mila, 2006).

Dégâts constatés :

Notre attention a été attirée après le contact établi avec les responsables de l'OPGI de Mila qui nous ont donné une idée globale et détaillée par la suite sur les problèmes qui ont surgis dans les blocs des bâtiments construits après une année de réception provisoire de la première tranche de 40 logements (fissuration au niveau des parois des RDC et qui se propagent vers les fondations et les étages supérieurs, éclatement de la maçonnerie, tassement d'un bloc par rapport à un autre, écartement du joint de dilatation...) (Fac-similé V.2. 3 et 4).

Au fur et à mesure, le phénomène observé a infecté la structure de la majorité des blocs de la cité. A l'état actuel, aucun organisme technique (de contrôle, d'étude ou de suivi) n'a pu présenter une justification pertinente à la particularité de ce phénomène lié au glissement.



Fac-similé V.2: Conséquences du tassement au niveau du rez de chaussé



Fac-similé V.3 : Mouvement de terrain au voisinage des blocs



Fac-similé V.4 : Exemple type du basculement d'un bloc.

A.3/ Diagnostic et analyse de la cité des 185 logements :

Topographie et données géologiques du site :

Les 185 logements sociaux de Mila sont implantés sur un terrain présentant une topographie assez régulière dirigée vers le Nord-Est, de pente variant entre 10 et 16 % avec une dénivelée de 25 m (OPGI de Mila, 2006) (Fac-similé V.1).

Les sondages carottés vont jusqu'à 18 m de profondeur. Deux sondages sont équipés par des piézomètres et les autres sont équipés par des inclinomètres. La lecture de ces derniers montre que la rupture se situe à 7 m de profondeur (OPGI de Mila, 2006).

La géologie du site est représentée par des formations superficielles (dépôts mio-plio-quaternaires) constituées essentiellement de terre végétale, d'argiles et d'argile marneuse renfermant du gypse et blocs calcaires (Fig. V.6).

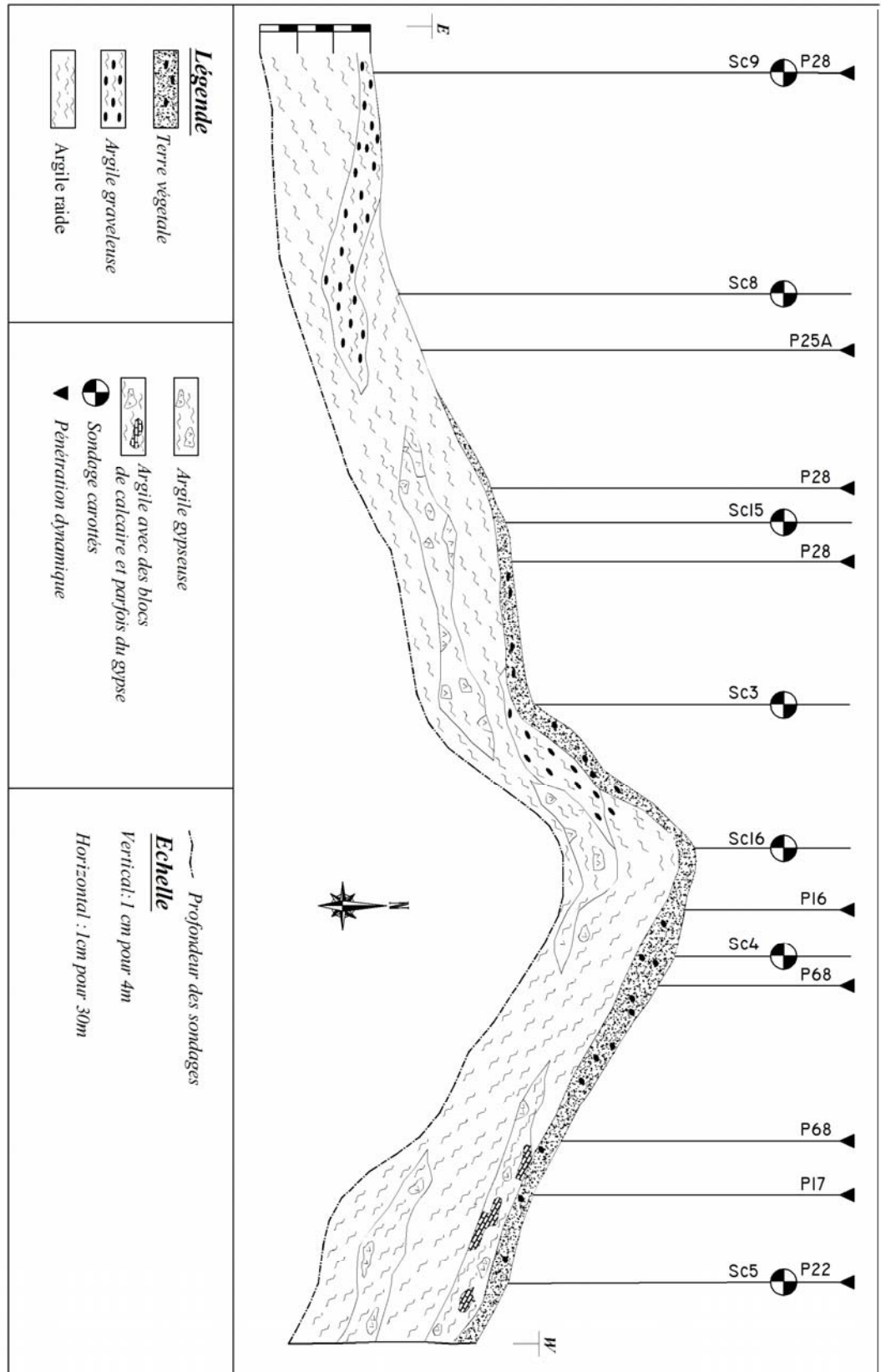


Fig. V.6 : coupe géologique du site des 185 logements.

Caractéristiques géotechniques :

Les paramètres d'identification donnés ci-dessous concernent la couche d'argile :

1/ Caractéristiques physiques :

- Densité sèche γ_d : $1.66 < \gamma_d < 1.93$
- Densité humide γ_h : $2.06 < \gamma_h < 2.17$
- Teneur en eau W % : $15.18 < W < 24.54$
- Degré de saturation S_r % : $87.27 < S_r < 100$
- La limite de plasticité : $25.56 < W_p < 31.00$
- La limite de liquidité : $48.00 < W_l < 67.20$.
- L'indice de plasticité : $21.00 < I_p < 41.94$.

2/ Résultats et analyse des essais mécaniques :

a) Cisaillement de type non consolidé non drainé UU :

- L'angle de frottement interne : $3.00^\circ < \varphi < 15^\circ$
- La cohésion C : $0.20 < C_{uu} < 0.40$ (bar)

b) Cisaillement de type consolidé non drainé CU :

- L'angle de frottement interne : $5.00^\circ < \varphi < 18^\circ$
- La cohésion : $0.20 < C_{cu} < 0.26$ (bar)

c) Essai oedométrique :

- Le sol est sur-consolidé : $3.00 < P_c < 3.30$ (bar).
- L'indice de gonflement : $7.20 \% < C_g < 12.10 \%$.

L'analyse chimique sommaire reflète une forte agressivité du sol (présence de sulfates sous forme de gypse jusqu'à 1.87% et de chlorure Cl⁻ jusqu'à 0.21%).

Conclusion : le sol assiette de la cité des 185 logements présente des teneurs en eau et densités élevées, ce sol se trouve dans un état détrempé. C'est un sol consistant, plastique à très plastique, surconsolidé, compressible et gonflant. La coupe géotechnique (Fig.V.7) montre clairement la distribution des ces caractéristiques.

Quoi que le calcul des tassements ne concerne pas cette étude, un essai de calcul a donné des valeurs de tassement ne dépassant pas les 30 cm, alors sur le terrain les affaissements observés dépassent 70 cm.

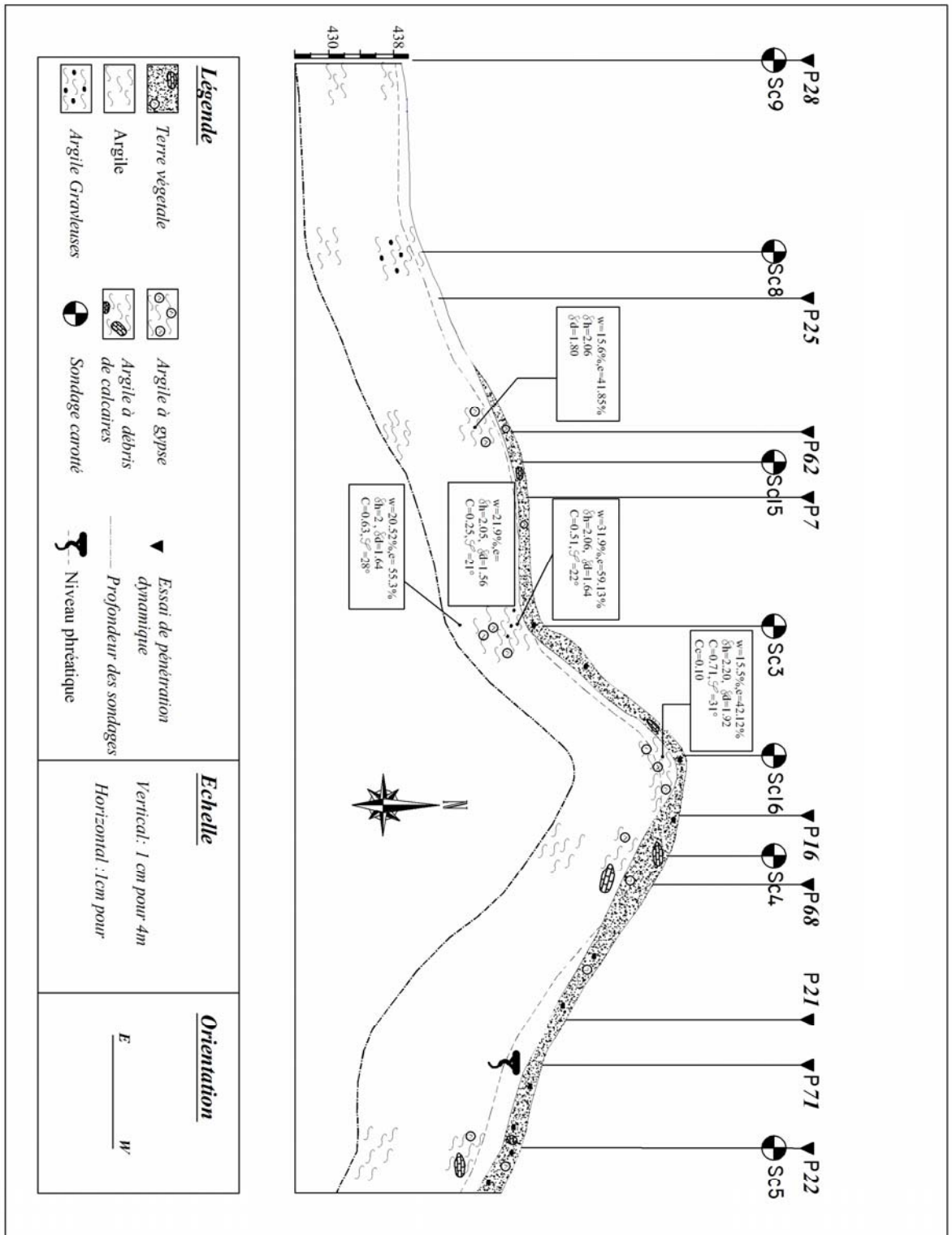


Fig.V.7 : Profil géotechnique du site des 185

Analyse hydrogéologique du site :

Deux analyses hydrogéologiques ont été tenues afin de localiser les niveaux d'eau. Au cours du mois de Décembre 2000, les appareils d'investigation à travers les pénétromètres dynamiques ont montré la présence d'eau dans quelques sondages à une profondeur de 5 m. Les sondages effectués à la fin de l'année 2004 ne confirment pas d'aquifère et le niveau piézométrique varie entre le mois de Décembre 2004 et le mois de Mars 2005 de 2.30 m à 1.20 m (OPGI de Mila, 2006).

Comme montré précédemment dans le chapitre II, le sous bassin de l'Oued Rhumel-Smendou contient deux systèmes aquifères caractérisants le sous bassin : un système karstique profond et une nappe superficielle libre. Mais les fluctuations de ces deux systèmes ne sont pas connus, surtout la nappe superficielle qui a une influence directe sur le comportement et les calculs liés au sol sur lequel reposent les ouvrages de génie civil. Pour cet objet, l'OPGI de Mila prend en considération ce manque hydrogéologique et fait placer des piézomètres dans les puits des sondages dans le site de 185 logements pour procéder à des mesures piézométriques et contrôler l'évolution de la nappe, et nous donner des résultats récents sous forme de graphes (fig.V.8 et 9). La figure (Fig.V.8) reflète l'évolution de la nappe pendant une semaine en novembre 2005 où la courbe piézométriques (2) présente l'état initial des niveaux d'eau dans les sondages ou les points d'eau et avant la retombée de pluie, mais après une semaine, le niveau de la nappe est augmenté (courbe piézométriques 1) : Moins en p2, et p7 et élevée en p4, p5, et p6. Mais en p1, et p3 la réponse de la nappe est nulle. Donc on peut constater, que les points d'eau p2, p4, p5, et p6, sont en relation directe avec la nappe superficielle, et p1, p3, et p7 sont en liaison avec le système karstique.

On note le même comportement marqué pour les courbes d'évolutions des niveaux d'eaux dans les sondages S1A, S2A, et S3A (Fig.V.9). Cette idée est confortée par l'histogramme des précipitations mensuelles qu'il montre qu'à la saison d'hivers (Décembre, Janvier, et Février), les précipitations atteignent leurs maximums, même que pour le niveau de la nappe. Ceci nous conduit à dire que les eaux d'infiltration sont le responsable de l'augmentation des niveaux de la nappe.

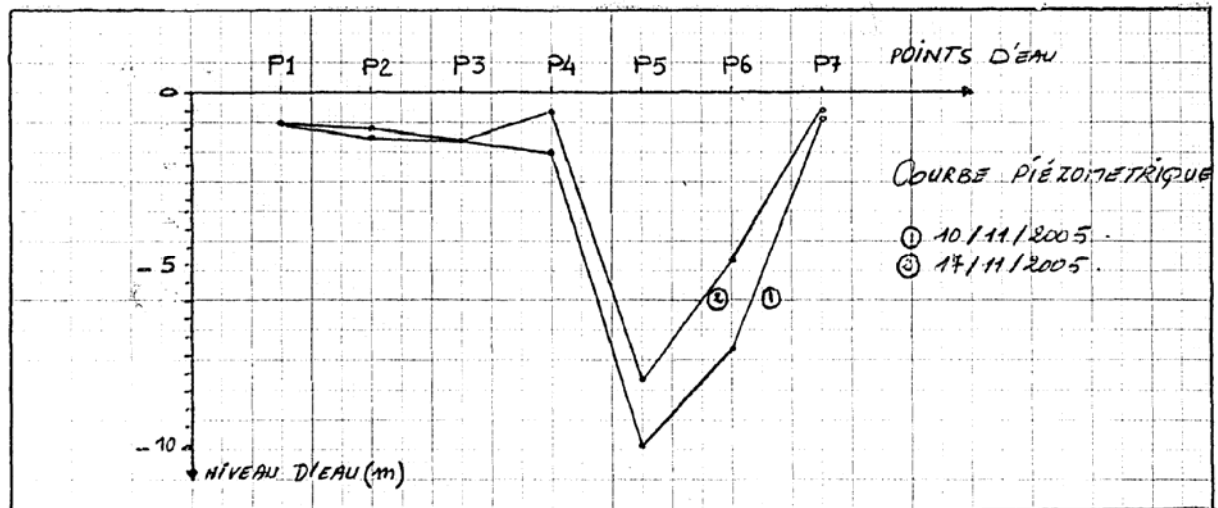


Fig.V.8 : Evolution du niveau d'eau dans les piézomètres

(Selon les données de l'OPGI de Mila, 2006).

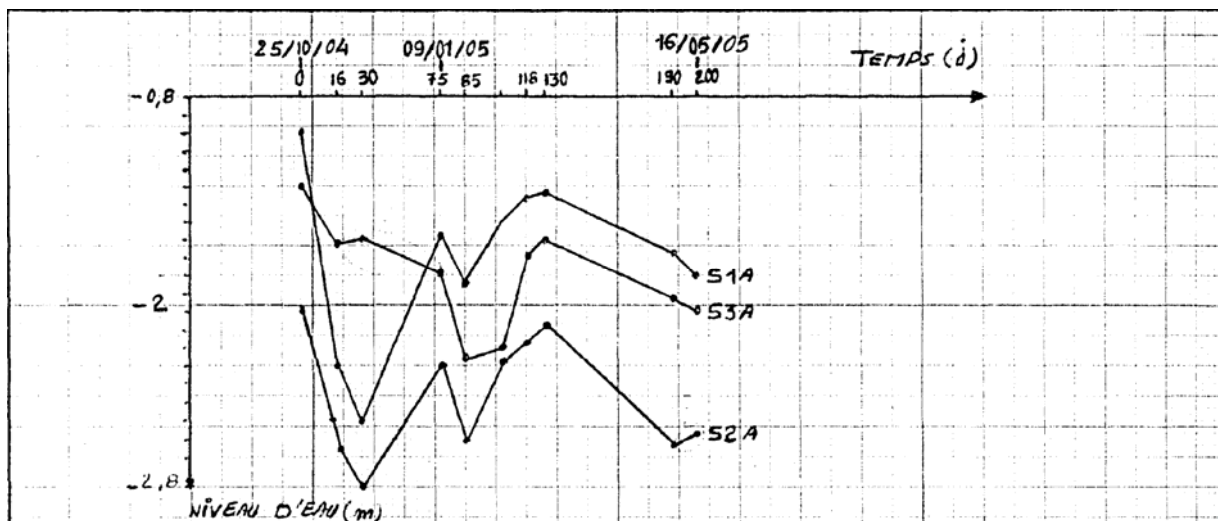


Fig.V.9 : Evolution du niveau d'eau dans les sondages

(Selon les données de l'OPGI de Mila, 2006).

A.4/ Les solutions proposées :

Pour remédier aux problèmes d'instabilité de la cité des 185 logements, nous jugeons nécessaire de suivre cette approche :

1- Actions sur l'eau :

- L'élimination des infiltrations superficielles issues de la pluie et du ruissellement par réalisation d'un système de drainage et d'éperons drainants.

- Le captage de toutes les sources et leur évacuation au moyen des tranchées drainantes et captage des infiltrations profondes.

- L'adoucissement de la pente du versant.

2- Actions mécaniques :

Il s'agit de réaliser deux rangés de pieux ancrés à 10 m de profondeur à l'aval pour minimiser le mouvement de la partie glissante.

Le problème des tassements sera résolu par la méthode de *Substitution* : cette méthode est valable pour toute catégorie de terrains lorsque la profondeur à traiter est faible, inférieure à 3 ou 4 m. On peut envisager la substitution qui consiste à terrasser par phases à la pelle mécanique, jusqu'à la profondeur voulue et à mettre en place des ballasts ou de gros béton.

Pour résoudre le problème de stabilité du mur qui a subi un déplacement horizontal et qui peut produire un risque emmenant sur les blocs proches, il est recommandé de réaliser un autre mur adjacent reposant sur une série de pieux et la démolition de l'ancien mur.

3- Confortement des blocs endommagés :

Concernant les blocs endommagés, une solution de confortement en béton armé est nécessaire tout en commençant par le renforcement des fondations. Ce type de renforcement consiste à réaliser des pieux chaînés dans le sens transversal au moyen de longrines à mi-niveau. Pour sauver l'ossature déjà existante, il est proposé à un chemisage par voiles en béton armé du premier niveau en vue d'augmenter la rigidité de la structure d'une part et de bloquer les déplacements survenus d'autre part. Cette solution nous oblige à transformer les logements d'habitation des rez de chaussée en locaux commerciaux.

III.B/ Glissement Z.H.U.N de Mila :

B.1/ Introduction

La Zone d'Habitat et d'Urbanisme Nouvelle (ZHUN) se situe à l'Ouest de la ville de Mila, d'une superficie de 400000m², cette zone forme un talus dans lequel se trouvent plusieurs édifices de services publics (Wilaya, polyclinique et protection civile) et de logements (Fig.V.10). Au pied de ce talus, existe un projet d'une autoroute. Lors de la réalisation de cette dernière, le chantier a rencontré des problèmes d'instabilité (Fig.V.11) :

- déplacement de quelques regards par rapport à l'axe initial dans le sens du versant.
- apparition de fissures dans les murs et les escaliers de la wilaya et une partie de la polyclinique adjacente et d'autres fissures sur le talus.

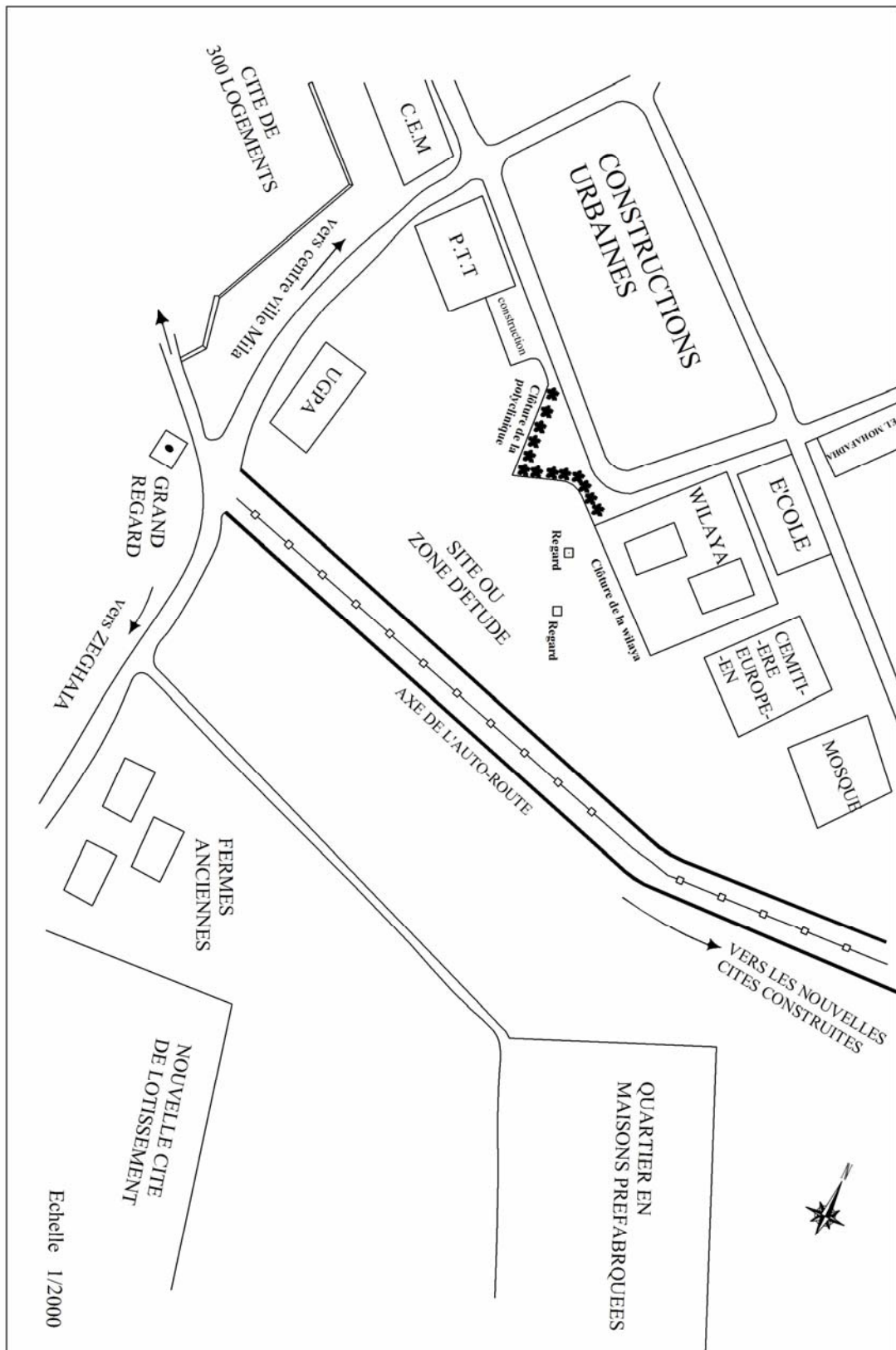
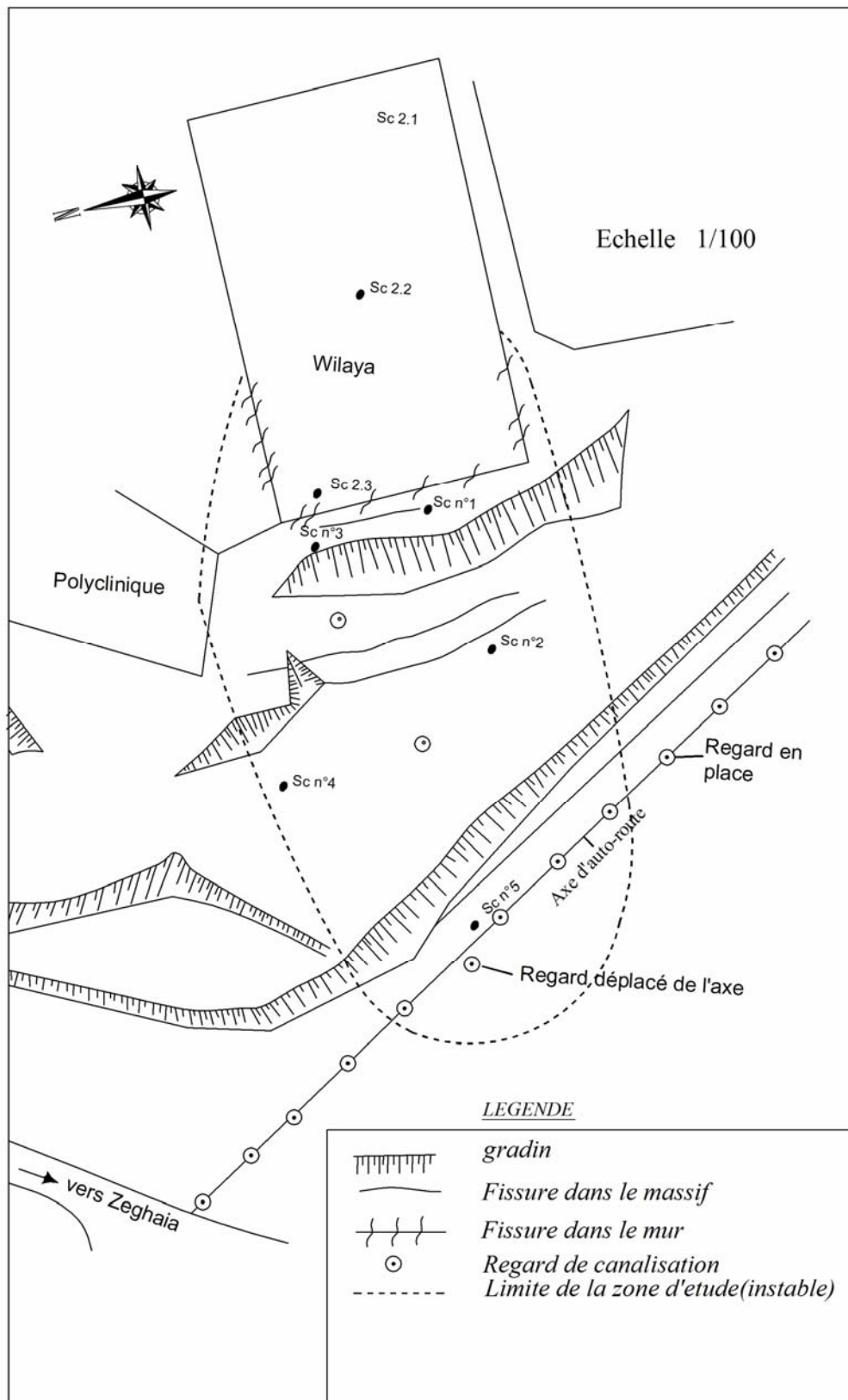


Fig. V.10 : Plan de situation de la ZHUN de Mia.

Fig.V.11 : Plan d'implantation des ouvrages de reconnaissance.



- destruction de la canalisation reliant la wilaya avec la canalisation principale passant par l'axe de l'autoroute et qui se traduit par la sortie des eaux usées à la surface du talus.

Pour connaître l'état naturel du corps considéré instable et estimer son état critique, cinq sondages carottés équipée par des piézomètres, ont été exécutés par le LTP/EST (Fig.V.11).

La description des carottes et leur analyse des paramètres physiques à différentes profondeurs montre que :

- le sol est formé de deux couches principales, une couche supérieure constituée essentiellement par des argiles limoneuses légèrement sablo-graveleuses qu'on nomme couche de couverture d'une épaisseur variable (jusqu'à 8m) et une couche en place formée par des argiles limoneuses pures, de couleur grise, parfois rouge. On note la présence de lentilles de sables et des niveaux carbonatés dans cette couche.

- un pourcentages des particules fines ($\emptyset < 80\mu\text{m}$) très élevé ($> 70\%$). Le pourcentage des argiles est supérieur à celui des limons.

- présence d'un sol fin (argile limoneuse), consistant à l'état plastique, très plastique à plastique par endroit (Fig.V.12). Les limites d'Atterberg montrent ainsi que la majorité des argiles, qui s'individualisent sur l'abaque de plasticité de Casagrande, est essentiellement illitique contrairement à la Montmorillonite qui a une présence très faible (Fig.V.13).

- l'analyse chimique sommaire a reflété la présence des sulfates sous forme de gypse avec des taux variables et allant jusqu'à 39.6% dans le SC2. On peut déduire aussi que la distribution de la teneur en insolubles, en CaCO_3 et en gypse n'est pas uniforme dans le talus, de cette manière, elle va influencer sur les propriétés physico-mécaniques.

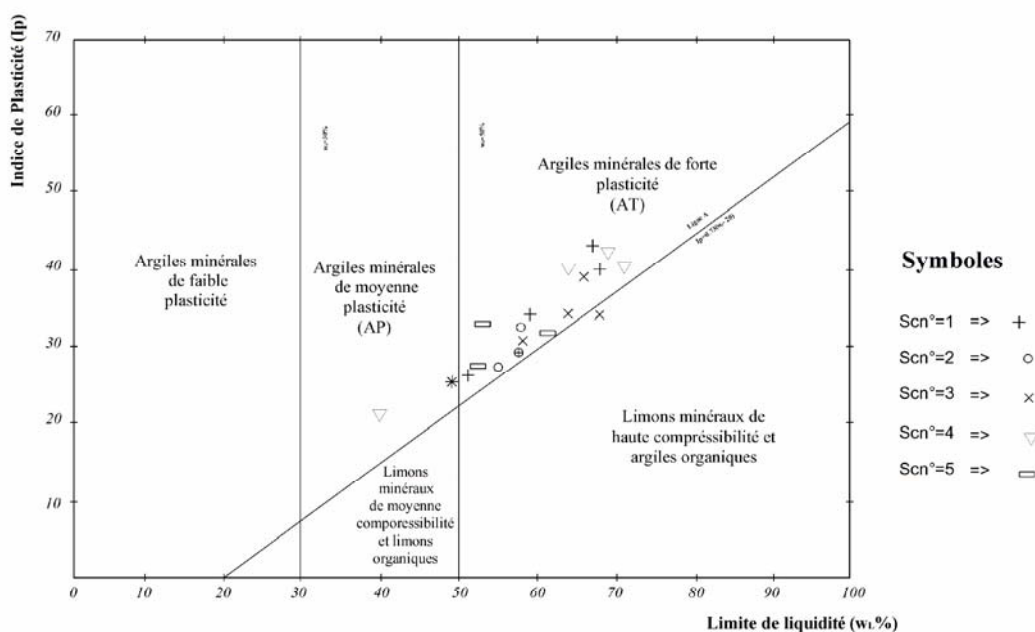


Fig.V.12 : Classification des sols selon le diagramme de Casagrande.

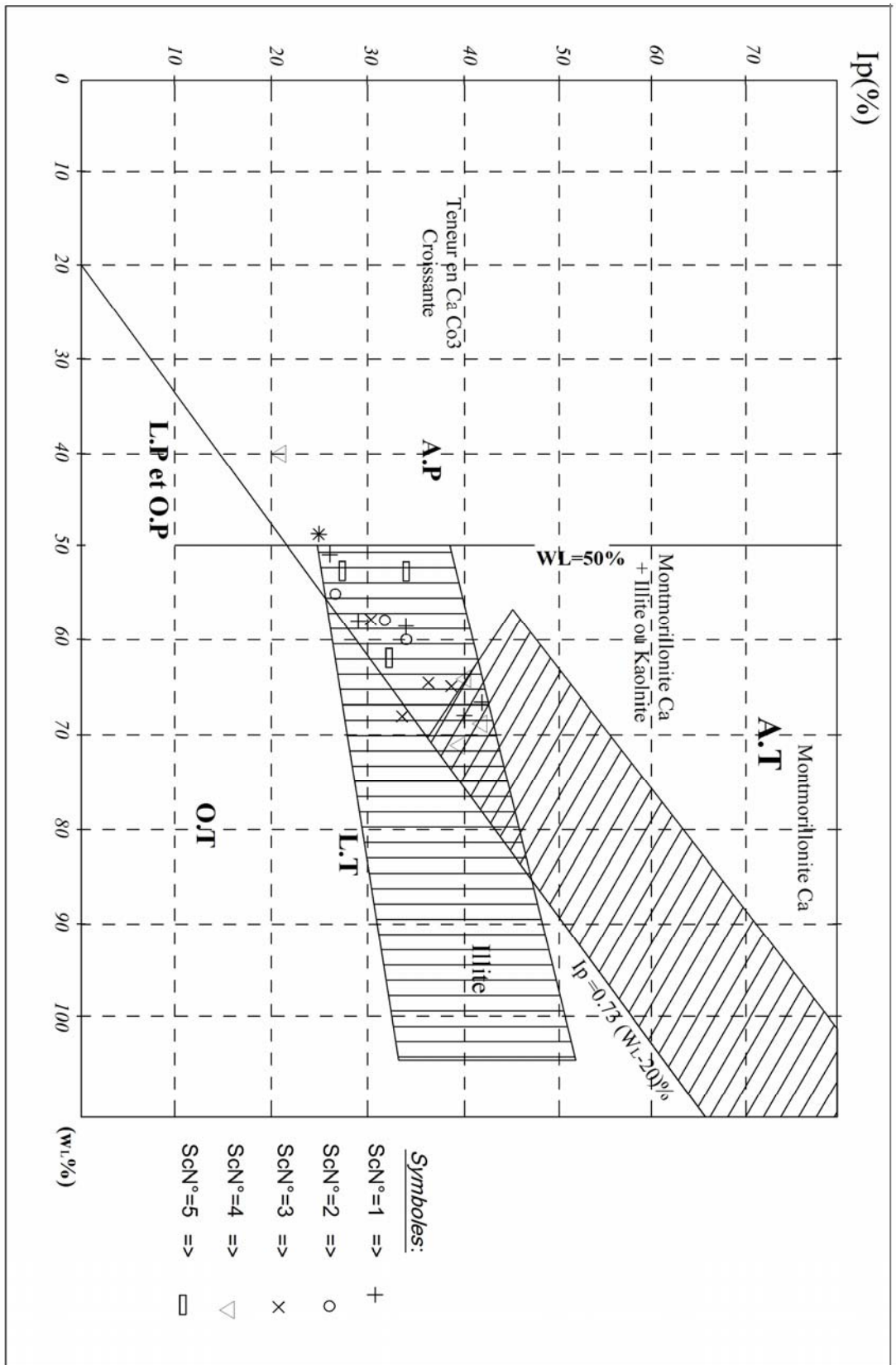


Fig. V.13 : Diagramme de Casagrande et individualisation des espèces argileuses.

B.2/ Caractéristiques d'identification :

Teneurs en eau naturelles dans le talus : le tableau V.6 montre que les valeurs des teneurs en eau naturelle dans le talus considéré instable sont élevées, elles varient comme suit :

SC 1 : $15\% < W < 25.46\%$, SC 2 : $19.51\% < W < 23\%$, SC 3 : $16.09\% < W < 30\%$, SC 4 : $21.55\% < W < 27.74\%$ et SC 5 : $17.24\% < W < 25\%$. Ces teneurs en eau sont enregistrées sur des échantillons à différentes profondeurs, on peut facilement déterminer leur répartition dans le massif étudié (Fig.V.14).

Changement des W entre les sondages : le changement de la teneur en eau entre SC N°2 et 5 n'est pas très remarquable, ni verticalement ni latéralement, par contre cette variation est remarquée dans le niveau (485m-476m) du SC N°1 par rapport au SC N°2 et 5, elle est de 6% au maximum. La teneur en eau du SC N°3 est supérieure par rapport aux SC N° 4 et 5 avec une variation de 6 à 7% au maximum, par contre elle n'est pas très remarquable entre SC N°4 et 5. Entre SC N°1 et 3, la variation latérale et même verticale est bien remarquable surtout entre le niveau 497m et 477m des deux sondages. Le tableau V.6 montre clairement cette variation.

Hypothèses expliquant la cause de cette variation :

On sait bien que le terrain de couverture au niveau de ces deux sondages est d'épaisseur assez élevée (qui peut arriver à 8m) d'où les propriétés physiques ne seront pas semblables 100% et peuvent présenter des variations. La teneur en eau au niveau du SC N° 3 est plus élevée par rapport à celle du SC N° 1, cela est dû à la rupture de la canalisation des eaux d'assainissement près du SC N° 3 qui fait augmenter la porosité du sol à cet endroit par infiltration des eaux usées. Par contre, la faible teneur en eau au niveau du SC N° 1 s'explique par la faible valeur de porosité du sol et aussi par la descente des eaux libres gravifiques infiltrées vers les lentilles sableuses par gravité.

Poids volumique humide (γ_h), sec (γ_d) et degré de saturation (S_r) dans le talus :

Le tableau V.7 et figure V.15 montre une répartition presque uniforme de γ_d avec de petites variations, cela est dû à la nature lithologique du terrain qui présente des variations de la teneur en gypse et carbonate de calcium (CaCO_3). Par contre dans le sondage SC N° 1 entre le niveau 494.5m et 476.5m, on note un poids volumique sec plus élevé par rapport aux autres sondages, cette augmentation de γ_d est due par la faible porosité du sol dans ce niveau.

Quant au poids volumique humide, sa répartition (Fig. V.16) ne présente pas de variations remarquables et importantes, les poids volumiques humides sont presque uniformes à l'exception du SC N° 1 où les valeurs paraissent un peu élevées, cela est dû toujours à la nature lithologique du terrain et à la faible porosité du sol.

N° du sondage et sa côte	Niveau d'échantillonnage	W (%)	Porosité
SC N°1 Côte 497.90 m	459.50	15.02	-
	493.10	18.00	-
	490.60	21.51	0.35
	486.60	17.91	0.346
	482.35	14.20	0.310
	477.35	13.22	0.285
	475.05	25.46	-
	473.15	24.39	-
SC N° 2 Côte 487.80 m	485.60	19.51	-
	483.25	22.50	-
	477.00	23.07	-
	473.50	21.95	-
SC N° 3 Côte 496.90 m	494.45	16.09	-
	491.75	30.61	0.337
	489.10	27.92	0.418
	487.10	25.00	0.397
	485.10	25.80	-
	482.60	27.04	0.425
	478.15	27.56	0.408
	474.90	23.35	-
	472.75	25.62	-
SC N° 4 Côte 485.25 m	482.75	21.55	-
	480.45	23.75	-
	479.00	23.63	-
	477.08	27.74	-
	475.10	27.27	-
	472.60	23.78	-
	470.90	25.15	-
	470.90	25.15	-
SC N° 5 Côte 477.25 m	476.00	17.24	-
	474.45	25.04	-
	472.75	22.83	-
	470.50	23.92	-
	468.45	23.35	-
	467.50	18.96	-

Tableau V.6 : Evaluation numérique des teneurs en eau naturelles.

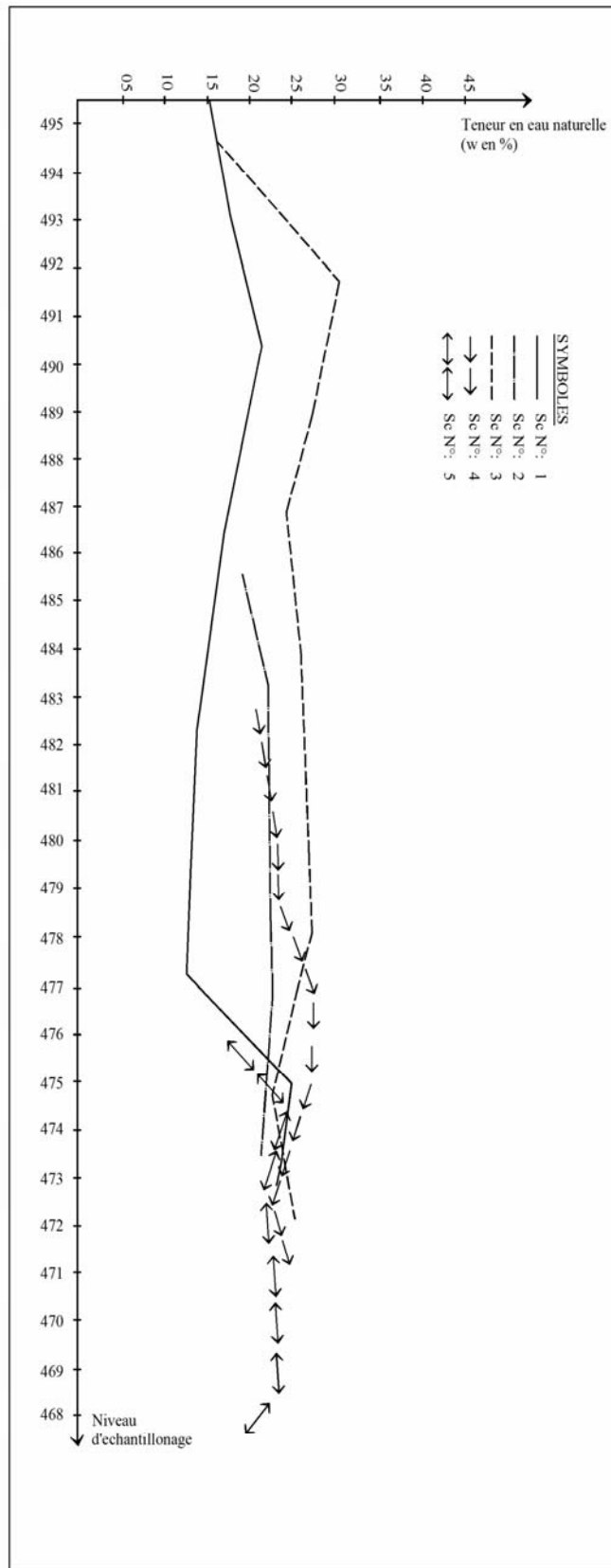


Fig. V.14 : Répartition des teneurs en eau naturelles dans le corps étudié.

Les valeurs du degré de saturation sont très élevées, elle sont supérieures à 80% dans les niveaux supérieurs et arrivent à 100% dans les niveaux inférieurs.

N° de sondage et sa côte	Niveau d'échantillonnage	γ_d (Kn/m ³)	γ_h (Kn/m ³)	Sr (%)
SC N° 01 Côte 479.9m	495.50	17.3	19.9	95.38
	493.10	18.6	22.0	76.45
	490.60	17.2	20.9	100.00
	486.60	17.3	20.4	89.80
	482.35	18.3	20.9	83.93
	477.35	18.9	21.4	87.90
	475.05	16.1	20.2	100.00
	473.15	16.4	20.4	100.00
SC N° 02 Côte 487.8m	485.60	16.4	19.6	90.00
	483.25	16.0	19.6	90.00
	477.00	16.8	20.9	100.00
	473.50	16.4	20.0	94.17
SC N° 03 Côte 496.9m	494.45	17.4	20.4	83.92
	491.75	14.7	19.2	100.00
	489.10	15.4	19.7	100.00
	487.10	16.0	20.0	100.00
	485.10	15.5	19.5	94.13
	482.60	15.9	20.2	100.00
	478.15	15.6	19.9	100.00
	474.90	16.7	20.6	100.00
472.35	16.0	20.1	100.00	
SC N° 04 Côte 485.25m	482.75	16.7	20.3	95.38
	480.45	16.0	19.8	94.30
	479.00	16.5	20.4	100.00
	477.08	15.5	19.8	100.00
	475.10	15.4	19.6	100.00
	472.60	16.4	20.3	100.00
470.90	15.9	19.9	99.84	
SC N° 05 Côte 477.25m	476.00	17.4	20.4	86.73
	474.45	15.5	19.4	100.00
	472.75	16.2	19.9	94.61
	470.50	16.3	20.2	100.00
	468.45	16.7	20.6	100.00
467.50	17.4	20.7	91.70	

Tableau V.7 : Evaluation numérique de γ_h , γ_d et Sr.

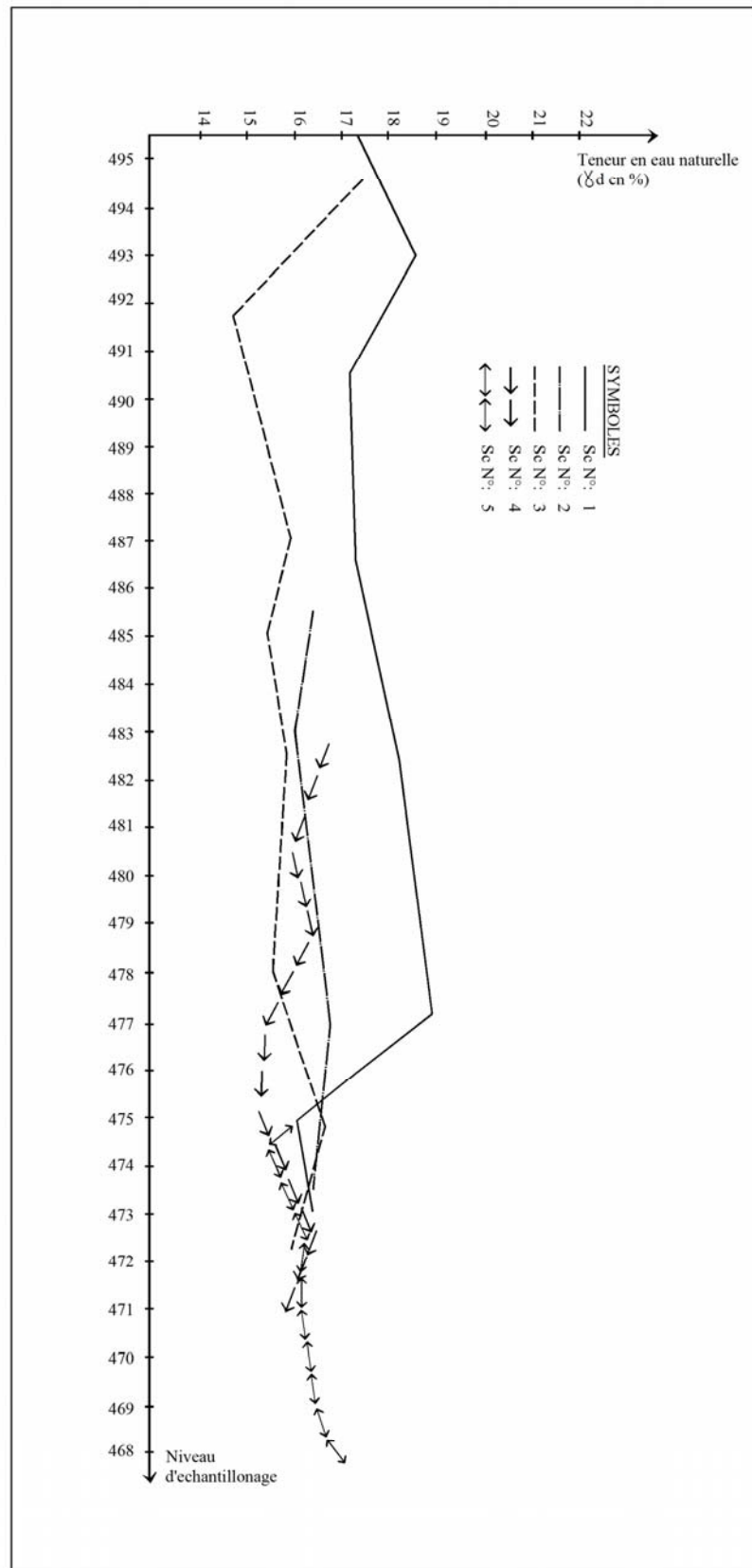


Fig.V.15 : Répartition des γ_h de dans le corps

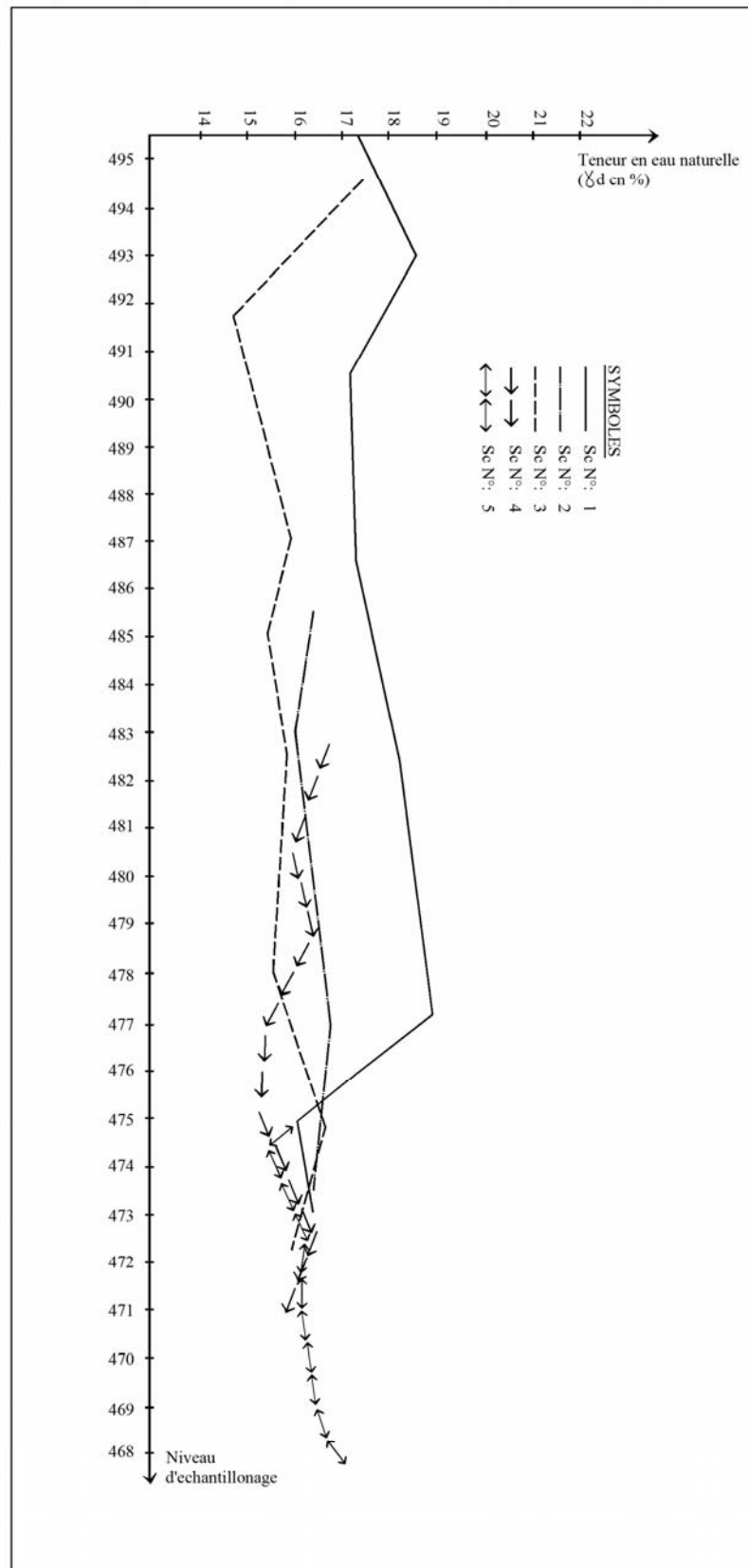


Fig.V.15 : Répartition des γ_d de dans le corps

B.3/ Hydrogéologie du site :

La carte piézométrique du site de la ZHUN de Mila (Fig.V.17) présente, dans sa partie Nord-Est, des niveaux piézométriques relativement écartés par rapport aux autres parties. On peut constater la variation du gradient hydraulique qui est faible au Nord-Est dont la valeur est égale à 0.1. Par contre, dans le reste de la carte, ce gradient est relativement fort avec une valeur de 0.2. On peut dire alors que la partie Nord-Est du site est représentée par une perméabilité élevée, cela est fonction de la porosité.

Le sens d'écoulement des eaux souterraines est en général Est-Ouest, à l'exception de la partie Nord-Est qui est SE-NW. Les niveaux piézométriques mesurés dans chaque sondage sont supérieurs dans des lentilles de sable et niveaux carbonatés rencontrés, et comme le terrain est formé d'argile limoneuse, on peut dire que ces lentilles alimentent les argiles continuellement en formant une petite nappe superficielle.

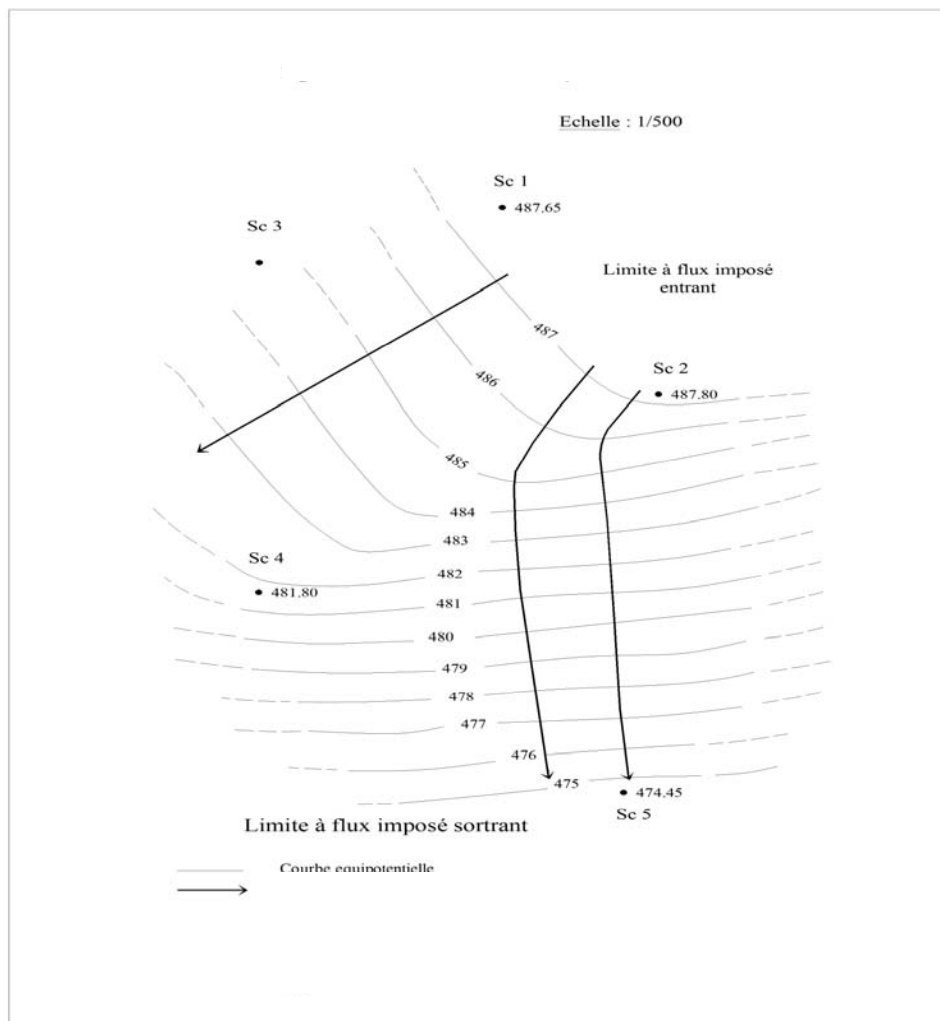


Fig.V.17 : Carte piézométrique du site de la ZHUN de Mila.

B.4/ Caractéristiques mécaniques des sols de la ZHUN de Mila :

On remarque à partir du tableau V.8 que les valeurs de l'indice de compressibilité varient de 0.083 à 0.300 montrant ainsi que les argiles sont compressibles à assez fortement compressibles et se sont des argiles raides à moyenne. L'indice de gonflement de ces argiles est élevé, il varie de 0.055 à 0.125 (5.5% à 12.5%), se sont donc des argiles gonflantes. Les valeurs de pression de consolidation (P_c) sont élevées. Elles sont supérieures avec celles de la pression effective exercée par la colonne du sol actuelle, donc on peut conclure que le sol est sur-consolidé, sauf au niveau 474,9m du SC N° 3 qui est sous-consolidé (Tableau. V.8).

sondage	Niveau d'échantillon	Ic	Pc (bar)	Cc	Cg	Nature du sol
SC N°1	477.35	1.25	5.00	0.300	0.125	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante moyennement, compressible
SC N°2	477.00	1.24	3.60	0.155	0.086	Argile consistante, sur-consolidée, gonflante, assez fortement compressible
SC N°3	487.10	1.03	3.00	0.220	0.082	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante, assez fortement compressible
	474.90	1.10	3.00	0.083	0.076	Argile consistante, sous-consolidée, très gonflante, peu compressible
SC N°4	480.45	0.90	2.80	0.216	0.112	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante, assez fortement compressible
	477.08	1.08	2.80	0.209	0.105	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante, assez fortement compressible
SC N°5	476.00	1.05	5.00	0.204	0.055	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante, assez fortement compressible
	470.50	1.19	3.00	0.226	0.089	Argile consistante, sur-consolidée, très gonflante, assez fortement compressible

Tableau V.8 : Résultats des essais oedométriques.

Les essais non consolidé non drainés (U,U) à la boîte de Casagrande ont pour but d'étudier le comportement du sol à court terme et de déterminer ou apprécier les caractéristiques mécaniques apparents du sol (C_{uu} et ϕ_{uu}) pour pouvoir calculer la stabilité du talus. Les résultats de ces essais sont récapitulés dans le tableau V.9. Les valeurs de cohésion à différentes profondeurs sont faibles, elles varient de 0.00 à 0.60 bar, la conséquence de cette variation est la répartition anarchique des carbonates de calcium ($CaCO_3$) et du gypse dans le sol du talus. Les valeurs maximales de C_{uu} (0.6 et 0.566 bar)

sont mesurées dans le niveau 482.8m du SC N° 3 et 476.0m du SC N° 5, cette élévation de la cohésion est expliquée par la présence de grande teneur en CaCO_3 , la circulation de l'eau va créer un mince dépôt de CaCO_3 jouant le rôle d'un colle entre les grains.

N° de sondage	Niveau d'échantillonnage	Cuu (bar)	ϕ_{uu} (degré)
SC N° 1	490.60m	0.00	6.4
	477.35m	0.040	30
SC N° 2	483.25m	0.200	2.5
SC N° 3	494.45m	0.250	20
	485.10m	0.083	12.4
	474.85m	0.00	7.07
SC N° 4	482.80m	0.566	12.30
	480.45m	0.300	7.12
	475.15m	0.106	0.57
	472.60m	0.190	6.56
SC N° 5	476.00m	0.600	5.42
	472.75m	0.250	7.12
	470.05m	0.150	2.29

Tableau V.9 : Résultats de cisaillement rectiligne.

Les angles de frottement interne ont aussi des valeurs très réduites, les valeurs exceptionnelles mesurées sont assez élevées surtout dans le sondage SC N° 1 (niveau 477.35m) où $\phi_{uu} = 30^\circ$ et le SC N° 3 (niveau 494.45m) où $\phi_{uu} = 20^\circ$, ceci est dû à la nature du matériau où il y a la présence d'une concentration importante de sable dans ces deux échantillons.

Conclusion :

L'analyse des résultats des essais de laboratoire sur des échantillons des sondages carottés exécutés au niveau du talus (SC N°1, 2, 3, 4 et 5) et ceux exécutés antérieurement à l'intérieur du siège de la wilaya avant sa construction, ont donné pratiquement les mêmes résultats. L'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg et l'analyse minéralogique montrent que le sol est formé par des argiles limoneuses très plastiques à plastiques. La saturation en eau des échantillons et le niveau d'eau enregistré dans les sondages, confirment l'existence d'une nappe superficielle. L'analyse chimique sommaire montre une présence du gypse qui va

influer négativement sur le sol. Les essais mécaniques reflètent un sol gonflant, compressible et surconsolidé dont la cohésion et l'angle de frottement interne sont généralement faibles. La variation des caractéristiques mécaniques est fonction de la distribution anarchique des carbonates de calcium (CaCO_3) et du gypse dans le sol.

B.5/ Pronostic de stabilité du talus :

Les fissures qu'elles sont apparues au niveau du talus et sur les murs de la wilaya, ainsi que le déplacement des regards de canalisation principale, nous laissent supposer l'instabilité du talus situé derrière la wilaya et qu'il est fort probable qu'il y aurait un glissement de terrain. Cela nous fait l'obligation de calculer le coefficient de sécurité (F_s) du talus. On prend le coefficient de sécurité admissible égal à 1.5, si $F_s < 1.5$: talus instable et si $F_s \geq 1.5$: talus stable (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003). On a choisi pour le calcul du coefficient de sécurité la méthode de Fellenius parce que le terrain est presque homogène, constitué par un sol fin essentiellement argilo-limoneux plastique dont on note la présence d'une nappe d'eau. S'il y aurait une rupture dans le talus elle ne se produit pas simultanément en tous points, elle commence au contraire en un point, puis se propage suivant une surface de rupture circulaire. Il n'y a pas de mouvement en bloc, le sol du talus se déforme progressivement.

Détermination des cercles de glissement et leurs coefficients de sécurité :

Pour déterminer les cercles de glissement et leurs coefficients de sécurité (F_s), on a choisi un profil topographique Est-Ouest qui passe presque par le centre du talus (Fig. V.18). On trace plusieurs cercles dont les centres seront situés sur la droite OD. Les F_s calculés pour chacun de ces cercles permettra de trouver le cercle le plus défavorable (cercle de rupture).

Estimation du danger d'instabilité du talus :

D'après les résultats énoncés dans le tableau V.10, on remarque que le F_s calculé pour chaque cercle est inférieur à 1.5, il varie de 0.89 à 1.14 ce qui confirme que le talus est instable. Le cercle le plus défavorable a un $F_s = 0.89$ avec un rayon $R = 59.5\text{m}$ et qui est un cercle profond, la surface de rupture atteint les vingtaines de mètres de profondeur, ce qui met en danger aussi les édifices situés tout autour du talus (la wilaya et l'autoroute). Pour cela il faut penser à des solutions efficaces et très rapides pour stopper le déplacement et sauver les constructions menacées par ce danger.

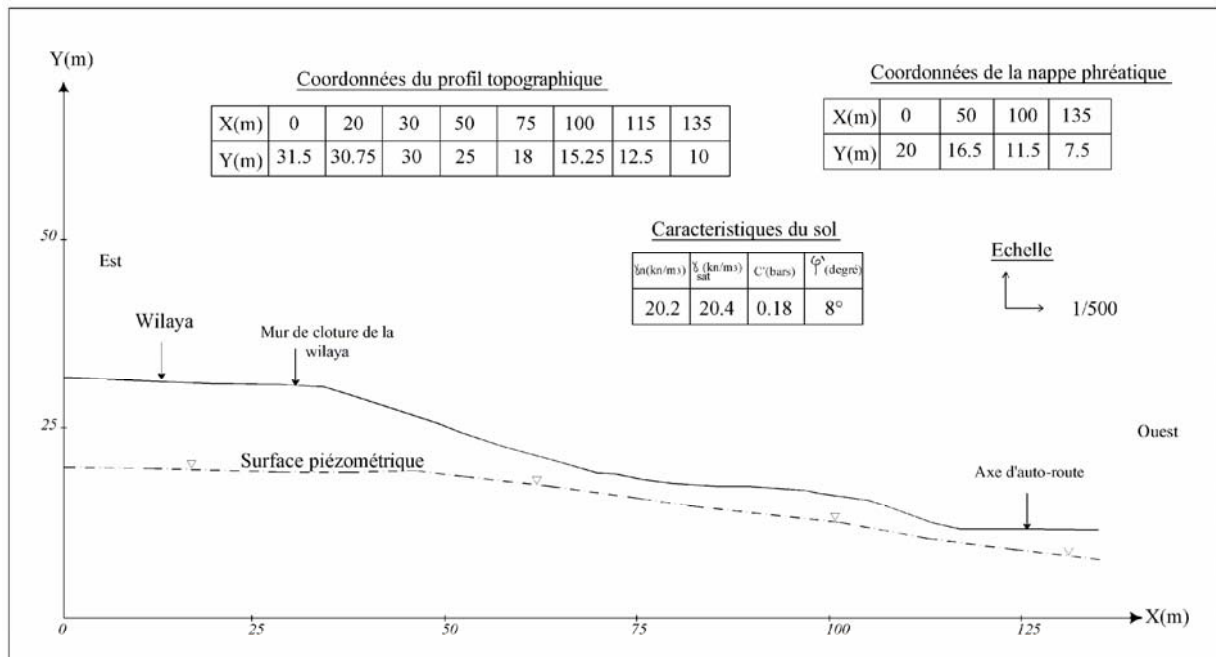


Fig V.18: Profil topographique de la coupe synthétique choisi pour le calcul des Fs.

Centre du cercle	Rayon (m)	Type du cercle de rupture	Fs Fellenius	Observation sur le cercle
01 (x = 80.50m, y = 54.50m)	52	Cercle de talus	0.97	instable
02 (x = 84.50m, y = 59.0m)	54	Cercle de talus	1.14	Instable
03 (x = 82.00m, y = 56.50m)	59.5	Cercle de rupture profonde	0.896	Instable
04 (x = 89.00m, y = 65.50m)	65	Cercle de rupture profonde	1.04	Instable
05 (x = 87.50m, y = 63.0m)	68	Cercle de rupture profonde	1.043	Instable
06 (x = 91.50m, y = 67.50m)	69	Cercle de rupture profonde	1.028	Instable
07 (x = 94.50m, y = 71.50m)	72	Cercle de rupture profonde	0.911	Instable

Tableau V.10 : résultats de calcul des coefficients de sécurité.

B.6/ Solutions choisies contre le glissement :

1^{ère} variante : On propose l'implantation d'un rideau de palplanche avec des tranchées drainantes; il doit dépasser la surface du glissement la plus critique pour réagir contre ces mouvements. Ce rideau doit être réalisé parallèlement au mur de clôture de la wilaya et par conséquent, perpendiculaire au sens du massif déplacé et parallèle au sens d'écoulement des eaux souterraines.

Le lieu de l'implantation doit être choisi de telle sorte qu'il élimine une bonne partie de terres en mouvement dans le but de diminuer les mouvements mobilisables. Pour stabiliser le glissement, le rideau de palplanche ne semble pas suffisant, on propose la réalisation des gradins dans le but de diminuer l'effet des moments moteurs (Fig.V.19).

L'abaissement du niveau de la nappe nous permet de diminuer la pression interstitielle. Le F_s calculé après réalisation de ce rideau de palplanche devient $F_s = 1.51$ en gardant les mêmes coordonnées l'ancien cercle critique.

2^{ème} variante : Réalisation d'un système de gradin avec implantation de pieux bétonnés in-situ (Fig.VII.20); le nouveau F_s calculé après réalisation de gradins et création de nouveau profil topographique devient $F_s = 0.955$. Donc il paraît nécessaire d'implanter des pieux pour assurer la stabilité du talus. La disposition des pieux dans un rang sur une distance de 3.8m garantit l'homogénéité du sol, c'est-à-dire les contraintes tangentielles ne peuvent pas dépasser les contraintes admissibles. La distance de 11.15m entre les rangs permet distribuer uniformément toutes les pressions sur chaque pieu. Le calcul exécuté donne la possibilité d'estimer que le nombre de ces rangs doit être deux (2), mais avec le rang de protection on aura trois (Fig.VII.21).

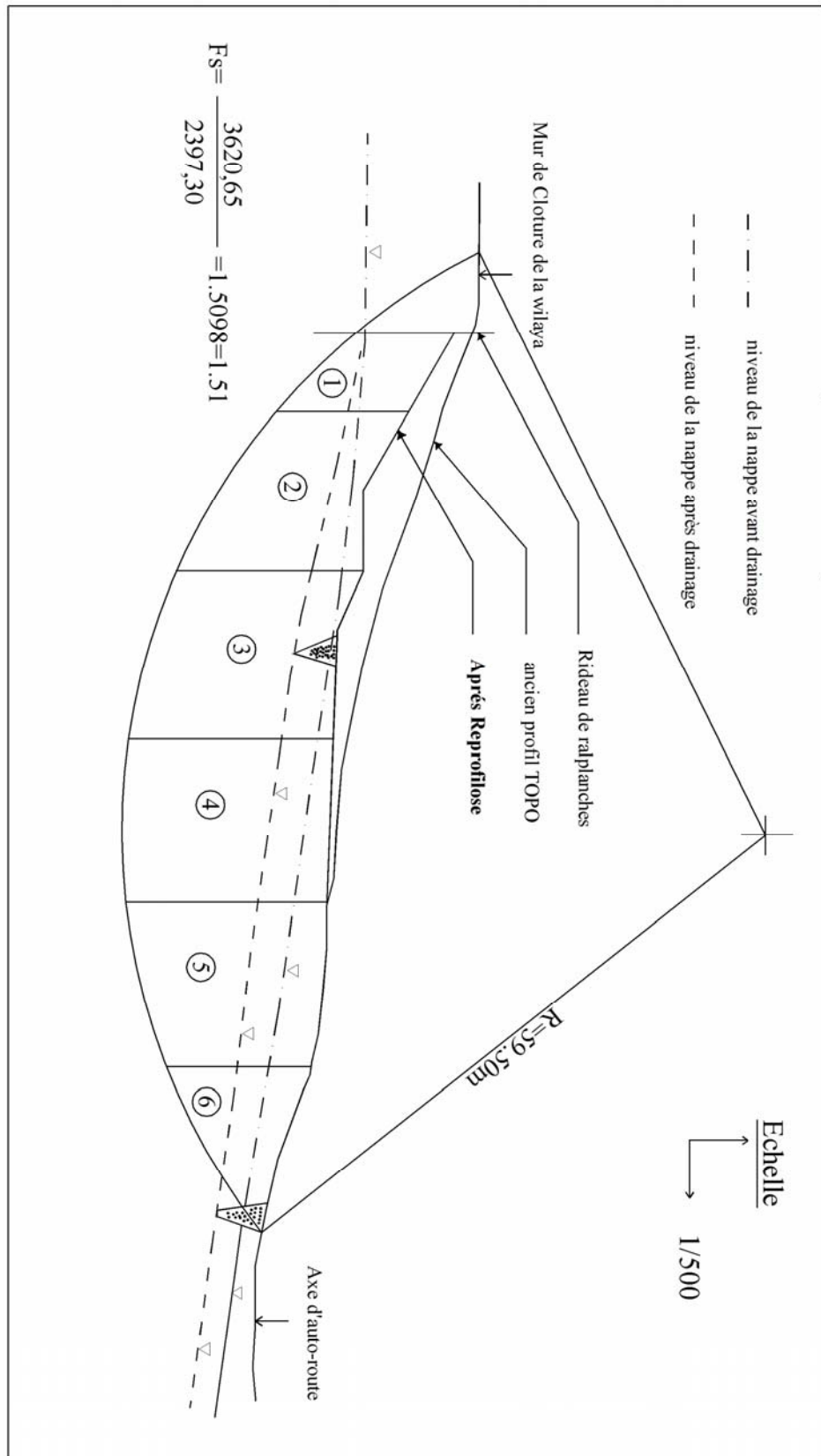


Fig.V.19 : Schéma proposé pour les calculs.

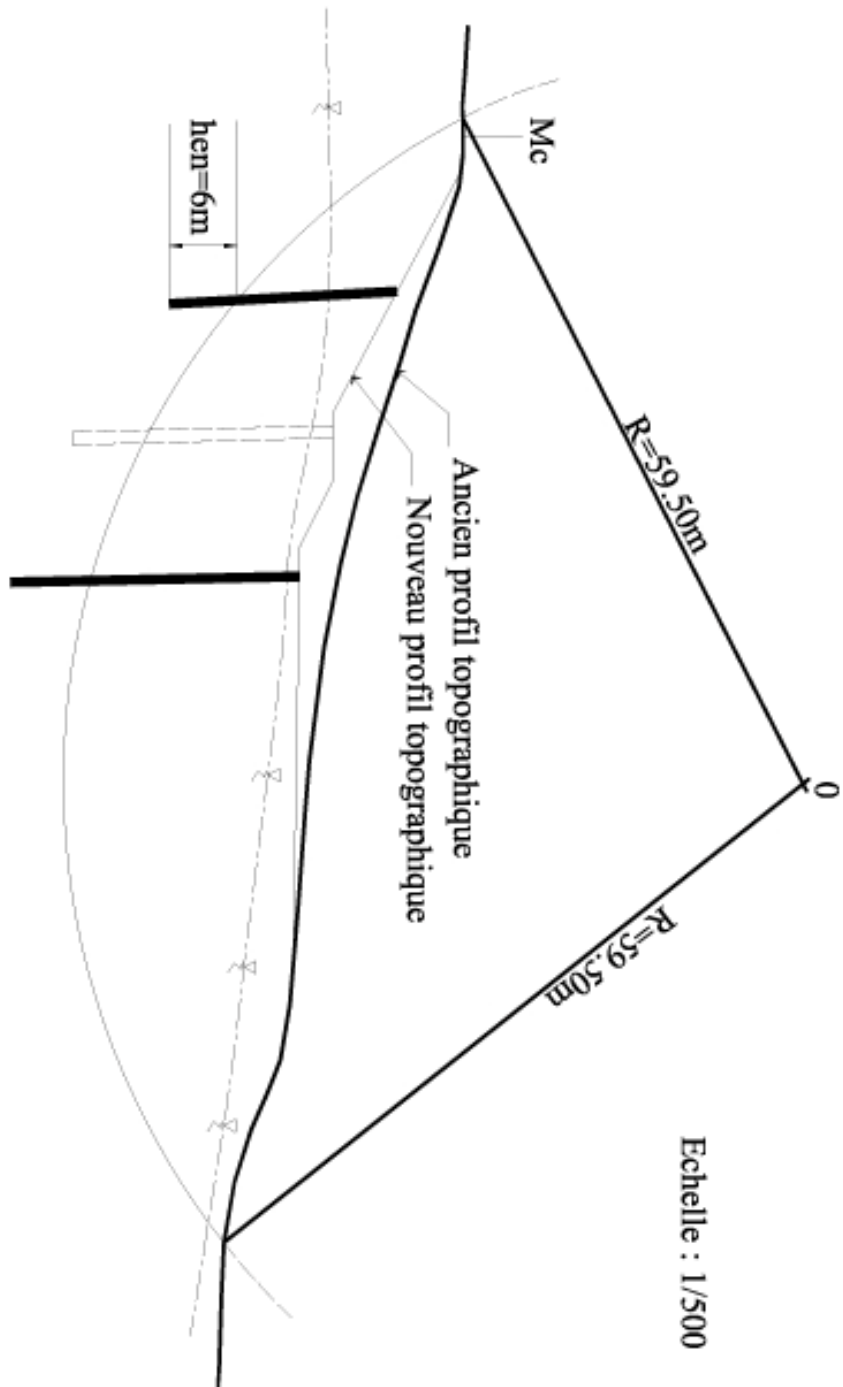


Fig V.20 : Schéma de la nouvelle forme du talus avec implantation des pieux bétonés " in situ" (Vue en coupe)

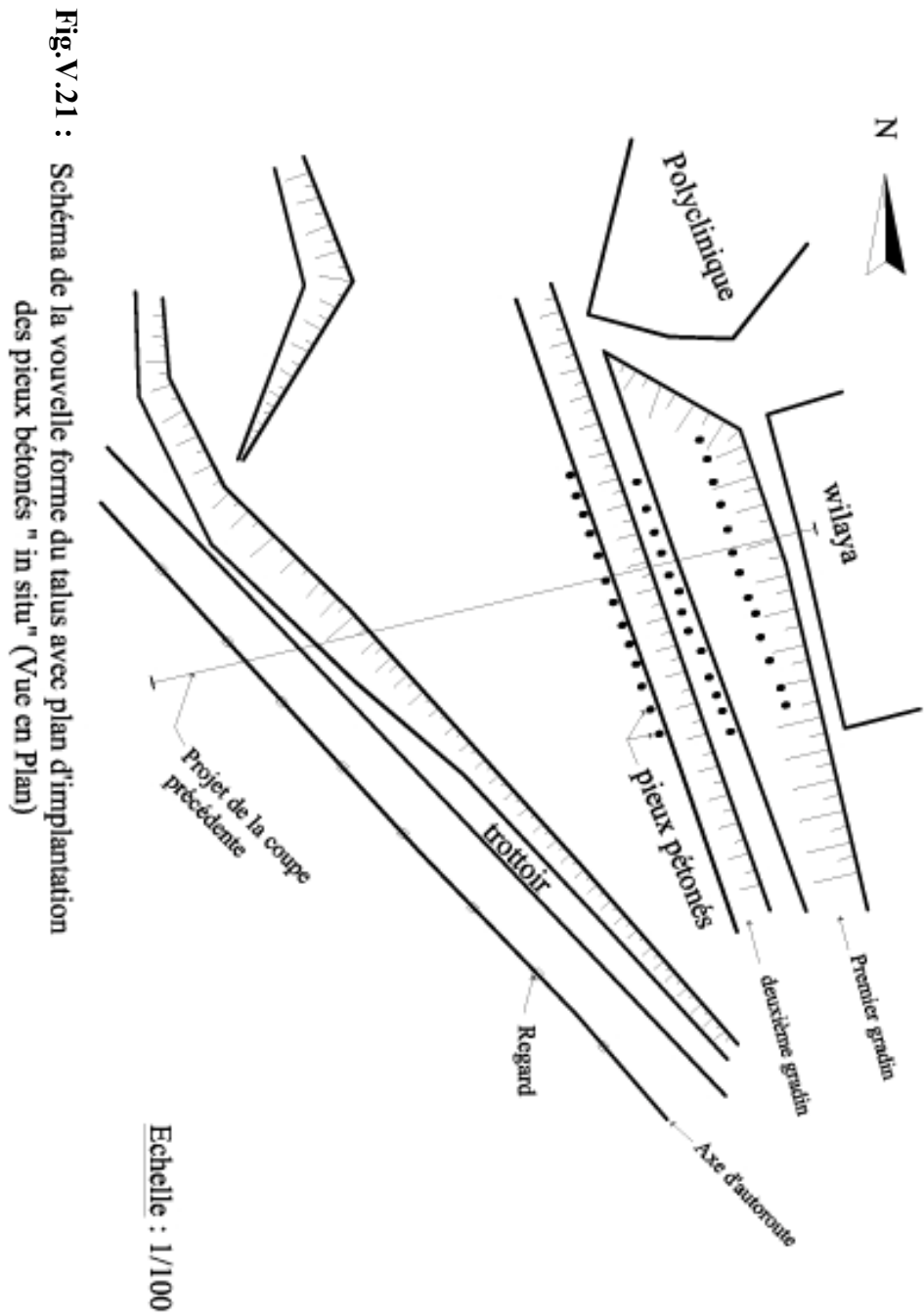


Fig. V.21 : Schéma de la nouvelle forme du talus avec plan d'implantation des pieux bétonés " in situ" (Vue en Plan)

III.C/ Instabilités de la route nationale RN 79a (entre les PK 0 et PK 3):

1/ Description des sites de glissement :

La Route Nationale 79a est une déviation situant à l'Est de ville de Mila en allant vers la commune de Grarem (Fig.V.5). Sur le secteur de la RN 79a entre les PK 0 à PK 3, nous avons pu constater plusieurs segments marqués par des problèmes d'instabilité :

- La plateforme de la RN 79a est construite la plupart du temps en profil mixte déblai/remblai, le secteur du PK 2 est marqué par une chaussée complètement déformée.
- Les instabilités concernent aussi bien les secteurs amont et aval de la chaussée.
- Les pentes des terrains sont importantes a priori entre 15 à 20%.
- Les terrains amont et aval correspondent à de vastes prés et rejoignent un important Oued (Oued El Mekhaouad) en aval de la chaussée.
- Les signes d'instabilité sont nombreux (cicatrice de mouvement, moutonnement, eau...), et concernent vraisemblablement des formations d'éboulis de pente à matrice argileuse reposant sur un substratum dont la profondeur est difficile à estimer.
- L'érosion créée par l'Oued en pied de versant agit sur les problèmes de stabilité.
- L'eau semble présente partout et des résurgences d'eau apparaissent de façon très erratique.
- Sur les sites 1-2 (PK 3) et 4 (PK 0) (Fig.V.22), les instabilités semblent commencer au niveau de la plateforme routière, néanmoins tous laisse penser à un départ des instabilités beaucoup plus à l'amont.
- Sur le site 3 (PK 2) (FigV.23), les instabilités commencent vraisemblablement du côté amont à une dénivelée minimum de 30 m au dessus du niveau de la plateforme de la RN 79a, juste en dessous de l'usine existante (usine de briqueterie).
- De façon générale sur tous les sites, les instabilités peuvent concerner les terrains jusqu'à Oued El Mekhaouad en se présentant comme une succession de glissements enchevêtrés, sur une dénivelée d'environ 70 m minimum.

2/ Facteurs favorisant le glissement :

L'analyse de la forme de rupture visualisée par les photos prises lors des visites du site nous a permis de tirer les points suivants favorisant le glissement :

- les travaux d'extension de la route sans doute sans étude géotechnique sérieuse sont la cause du glissement.
- le choix d'extension du côté aval sur un versant nécessite un talus plus haut que l'ancien, ce qui entraîne une surcharge du sol support plus forte.
- La forme de rupture correspond à un manque de portance du sol support.

- Le pendage des couches pourrait être dans le sens de la pente. Ceci a causé de désaxement de l'axe du glissement par rapport à l'axe du cours d'eau dont la hauteur du talus est maximale.

- le glissement de talus du remblai de l'élargissement de la chaussée par rupture du sol support entraîne le glissement de l'ancienne chaussée par régression.

3/ Caractéristiques géotechniques :

Quatre sondages carottés ont été réalisés par le bureau d'études techniques et laboratoires « AL-ARDH », deux en amont et deux en aval de la chaussée, pour identifier les caractéristiques physico-mécaniques et chimiques des échantillons et quantifier les performances des sols éprouvés. Les carottes récupérées montrent la présence des argiles limoneuses friables et des argiles marneuses jusqu'à 20 m de profondeur. Les essais de laboratoire sur ces carottes ont donné :

Les paramètres physiques :

Les densités sèches (γ_d) et humides (γ_h) sont dispersées et fluctuent de (γ_d : 1.44 à 1.83T/m³) (γ_h : 1.77 à 2.07T/m³). Elles révèlent un sol moyennement dense à dense et la compacité est moyenne. Les valeurs des teneurs en eau naturelle se positionnent autour de 15.20 à 24.0%, tandis que le degré de saturation varie de 69.65 à 96.2%, ces valeurs indiquent que le sol est à caractère humide. Les courbes granulométriques sont étalées des graviers aux argiles, dont la prédominance revient aux particules fines 62 à 100%. La granulométrie des sols analysés est représentative des sols fins. Quant aux limites d'Atterberg, les limites de liquidité varient entre 39 et 62% et l'indice de plasticité varie entre 19 et 28.5%, selon ces valeurs, le sol est classé dans la catégorie des argiles inorganiques de moyenne à forte plasticité. Les valeurs au bleu de méthylène (Vbs) sur la fraction 0/400 mm sont très variées, elles passent entre 1.98 à 3.85 indiquant ainsi un sol sensible et gonflant à inerte.

Les paramètres mécaniques et analyse chimique :

Les valeurs au cisaillement UU et CD sont représentatives à des sols cohérents ((0.27 < C_{uu} < 0.96 bars et 2° < ϕ_{uu} < 14°) et (0.40 < C_{cd} < 0.84 bars et 7° < ϕ_{cd} < 17°)).

Les résultats des essais de compressibilité signalent une stabilisation des échantillons autour de 10 bars, les pressions de consolidation (Pc) se situent au dessus des poids des terres, caractérisant le sol d'un état de consolidation normale. Le coefficient de compressibilité (Cc) se situe entre 0.053 et 0.272 traduisant un sol moyennement compressible à non compressible. Le coefficient de gonflement (Cg) se positionne entre 0.022 et 0.078% dévoilant un pouvoir de gonflement négligeable à non négligeable. Les analyses chimiques sommaires ont révélé une légère présence de sulfates jusqu'à 0.41%.

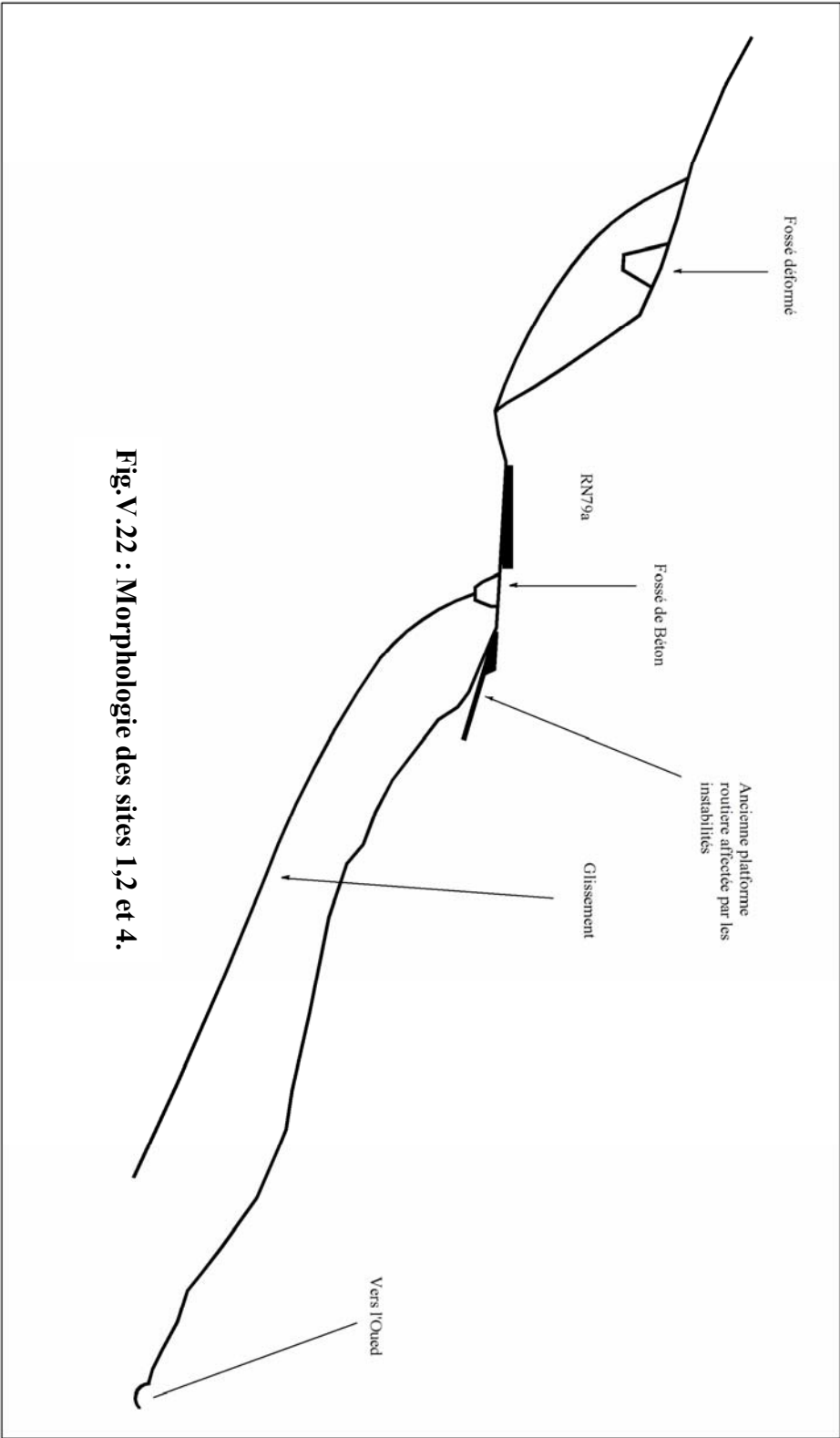
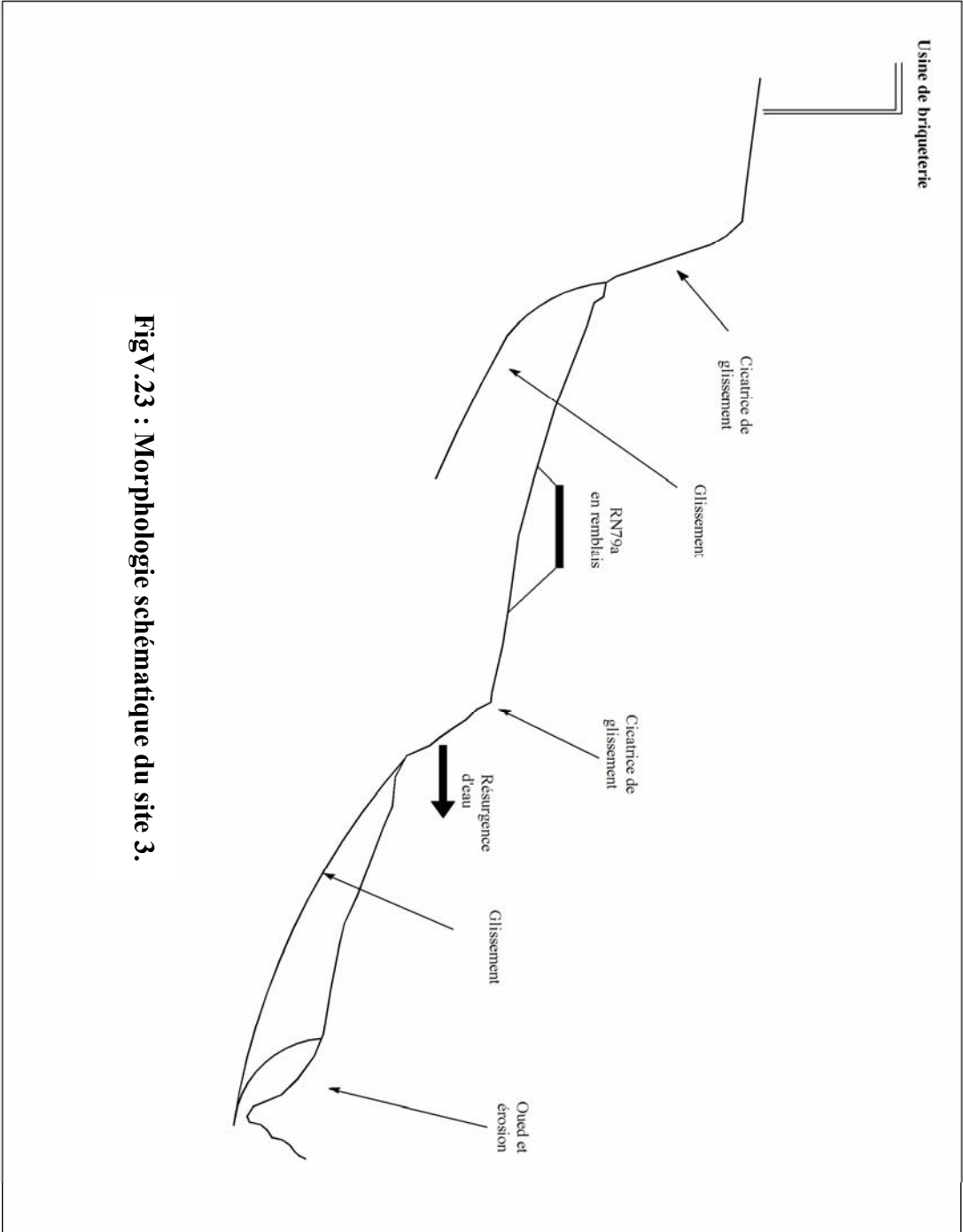


Fig. V.22 : Morphologie des sites 1, 2 et 4.



FigV.23 : Morphologie schématique du site 3.

4/ Solutions proposées :

L'eau est à l'évidence le vecteur majeur de la déstabilisation d'une masse épaisse d'éboulis à matrice argileuse, il est impératif de bien cerner son impact et la morphologie de ces aquifères. Les solutions de drainage possibles sont fonction des caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des terrains, qui seront mieux cernées qu'après l'étude géotechnique, et il paraît difficile d'envisager des solutions devant cette étape. Néanmoins après notre visite de site, on peut imaginer que les solutions de confortement seront les suivantes :

- Mise en œuvre de système de collecte des eaux superficielles (fossé, imperméabilisation des accotements...).

- Travaux de gestion des aquifères possible par :

- Réalisation de tranchées drainantes associées à des drains de décharge.

- Drain siphons et mise en place de plusieurs lignes en fonction des caractéristiques des terrains définis.

En fonction du degré de sécurité recherché, il faudra avoir recours à des moyens mécaniques associés au réseau de drainage :

- Remblai allégé, bêche de pied ou Berlinoise ou encore microberloise tirantée.

- Réaliser l'extension de la chaussée du côté amont.

- Utilisation d'un confortement par des pieux métalliques HEA de profil 400 espacés de 1.5m, assemblés en tête et installés à une distance d'environ 15m du pied du talus sous forme d'arc ;

- Soutènement de la différence de niveau de sol entre l'amont et l'aval au niveau du confortement par installation entre les pieux des madriers ou des dalles en béton armé ;

- Chargement du pied du talus par remplissage de la zone entre le confortement et le pied du talus jusqu'à l'obtention d'une surface légèrement inclinée vers l'aval juste pour éviter la stagnation des eaux pluviales.

- Abaissement de la nouvelle extension par rapport à l'ancienne chaussée en diminuant au maximum la hauteur du remblai de 0.5m à 1m.

III.D/ Glissement du collecteur A :

Le collecteur (A) traverse la ville de Mila, la partie du tronçon affaissé est située à la sortie de Mila vers Garem, il se trouve sur un talus qui surplombe un Oued. En cet endroit, le terrain présente de nombreuses crevasses avec d'importantes niches d'arrachement. Des masses entières de terrains ont subit des déplacements vers l'Oued. Au pied du talus un projet d'une conduite de ceinture des eaux usées est en voie de réalisation.

1/ Description et caractéristiques géotechniques des sols rencontrés :

Le LTP/EST a procédé à l'exécution de trois sondages carottés (SC1, SC2 et SC3) suivant un profil Ouest-Est afin de permettre le calcul de stabilité du talus, et à l'installation d'un piézomètre entre S1 et S2 en amont du talus, qui a montré un niveau piézométrique de 7.00m au mois d'Août. On rencontre sur l'ensemble du site une couche de remblai d'épaisseur variant de 2.50m à 6.00m et reposant sur des argiles marneuses allant jusqu'à 30m avec une couche pulvérulente de sables et graviers relevée au sondage SC 1 (Fig.V.24).

Les caractéristiques géotechniques des échantillons prélevés montrent des valeurs indiquant un sol de mauvaise qualité en surface et des caractéristiques moyennes en profondeur, il s'agit d'un matériau fin, dense et consistant à l'état plastique, de forte plasticité, gonflant et moyennement compressible (tableau V.11 et figure V.25).

Le pourcentage des insolubles varie entre 50.00% et 80.00%, la teneur en carbonates varie entre 7.00% et 39.00% et le taux des sulfates sous forme de gypse varie entre 0.33% et 2.30%.

SC	Prof m	γ_d t/m ³	γ_h t/m ³	Wn %	Sr %	WL %	IP %	IC %	ϕ°	C_u bar	P_c bar	Cc %	Cg %
1	2.5-3.0	1.76	2.095	19.05	96.99	49.2	25.8	1.16	4	0.200	2.4	0.174	0.061
	5.7-6.0	1.78	2.065	16.07	83.77	54	34	1.11	5	0.100	-	-	-
	9.30-9.80	1.68	2.05	22.38	99.81	64.5	39.1	1.07	2	0.100	1.15	0.198	0.136
	11.0-11.3	1.84	2.12	15.35	88.07	51	34.5	1.03	10	0.55	-	-	-
	14.4-14.7	2.0	2.92	9.64	73.86	48.5	34.4	1.12	-	-	-	-	-
	16.5-17.0	1.84	2.12	15.7	88.79	45.0	29.1	1.00	-	-	-	-	-
2	3.0-3.30	1.92	2.20	14.64	97.93	50.5	28.8	1.24	-	-	2.30	0.098	0.051
	8.6-8.9	1.90	2.15	13.33	85.78	60.0	31.8	1.46	-	-	-	-	-
	11.6-12.0	1.95	2.22	14.04	97.76	50.9	29.0	1.27	-	-	-	-	-
	15.0-15.5	1.93	2.19	13.95	94.32	-	-	-	-	-	-	-	-
	19.0-19.6	1.89	2.17	15.16	95.38	-	-	-	-	-	2.55	0.076	0.082
	25.0-25.4	2.05	2.47	12.09	100	-	-	-	10.3	0.750	-	-	-
31.5-31.9	1.82	2.13	17.06	95.53	-	-	-	-	-	-	-	-	
3	1.0-1.3	2.03	2.38	7.93	64.84	50.1	23.8	1.77	-	-	-	-	-
	7.0-7.3	1.55	1.94	25.46	93.28	66.2	32.7	1.24	1	0.150	-	-	-
	9.0-9.7	1.94	2.16	11.43	78.1	64.2	33.3	1.58	-	-	-	-	-

Tableau VII.12 : tableau récapitulatif des caractéristiques géotechniques du site étudié

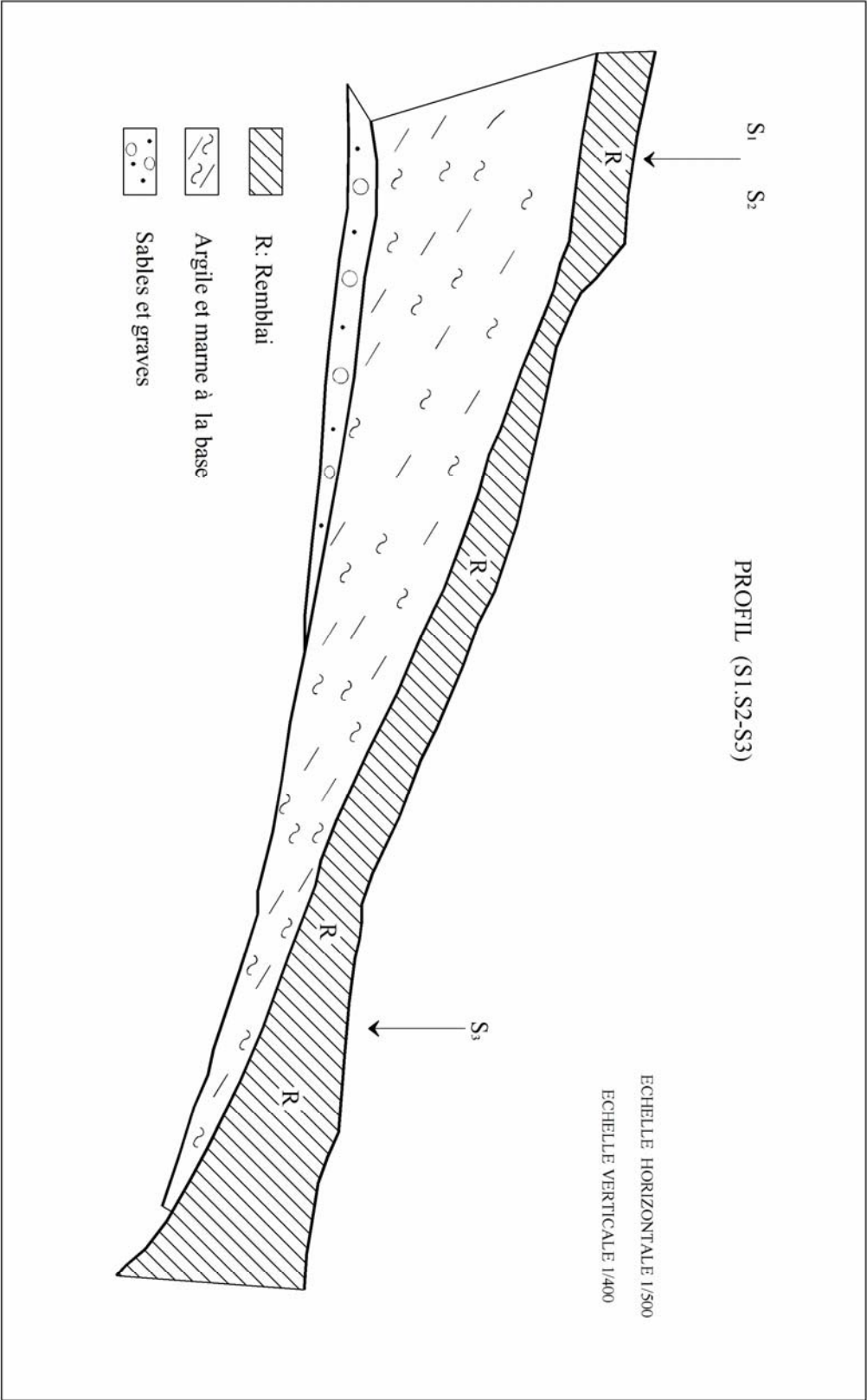


Fig. V.24 : Coupe géologique du profil S1, 2 et 3.

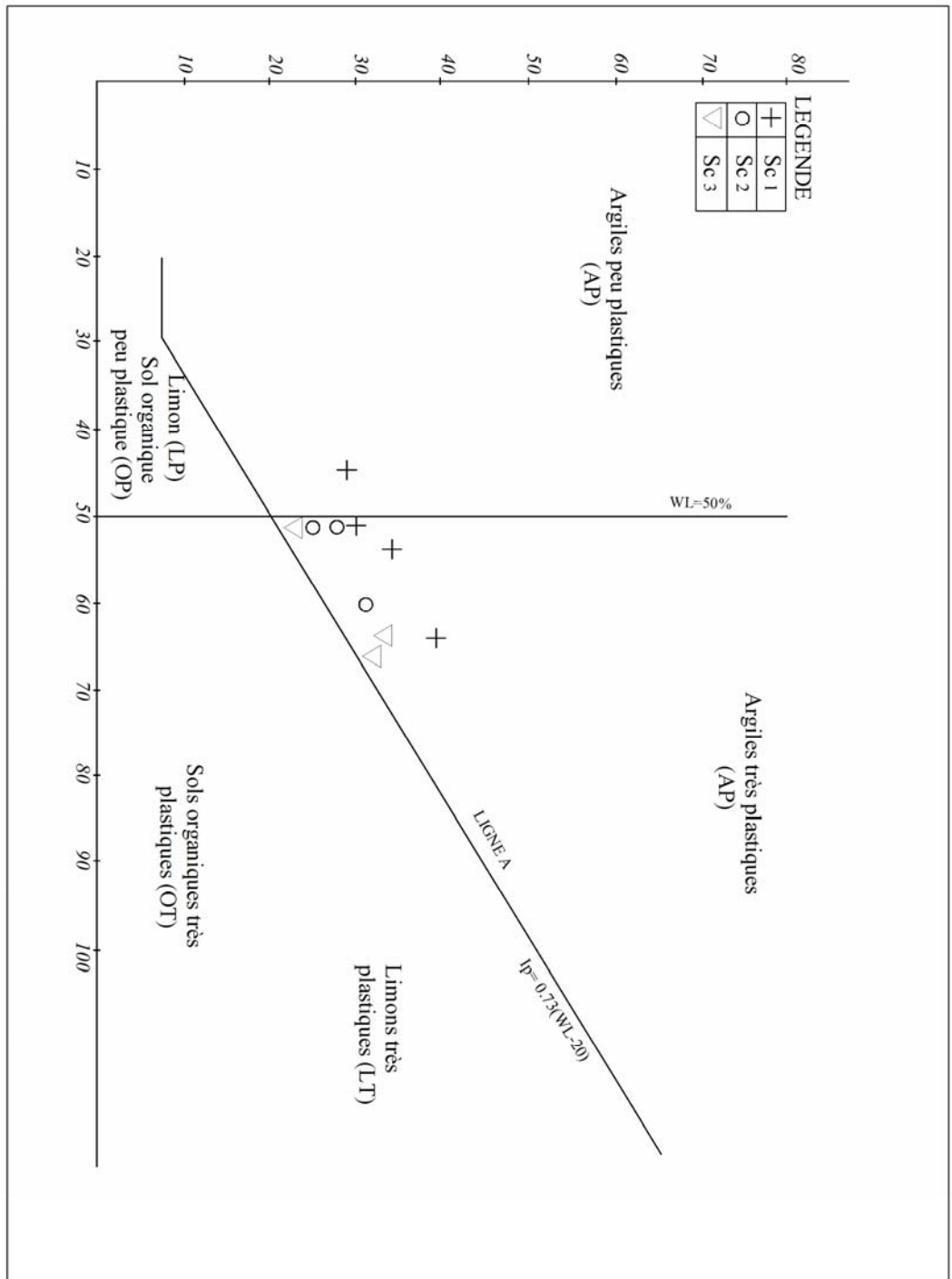


Fig. V.25 : Classification des sols selon le diagramme de Casagrande.

2/ Etude de stabilité :

Le calcul automatique s'est fait par le logiciel nixe et Trolls selon la méthode de Bishop à partir des profils sur le terrain (Fig.V.26). Les résultats montrent que les glissements et les affaissements sont relativement superficiels, ils affectent essentiellement les remblais et une partie des argiles. En effet les terrains sous-jacents aux remblais (marne argileuse) sont stables. Les résultats obtenus montrent que le talus concerné par l'affaissement est instable ($F_s < 1.5$), il constitue donc un grand problème pour la stabilité de la conduite des eaux usées du collecteur (A) ainsi que la stabilité des édifices situés autour du versant.

3/ Mesures techniques pour l'augmentation de la stabilité :

Les méthodes choisies pour le calcul de la stabilité de n'importe quel massif doivent répondre aux conditions économiques, à l'efficacité et à la facilité de réalisation, la solution qui présente le plus d'avantage sera prise comme variante essentielle à conseiller :

Rideau de palplanche et tranchées drainantes : il doit dépasser la surface du glissement la plus critique pour réagir contre ces mouvements. Ce rideau doit être réalisé parallèlement à la conduite et par conséquent perpendiculaire au sens du massif déplacé. Le lieu de l'implantation doit être choisi de telle sorte qu'il élimine une bonne partie de terre en mouvement dans le but de diminuer les mouvements mobilisables.

Inconvénients :

- La grande hauteur des palplanches qu'il faut implanter sans ancrage n'assure pas la stabilité du sol mouvant.
- Au cours de la réalisation des tranchées drainantes, la probabilité de naissance de petits glissements est très grande.
- Difficulté du drainage des sols argileux et le drainage de la nappe provoque un tassement du sol et par conséquent les constructions proches du talus seront menacées par des tassements différentiels.

Clouage par pieu : la deuxième variante consiste à la réalisation des pieux battus qui jouent deux rôles : la garantie de la stabilité du mouvement par clouage et transmettre les charges de la conduite au corps stable.

Gabionnage : la troisième variante consiste à réaliser un mur de gabions en gradin dans la partie aval (côté Oued) qui longe la conduite sur toute la partie touchée par le glissement.

Inconvénients :

- Risque d'avoir des glissements avec un cercle au dessous du gabion ;
- L'augmentation de la charge du massif par le poids propre des gabions Favorise le glissement en plus le problème d'ancrage dans les sols meubles.

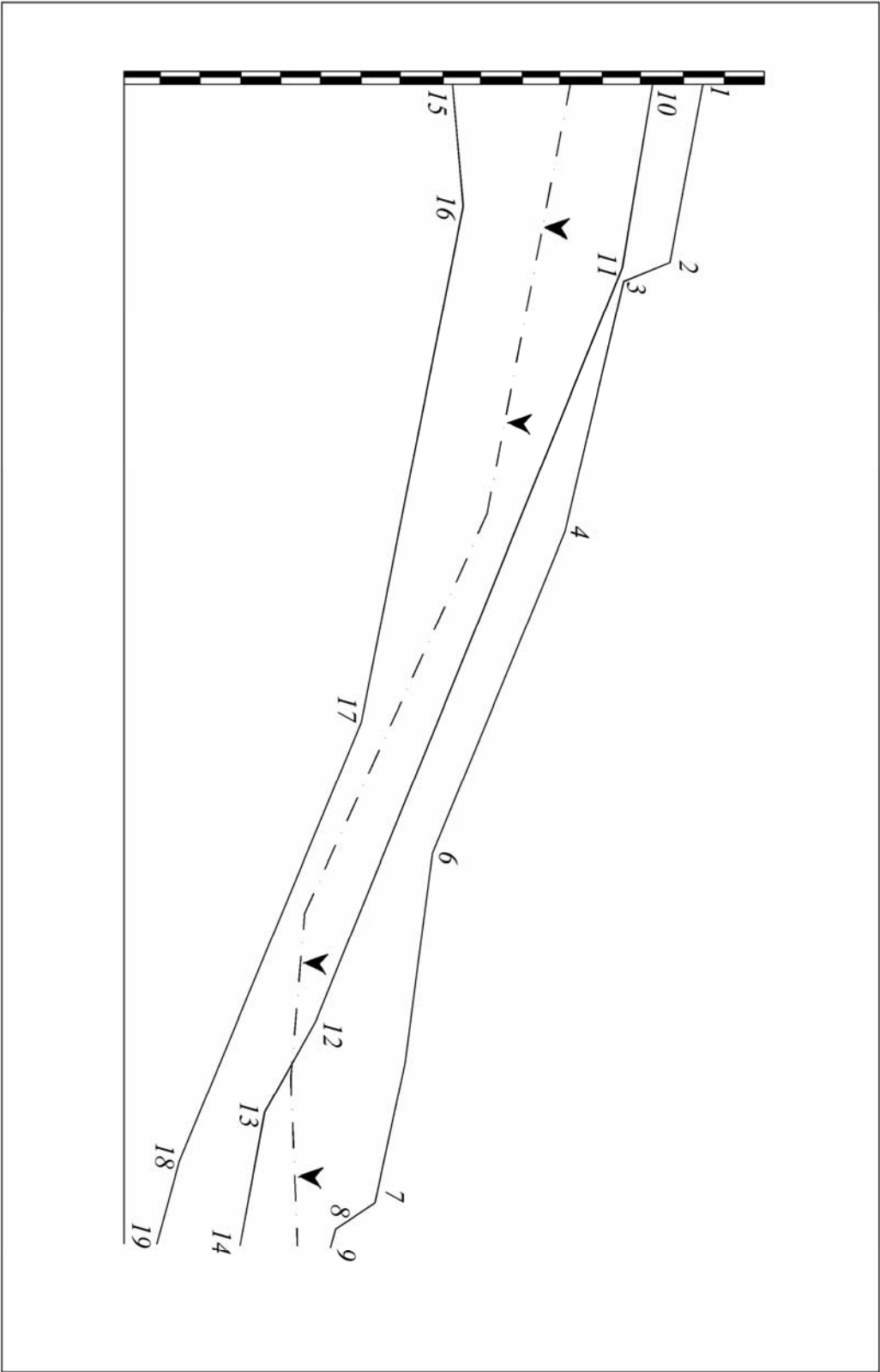


Fig.V.26 : description du talus choisi pour le calcul des Fs.

Terrassement : Il consiste à dégager une grande partie de la masse instable avec modification du versant en banquettes. Le calcul du coefficient de sécurité a donné un $F_s = 1,701$ (tableau V.13). Mais son inconvénient est qu'il n'assure pas entièrement la stabilité, nécessite un volume de terrassement important, en plus, au cours de la réalisation des terrassements se déclenchent quelques glissements.

Nous pensons que la variante qui paraît satisfaisante pour augmenter le coefficient de sécurité et le rendre admissible et assurera la stabilisation du talus est le clouage par pieu. Il est souvent utile d'associer à la variante choisie des plantations d'arbres ou arbustes permettant ainsi de lutter efficacement les eaux de ruissellement, en plus elle donne un meilleur environnement.

	X (m)	Y (m)	R (m)	Fs
1^{ère} variante	80	91	80	1.640
2^{ème} variante	80	91	80	1.875
3^{ème} variante	80	91	80	1.314
4^{ème} variante	80	91	80	1.701

Tableau VII.13 : Résultats du calcul du coefficient de sécurité.

IV/ Conclusion :

L'exploitation des résultats des reconnaissances géotechniques, nous a permis de définir l'évolution de la lithologie, les caractéristiques physiques et mécaniques des sols en profondeur. C'est dans le but de définir la localisation et la morphologie de la surface considérée stable (substratum), et par la suite, la délimitation des masses en mouvements.

L'étude géotechnique des quatre sites nous permet de conclure que les formations constituant l'ensemble de la commune de Mila sont en général des argiles marneuses à gypse-surmontées par une couverture argileuse- peu plastiques à très plastiques, moyennement compressibles à fortement compressibles et faiblement résistantes au cisaillement. Telles formations nécessitent une étude précise, bien détaillée et un traitement sérieux grâce à leur sensibilité à l'eau et leur susceptibilité de tasser ou de gonfler, ces formations constituent en général le siège de plans de mouvements de terrain surtout en présence d'eau.

Chapitre VI :
Cartographie des zones
instables

1/ Introduction

L'environnement naturel et ses divers composants constituent un grand obstacle face aux plusieurs projets et constructions élaborés par l'homme, cet obstacle est exprimé par le terme d'érosion quand il s'agit du milieu naturel. Il se manifeste sous différentes formes de mouvement des composants de surface, cela a poussé les chercheurs à s'intéresser au domaine d'érosion et risque de mouvement des masses, et planifier des plans précisant les différentes forme d'érosion en s'appuyant sur des méthodes et des techniques, y compris les différents plans ZERMOS (zones exposées aux risques de mouvements de sol et de sous-sol).

Au début des années quatre-vingt, s'est apparus les Plans d'Exposition aux Risques naturels (PER) dans les pays occidentaux, ces plans ont attiré l'attention de divers départements administratifs, ce qui les a poussé à la réalisation de ces plans, qui servent les intérêts de travaux publics. Ces plans sont associés aux plans d'occupation des sols.

Le fait que l'Algérie est parmi les pays qui souffrent de ce type de risques naturels, nous avons décidé d'établir le plan PER de la commune de Mila en suivant une méthode géomorphologiques qualitative où nous avons choisi la commune de Mila comme modèle pour l'application de cette méthode et ce, en raison de sa vulnérabilité aux actions géomorphologique intenses qui constituent un obstacle important face à l'extension de l'urbanisation et en plus la dégradation de ses terres agricoles.

2/ Problématique de l'étude

La commune de Mila est parmi les premières communes touchées par les problèmes d'érosion des sols et d'instabilité des terrains de manière considérable, conduisant à l'endommagement de vastes terres agricoles et cartiers résidentiels.

La commune de Mila est caractérisée par une lithologie défavorable (roches tendres) et un relief topographique encourageant le mouvement et le déplacement de terres essentiellement dans les collines. En plus, une absence quasi-totale de couverture végétale et la présence de quantités importantes de précipitations (jusqu'à 633 mm par an), dont 50% concentrées en trois ou quatre mois consécutifs de la période hivernale. Ainsi que la situation géographique de la ville de Mila au piémont nord de Djebel Akhal semble être exposée aux fortes précipitations. Ces caractéristiques font du territoire de la commune de Mila une zone de faiblesse qui ne peut résister aux phénomènes d'érosion, et donnent une certaine vulnérabilité vis-à-vis les mouvements de masses. Cette vulnérabilité est une donnée très importante à laquelle les autorités se sont confrontés, c'est-à-dire les plans d'aménagement et de développement de la commune sont complètement compromis vu les difficultés de

l'élaboration des projets adéquats dont l'extension laisse supposer une menace à l'équilibre naturel des versants qui d'ailleurs ceignent la ville.

Donc les caractéristiques naturelles de la commune ont forcé les utilisateurs et les exploitants des milieux naturels, à l'impératif d'étudier l'évolution du relief, inventorier les zones endommagées et les quantifier, puis les évaluer selon des plans et cartes montrant les possibilités de l'utilisation des terres pour les exploitations éventuelles. Ces plans sont considérés comme des documents de base dans le processus d'estimation de l'aléa naturel pour l'allègement des risques associés et dans l'identification des zones potentiellement instables et/ou les terrains récupérables.

Les plans d'aménagement qui seront établis à l'avenir permettraient ainsi de mieux cerner, à priori, tous les problèmes affectant considérablement la région. La possibilité de mieux comprendre les mécanismes des phénomènes d'érosion constitue les paramètres essentiels quant à l'élaboration des plans de développement de la commune de Mila.

3/ Représentation cartographique des risques naturels

Les cartes des risques naturels liés la dynamique des versants se considèrent d'une importance très particulière dans de nombreux pays où l'établissement de cartes de susceptibilité, de vulnérabilité et de risque est devenu une source qui alimente une grande partie de sujets de recherche.

3.1/ Inventaire des indicateurs et des facteurs d'instabilité :

Selon D.J. Varnes (1978), la détection des facteurs à l'origine des risques naturels se base sur deux principes :

- **Premièrement** : le passé et le présent sont la clé de l'avenir.
- **Deuxièmement** : qui est moins significatif que le premier, c'est que les mêmes causes produisent les mêmes effets. À cet effet, les données du passé et les événements actuels nous conduisent à rechercher les facteurs qui expliquent cela.

La représentation cartographique des aléas naturels et l'estimation des risques associés constitue un but essentiel dans le recensement des principaux événements antérieurs et actuels : par repérage ou localisation des zones actives ou réactivées (les mouvements déclarés). Ce repérage pourrait aider à mieux identifier les zones à risque, conformément aux deux principes énoncés précédemment, ainsi les zones de mouvements de masse seront jugées par leur faible résistance. De plus la représentation cartographique définit les différents types de mouvements touchant une région. Ces mouvements sont considérés comme des critères d'identification de la nature de la menace ou du risque courant. Elles peuvent éventuellement donner les éléments aidant à comprendre les degrés du risque naturel, soit à partir de son âge

et son évolution dans le temps ou par observation ou encore par l'ampleur des masses emportées. Cet inventaire est basé sur la constatation des signes et indicateurs de mouvements de matériaux sur terrain, souvent facilement repérables sur les photo-aériennes.

3.2/ Etablissement du plan d'exposition aux risques naturels de la commune de Mila :

Le milieu naturel est constitué d'éléments composés et qui se compliment constituant ainsi un dynamisme qui apparaît sous diverses formes d'érosion et à différents degrés; le tout dépend des caractéristiques du milieu naturel. Dans le territoire de la commune de Mila, on peut distinguer deux types d'érosion :

Erosion en masse : représentée par les mouvements de masses : les glissements de terrain, les coulées de boue, les solifluxions et les éboulis de pente.

Erosion linéaire : il s'agit du ravinement et creusement qui cause la perte de sol par ruissellement (écoulement des eaux de surface) et sapement de berge, il apparaît sous forme de ravineaux (quelques centimètres), de ravines (quelques mètres) et de ravins (plus de 2 ou 3 m) dans certains cas (F.Rullan-Perchirin, 1985).

L'intensité ou l'acuité de chaque phénomène d'érosion diffère d'une région à l'autre et selon leur composants naturels; pour cela nous avons voulu, dans notre approche de cartographie, séparer ces composants, puis essayer de déterminer l'ampleur de la contribution de chaque facteur dans l'activation ou l'accélération de ces phénomènes, on trouve que les facteurs de pente, de lithologie, de couvert végétal et d'hydrologie, constituent entre eux les principaux facteurs à l'origine de divers processus géomorphologiques.

Pour déterminer le degré d'influence de chaque facteur, ainsi que la localisation des zones endommagées (zones à risque), nous avons adopté la méthode de superposition des cartes de facteurs d'instabilité proposée par P. Gueremy (1978) où nous avons pris la carte des formes actuelles d'érosion, comme document de base pour extraire les divers phénomènes, et ensuite la superposer sur les cartes des facteurs essentiels permettant l'activation des processus géomorphologiques. Mais la difficulté qui s'est posée c'est que ces deux phénomènes sont indissociables (mouvements de masse et érosion linéaire).

P. Gueremy (1978) expose son organigramme de l'élaboration du plan d'exposition aux risques naturels (Fig.VI.1) qui comporte trois étapes :

A/ Première étape :

Dans cette étape, les formes d'érosion sont divisées en deux (mouvement de masses et ruissellement) et ensuite traitées suivant deux importants axes :

A.1/ Premier axe : On expose les effets des mouvements de masse. Il consiste à faire caler la carte des mouvements de masse avec les cartes des pentes, des linéaments, et la carte de couverture végétale (ou la carte d'occupation des sols dont on n'en dispose pas).

A.1.1/ Relation ou influence du facteur pente sur les des mouvements de masse :

a/ Carte des mouvements de masses :

Dans cette carte, on a divisé les mouvements de masses en trois catégories selon leur degré d'activité (Fig. VI.2):

* **Catégorie I :** comporte les mouvements rapides tels que les glissements rotationnels, les glissements en planche, les coulées boueuses et les éboulis.

* **Catégorie II :** comporte les mouvements de masses lents ou à temps espacés (mouvements récurrents) et les solifluxions.

* **Catégorie III :** comporte les mouvements inactifs ou figés c'est-à-dire les mouvements hérités du Quaternaire.

Le degré de vulnérabilité ou d'endommagement s'évalue à partir de l'intersection des catégories des degrés d'activité des mouvements de masses avec les différentes classes de pentes (matrice A et B).

b/ Classes de pentes :

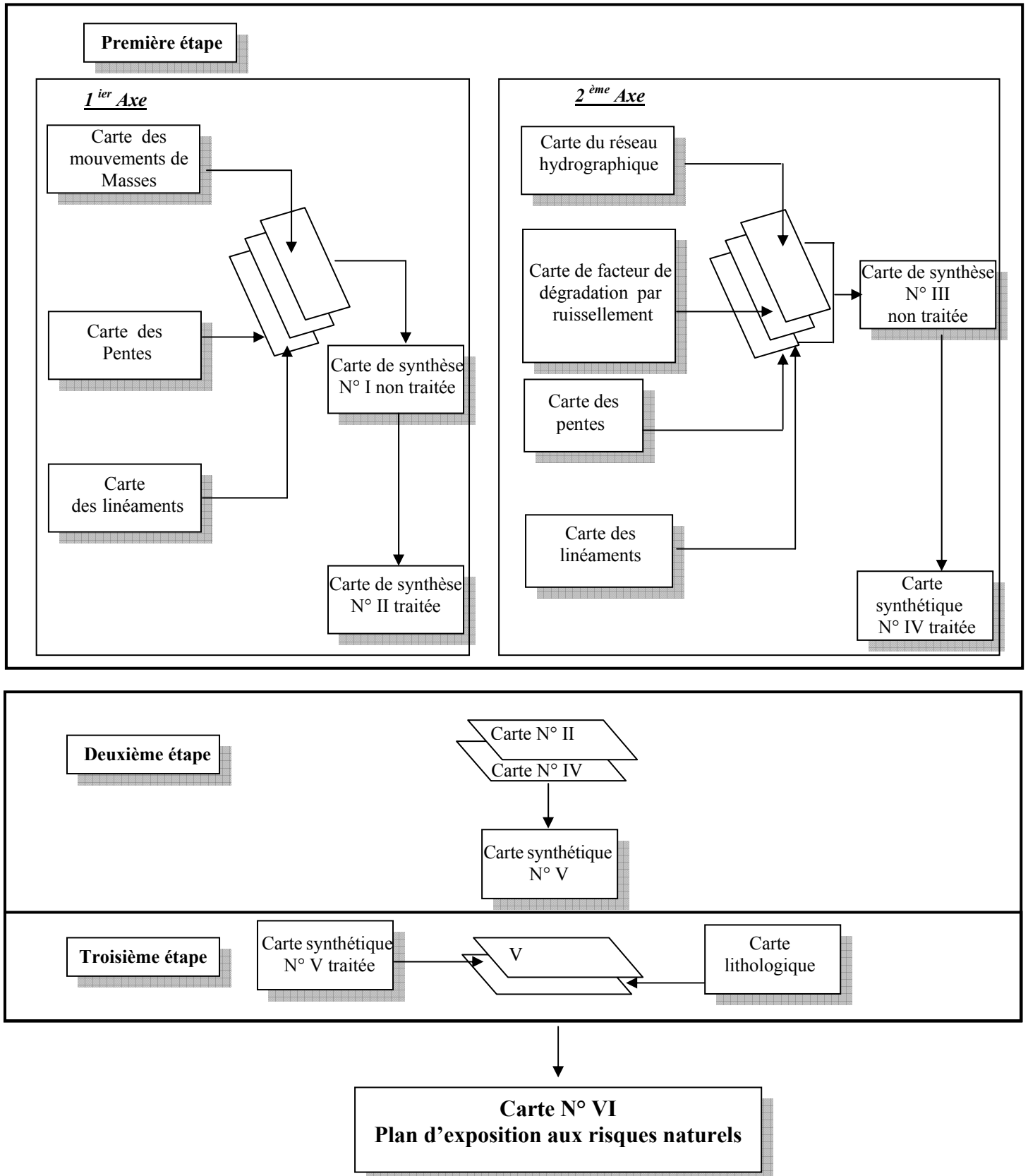
* La première classe de 0 à 3%.

* La deuxième classe de 3 à 12,5%.

* La troisième classe de 12,5 à 25%.

* La quatrième classe plus de 25%.

Carte des formes d'érosion



FigVI.1 : Organigramme d'établissement du plan d'exposition aux risques naturels.

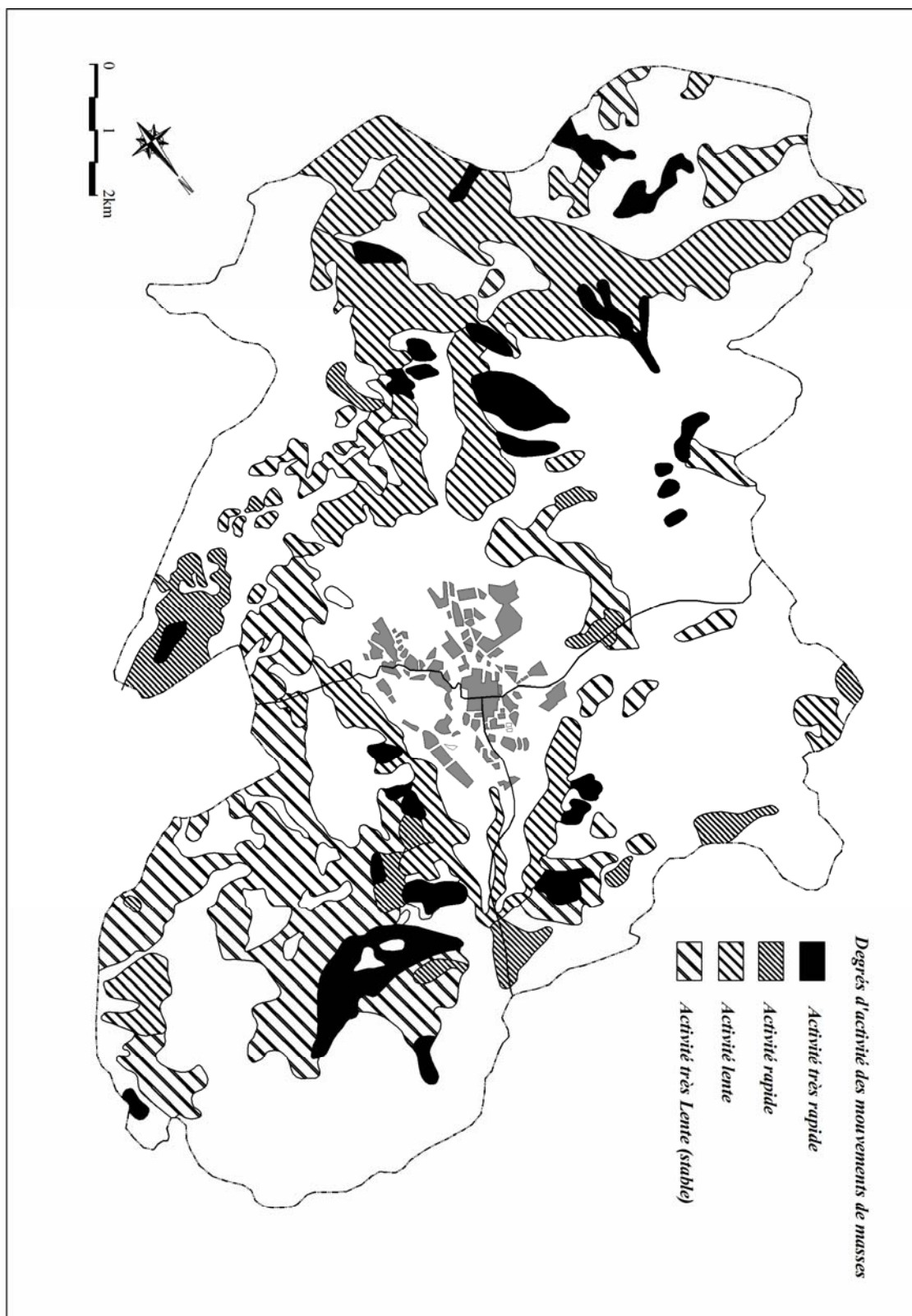





Fig. VI.2 : degrés d'activité des mouvements de masse dans la commune de Mila.

c/ Processus de superposition :

Cette opération se traduit en calant la carte des mouvements de masses avec la carte des pentes, ainsi nous avons abouti aux résultats énoncés dans les deux matrices A et B (Fig.VI.3) : la matrice (A) est une matrice brute composée de quatre lignes et trois colonnes, elle montre les premiers résultats de l'intercalation, où les différentes catégories de mouvement de masses et de pente s'insèrent complètement, ainsi on en tire douze cas représentés sur la carte de synthèse N° I (Fig.VI.4). Toutefois, en cartographie ce nombre de cas est très grand et donc ne permet pas la comparaison, pour cela, on a simplifié ce nombre de groupe de catégorie en trois (3) groupes principaux mentionnés dans la matrice (B) et représentés sur la figure VI.5.

	Mouvements de masses			
degrés de pente		1		
		2		
		3		
		4		

Matrice A : Données brutes de la superposition

	: Zones faiblement endommagées
	: Zones moyennement endommagées
	: Zones très endommagées

	Mouvements de masses			
degrés de pente		1	2	3
	1			
	2			
	3			
4				

Matrice B : Résultats du traitement de la matrice A

Fig VI.3 : Les matrices A et B représentent la relation pente-mouvements de masses

Ces trois groupes représentent les degrés de vulnérabilité et de sensibilité aux mouvements de masse selon la pente :

- * Degré I : représente les terrains très sensibles et fortement vulnérables.
- * Degré II : reflète les terrains moyennement sensibles et peu vulnérables.
- * Degré III : reflète les terrains stables à stabilité limite.

A.1.2/ Calage de la carte de couvert végétal avec la carte de synthèse N° II (Fig.VI.5):

Le territoire de la commune de Mila est pratiquement dépourvu de végétation, il se résume principalement aux herbes sauvages printanières, cette période ne correspond pas avec les précipitations (en particulier les pluies torrentielles). Ce faible couvert végétal favorise considérablement l'érosion de sol. Comme la carte de végétation de la commune de Mila ne contient pas de données intéressantes (une carte blanche), on se contente de la méthode d'interprétation et d'interpolation.

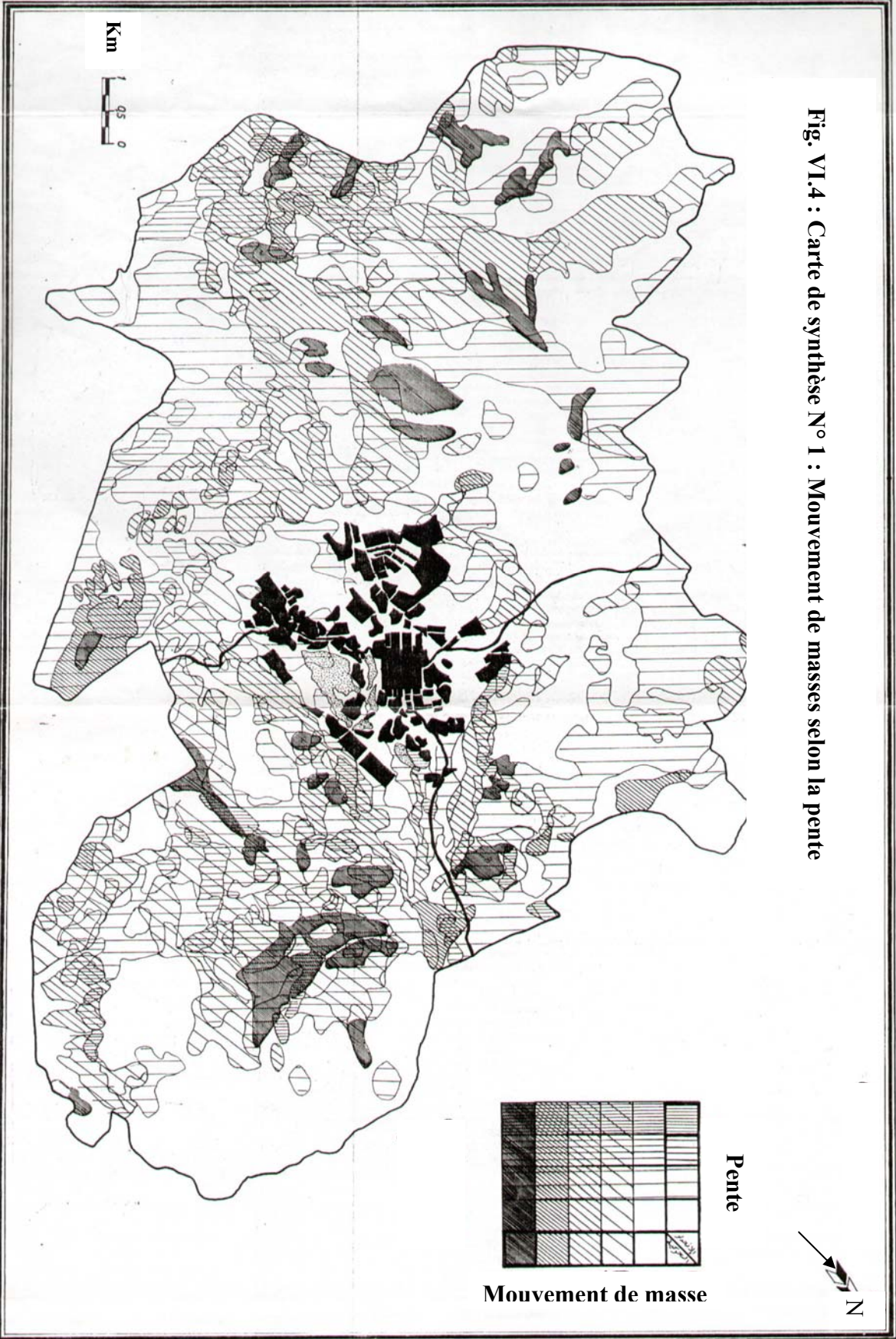




Fig. VI.5 : carte synthétique N° II : mouvements de masse selon la pente.

A.1.3/ Superposition de la carte linéamentaire avec la carte de synthèse N° II :

L'objectif de cette opération est de savoir si les linéaments (qui reflètent la tectonique) ont une relation avec le déclenchement ou l'activation des mouvements de masse et la configuration des versants, ou non (voir la carte de synthèse N° II : fig.VI.5).

A partir de cette carte, on a divisé le domaine de la commune de Mila en trois parties principales, les deux parties orientale et occidentale se caractérisent par un grand nombre ou une forte concentration de mouvements de masse, ce qui leur a donné un caractère dégradé, contrairement à la partie centrale, d'une part, et d'autre part, nous constatons que la plupart des pentes et des linéaments prennent la même distribution spatiale que les mouvements de masse. A partir de cette répartition, nous concluons que tous ces phénomènes se dépendent, ils ont une relation les uns avec les autres, mais le degré de corrélation entre chaque facteur et phénomène est difficile à déterminer parce que la relation entre ces facteurs est commune, à titre d'exemple la genèse des pentes est liée à la tectonique, où l'on note, d'une part, que la plupart des fortes pentes s'étendent le long des linéaments, d'autre part, nous constatons que la plupart des mouvements de masse se déclenchent, se manifestent et s'activent dans les endroits d'intersection des linéaments (nœuds tectoniques) qui sont des zones de pression maximale ou zones de faiblesse.

On trouve en particulier les coulées boueuses qui contribuaient à la dégradation du milieu naturel, et la dynamique actuelle est activée sur les effets de ces anciens (héritées).

A.1.4/ Résumé du premier Axe :

A partir de la carte synthétique N° II (Fig.VI.5), on conclut que le territoire la commune de Mila peut être classé en trois unités :

- **La première unité** se localise dans la partie orientale endommagée, qui est séparée du centre de la commune par Oued El Mekhaoud.
- **La deuxième unité** : elle représente les terrains répartis dans la partie centrale de la Commune. Elle est séparée de la première unité par Oued El Mekhaoud.
- **La troisième unité** : se situe dans la partie occidentale du territoire de la commune, elle est séparée de la deuxième partie par Oued Ouled Bouhama, c'est une unité endommagée.

A.2/ Deuxième Axe :

A.2.1/ détermination du coefficient de dégradation par ruissellements:

Dans cet axe, on va s'intéresser aux effets qui peuvent être causés par le ruissellement (écoulement de surface), il engendre la dégradation et la perte des terres et sols sous forme de ravinement et surcreusement.

Mais quand nous avons essayé d'analyser ce phénomène et sa relation avec d'autres facteurs comme la pente, nous avons constaté que le processus de superposition de ces facteurs ne donne pas des résultats fiables parce que le facteur pente influe d'une manière surfacique et le creusement influe sous forme linéaire.

Pour cela nous avons essayé de déterminer l'impact spatial de l'érosion linéaire par la manière suivante (In P. Gueremy, 1978):

A - diviser le domaine communal en petits bassins hydrographiques ou sous bassins versants.

B - calculer la surface de chaque sous bassin pour estimer sur la quantité d'eau reçue.

C - calculer la longueur du réseau hydrographique dans chaque sous bassin, ce chevelu reflète l'étendue ou l'ampleur de l'activité du creusement linéaire.

D - calculer le coefficient de dégradation par ruissellement et ce par division de la longueur du réseau hydrographique sur la surface du sous bassin, ce facteur reflète la relation entre la quantité d'eau reçue par chaque sous bassin et l'intensité des cours d'eau.

Nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau (VI.1) et sur la figure VI.6:

Catégories	1	2	3
Surface (km ²)	11,02	45,53	74,27
Coefficient de dégradation	< 1	> 1 et < 2	> 2

Tableau.VI.1 : Valeurs du coefficient de dégradation par ruissellement.

Les résultats de ce tableau sont issus de l'équation $R = L_i / S_i$ où :

R : Coefficient de dégradation par ruissellement (écoulement).

L_i : Longueur du réseau hydrographique à l'intérieur de chaque bassin en km.

S_i : La surface de chaque bassin versant en km².

Le but de cette opération est d'essayer de déterminer la sensibilité des sous bassins au ruissellement selon la surface de réception de chaque sous bassin, plus la surface de réception est grande plus augmente le débit dans les cours d'eau, cela constitue une énergie érosive des eaux surtout si elles sont soutenues par le gradient de pente, qui est le principal moteur de l'énergie cinématique des eaux.

À cette fin, nous avons procédé à la superposition de la carte des pentes avec la carte du coefficient dégradation par ruissellement (voir carte synthétique N° III, figure VI.7) et par conséquent nous pouvons identifier les zones vulnérables. Les résultats du calage sont présentés dans les matrices C et D (figure.VI.8) : la matrice (C) composée de trois (3)

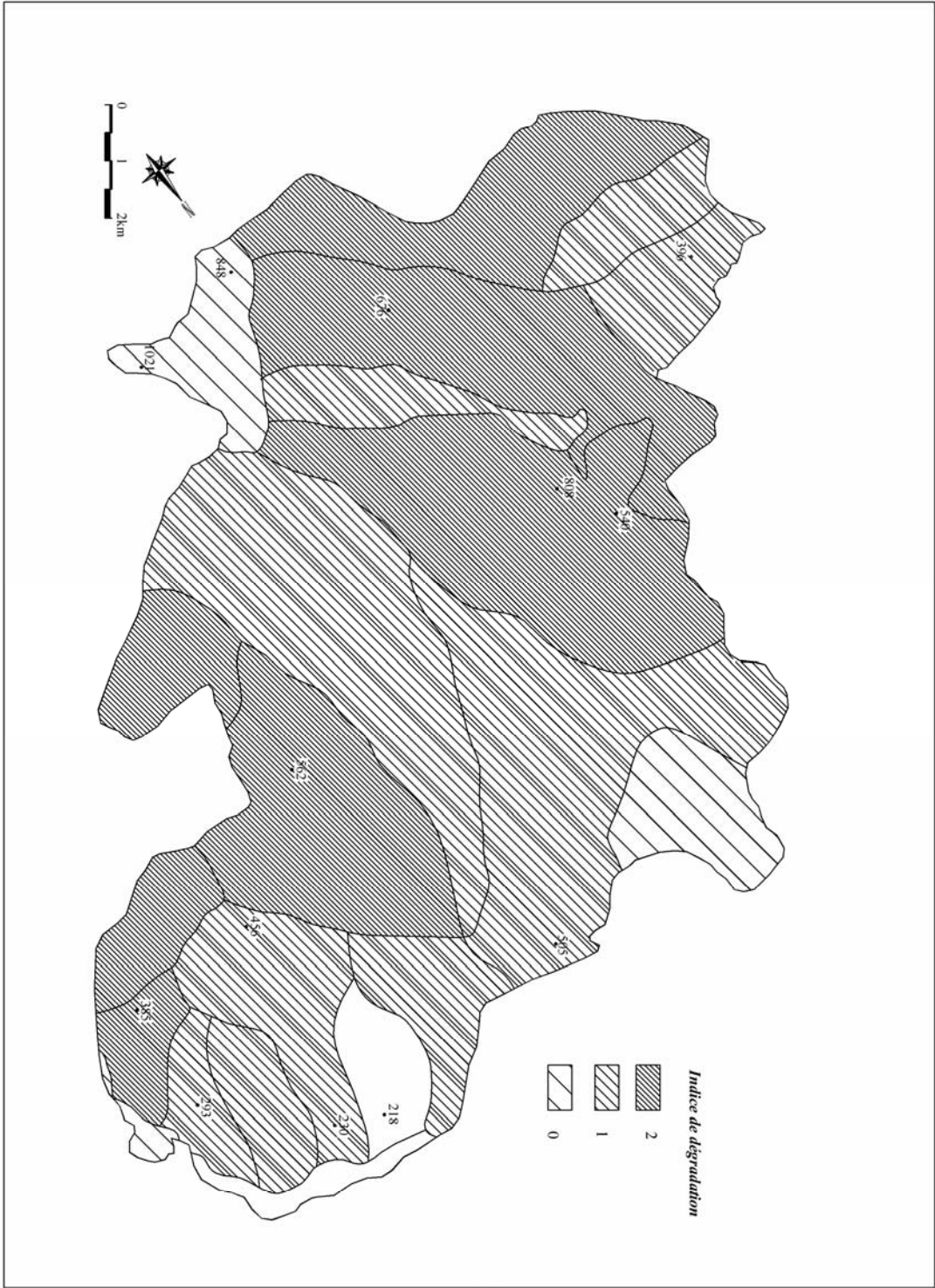


Fig. VI.6 : carte de distribution du facteur de dégradation par ruissellement.

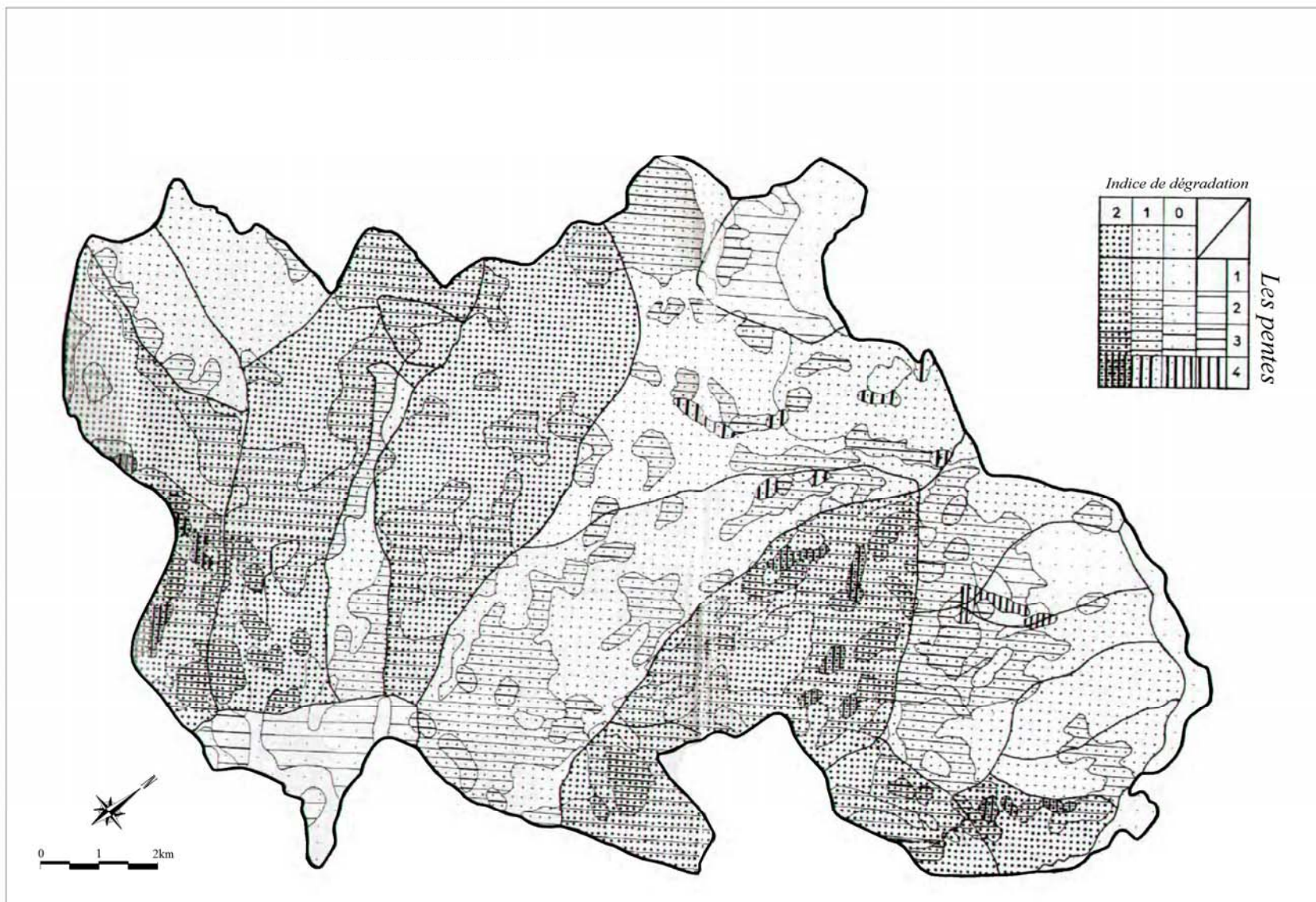


Fig.VI.7 : commune de Mila : carte synthétique N° III du ruissellement selon la pente.

colonnes et quatre (4) lignes constitue les premiers résultats (résultats bruts) du calage, elle contient douze (12) cas. La matrice (D) présente le résultat du traitement de la matrice (C) et exprime les degrés de vulnérabilité ou d'endommagement dûs au ruissellement selon la pente où il a été en mesure d'identifier trois catégories :


- * **Catégorie I** : comporte les zones peu ou faiblement vulnérables à quasi-stables.
- * **Catégorie II** : représente les zones endommagées.
- * **Catégorie III**: comporte les zones fortement vulnérables (gravement endommagées).


		Coefficient de dégradation		
		0	1	2
degrés de pente	1			
	2			
	3			
	4			

Matrice C : Résultats préliminaires du calage

		Coefficient de dégradation		
		0	1	2
degrés de pente	1			
	2			
	3			
	4			

Matrice D : Résultats de traitement de la matrice C

 : Zones faiblement endommagées

 : Zones moyennement endommagées


 : Zones endommagées

Fig.VI.8 : Superposition du facteur pente avec le coefficient de dégradation par ruissellement.

Les résultats de ce processus de calage sont représentés par la carte de synthèse N° IV (figure VI.9) par laquelle nous avons pu identifier les zones vulnérables (endommagées) à cause du ruissellement, autrement dit, les zones à forte concentration du chevelu hydrographique. Nous avons obtenu la même répartition que dans la carte de synthèse N° II.

A.2.2/ Superposition de la carte de végétation avec la carte de synthèse N° IV :

Compte tenu de l'importance du couvert végétal dans la protection des terres et sols, nous avons voulu déterminer la contribution de ce facteur dans la protection du domaine naturel de la commune de Mila, on a constaté que la région est dépourvue de végétation ce qui favorise le creusement linéaire et par conséquent le ruissellement, qui est fort présent dans la région.

A.2.3/ calage de la carte des linéaments avec la carte de synthèse N° IV :

On remarque qu'il existe une dépendance entre la tectonique (représentée par la carte des linéaments) et les autres facteurs, où quelques cours d'eau et lignes de crête correspondent aux linéaments, ce qui explique la relation étroite entre la tectonique et l'érosion linéaire.

Fig. VI.9 : carte synthétique N° IV : ruissellement et mouvements de masses.



A.2.4/ Résumé du deuxième axe :

A partir de la carte de synthèse N° IV (figure VI.9), nous avons pu diviser le domaine de la commune de Mila en trois unités de base :

- **La première unité** se situe dans l'Est de la commune, c'est une zone endommagée à cause du ruissellement intense.
- **La deuxième unité** : est située dans partie centrale de la commune, elle est faiblement endommagée, séparée de la première unité par la vallée de Oued El Mkhaoud.
- **La troisième unité** : limitée dans à l'Ouest du territoire municipal et séparée de la deuxième unité par Oued Ouled Bouhamma, c'est une unité endommagée par le ruissellement.

B/ Deuxième étape : Superposition des cartes synthétiques N° II et IV :

Dans cette étape, on détermine le degré d'endommagement ou de vulnérabilité commun entre les deux phénomènes (mouvement de masses et ruissellement), et ce par le biais d'un processus de combinaison entre les cartes de synthèse N° II et IV. Les résultats seront présentés selon les matrices E et F (figure VI.10) : la matrice (E) se compose de trois (3) lignes et trois (3) colonnes, elle représente les données préliminaires du calage et donne neuf (9) cas mentionnés sur la carte de synthèse N° V (figure VI.11). La matrice (F) représente les résultats du traitement de la matrice (E) où nous avons pu classer trois grandes catégories qui reflètent la vulnérabilité ou le degré d'endommagement dans le domaine municipal de Mila :

- * **Catégorie I** : reflète les zones gravement endommagées.
- * **Catégorie II** : exprime les zones endommagées à faiblement endommagées.
- * **Catégorie III** : reflète les zones faiblement endommagées à quasi-stables.

Mvts de masses	Ruissellement		
	1	2	3
1			
2			
3			

Mvts de masses	Ruissellement		
	1	2	3
1			
2			
3			

Matrice E : données préliminaires du calage

Matrice F : Résultats de traitement de la matrice E

 : Zones faiblement endommagées

 : Zones moyennement endommagées

 : Zones fortement endommagées

Fig.VI.10: Les matrices E et F représentent la relation entre les mouvements de masses et le ruissellement.

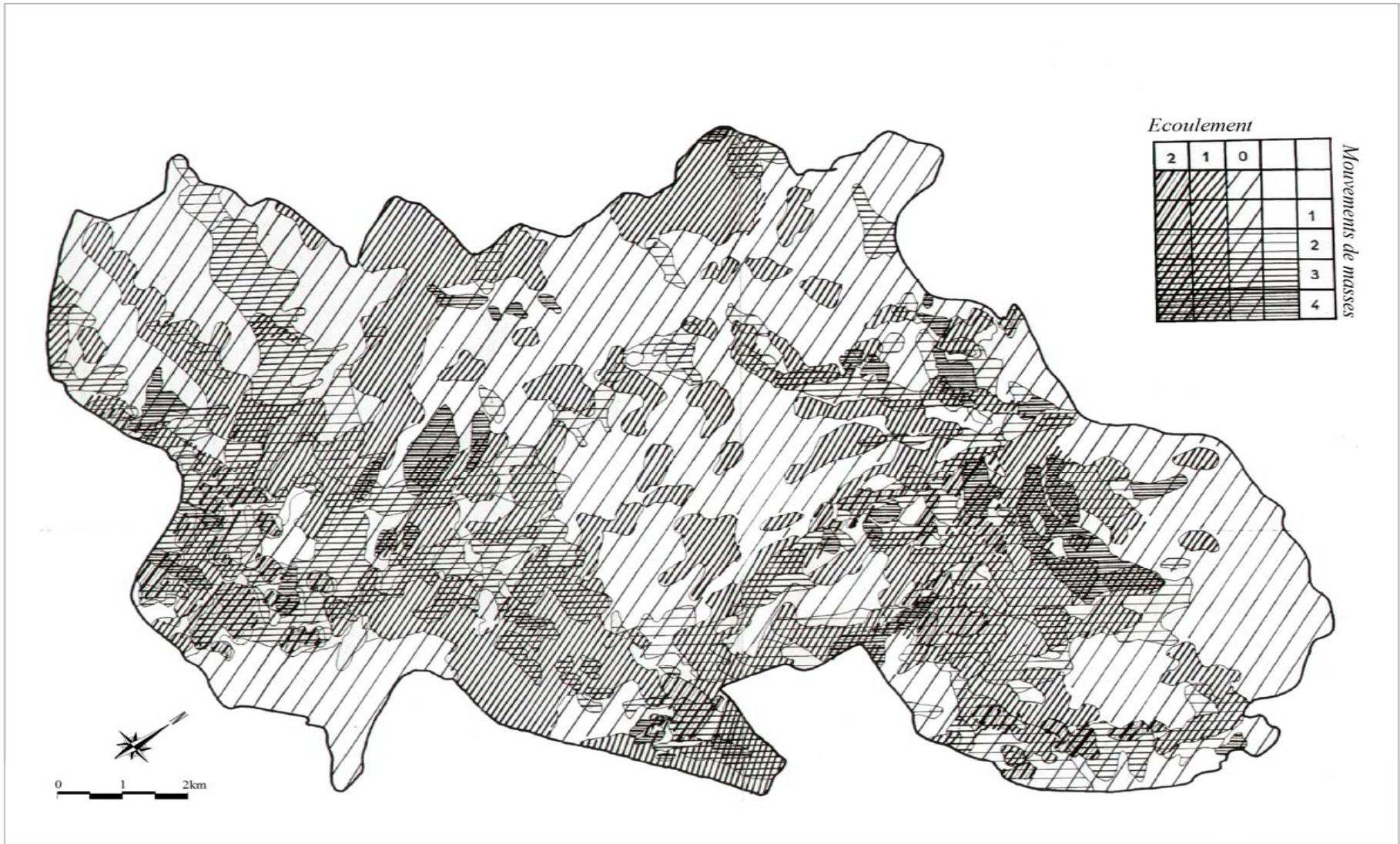


Fig.VI.11 : carte synthétique N° V des cartes II et IV.

Les résultats de la matrice (F) figurent sur la carte synthétique N° V qui représente l'effet ou l'influence combinée des mouvements de masse et du ruissellement, où nous avons divisé le domaine de la commune de Mila en trois unités en fonction du degré de dégradation ou d'endommagement :

- **La première unité** : se localise dans l'Est d'Oued El Mekhaoued, c'est est une zone vulnérable et endommagée en raison de sa dynamique.
- **La deuxième unité** : située dans la partie centrale de la commune, limitée entre Oued El Mekhaoued et Oued Ouled Bouhama, c'est une zone peu endommagée.
- **La troisième unité** : située à l'Ouest de Oued Ouled Bouhama, c'est une zone endommagée.

C/ Troisième étape : Calage de la carte synthétique N° V et la carte lithologique :

Cette étape consiste à établir le Plan d'Exposition aux Risques naturels de la commune de Mila à partir de la superposition finale entre les résultats de la deuxième étape représentés par la carte synthétique N° V et la carte lithologique de la commune de Mila qui est le substrat de tous les phénomènes géomorphologiques, et ensuite déterminer les zones à risque ou à faible résistance à l'érosion en fonction de leur lithologie pour aboutir à déchiffrer les zones vulnérables et les degrés de risque. Les résultats seront en fonction des matrices J et G (figure VI.12) : la matrice (J) composée de trois colonnes et cinq lignes représente les premiers résultats de la combinaison entre la carte de synthèse N° V et la carte lithologique, nous avons eu quinze cas, cependant, la plupart de ces cas pourrait être incluse dans une seule catégorie, à cette fin, nous avons examiné et traité cette matrice. La matrice (G) représente les résultats de traitement de la matrice (J) où nous avons eu trois grandes catégories et une quatrième catégorie dérivée de la première catégorie, les résultats de cette matrice sont exprimés sur la carte de synthèse finale N° VI (figure VI.13) qui représente le Plan d'Exposition aux Risques naturels de la commune de Mila.

La dernière combinaison que nous avons élaboré ne représente pas les intercalations ou superpositions des phénomènes, comme dans les deux étapes précédentes, mais détermine la relation entre le degré de vulnérabilité du milieu naturel et sa lithologie qui est la base des différents phénomènes géomorphologiques qui engendrent des risques naturels à différents degrés selon la nature des composants du milieu naturel.

		Degrès de vulnérabilité		
		1	2	3
Lithologie	Calcaire			
	Conglomérat			
	Marne			
	AG			
	AL			

La Matrice (J) présente les premiers résultats de la superposition

		Degrès de vulnérabilité		
		1	2	3
lithologie	calcaire			
	conglomerat			
	marne			
	Argile gyps			
	alluvions			

La matrice (G) présentant le résultat de traitement de la matrice (J)






	: Zone à risque de mouvements de masses
	: Zone à risque (inondation)
	: Zones potentiellement instables
	: Zone potentiellement stables
	: Zones stables ?

Fig.VI.12 : Superposition de la carte synthétique N° V avec la carte lithologique : les matrices J et G représentent la relation entre la lithologie et le degré d’endommagement du milieu naturel.

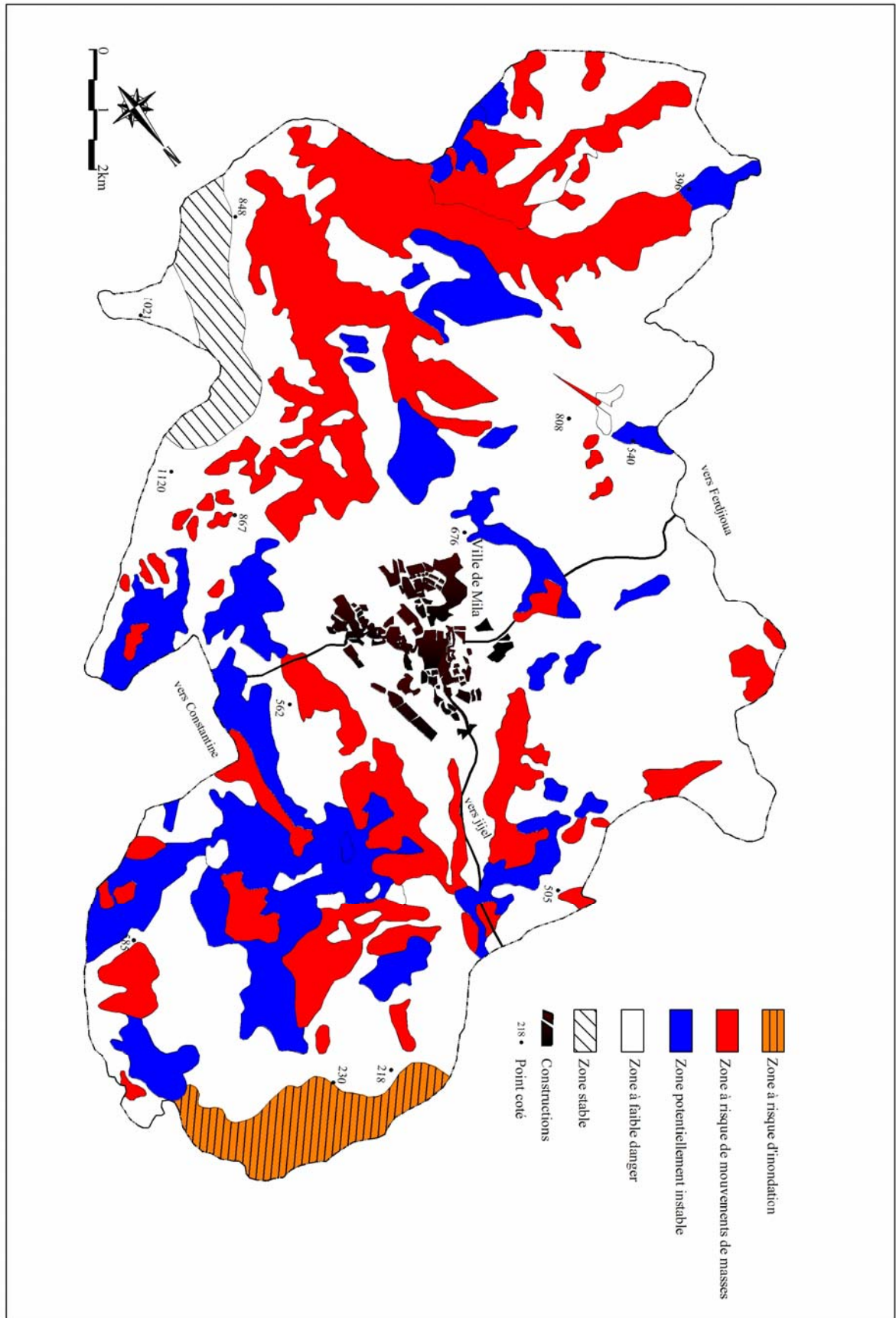


Fig.VI.13 : Carte d'exposition aux risques naturels de la commune de Mita.

4/ Conclusion :

A partir de la carte N° VI (figure VI.13) qui esquisse le Plan d'Exposition aux Risques naturels (PER) de la commune de Mila, on remarque que ce domaine connaît de graves dégradations dans l'Est et l'Ouest de la commune à cause d'une intense activité de l'érosion, ce qui a reflété sur les terres agricoles dans les zones rurales où la diminution continue de ces terres.

Nous avons classé dans ce plan le territoire de la commune de Mila en quatre catégories selon leur degré de risque :

Catégorie I : coloriée en blanc et divisée en deux parties :

- **1^{ère} partie** : représentée de blanc hachuré, elle reflète les terrains stables avec un pourcentage de 9,08% de la superficie totale de la commune.

- **2^{ème} partie** : représentée en blanc et représente les terrains quasi- stables avec un taux de 68,80% par rapport la superficie totale de la commune.

Catégorie II : présentée en bleu et reflète les terrains ou les zones potentiellement instables (moyennement dangereuses) avec 11,90% de superficie par rapport à la superficie totale de la commune de Mila.

Catégorie III : figurée en rouge qui reflète les zones instables ou à risque élevé, occupant 10,21% de la superficie totale de la commune de Mila.

Le phénomène des mouvements de masse constitue une barrière naturelle ceinturant la ville de Mila contre l'urbanisation, rendant son extension limitée, et c'est pourquoi nous prévoyons d'établir le Plan d'Exposition aux Risques naturels qui met en lumière les degrés de gravité des risques et par lequel nous pouvons identifier les domaines réversibles, récupérables ou non récupérables, ainsi que des projections futures pour un usage utile des zones urbaines et rurales.

Conclusion générale

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- Amireche, H., (2001)** : *L'eau, le substrat, la tectonique et l'anthropisation dans les phénomènes érosifs du Tell Nord Constantinois (Algérie)*. Thèse doctorat, Univ. Mentouri Constantine, 226 p.
- Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH), (1999)** : *Le Bassin du Kébir-Rhumel*. Cahier de l'Agence nationale des Bassins Hydrographiques.
- Antoine, P., Fabre, D., (1980)** : *Géologie appliquée au génie civil*. Ed. Masson. Paris, 291 p.
- Antoine, P., (1992)** : *Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur. Aspects géologiques*. Bull. Inter. Ass. Engineering Geology, n°45, pp. 11-24.
- Antoine, P., Giraud, A., (1993)** : *Aide à la reconnaissance des principaux types de mouvements de terrain connus dans les Alpes du Nord*. Commission des communautés Européennes, Programme EPOCH, Partie n°3, Vol n°2.
- Aoun, M., (2002)** : *Problèmes géologiques et géotechniques dans le bassin de Mila : leur impact sur les ouvrages d'art*. Thèse magi. Univ. Tébessa, 156 p.
- Aris, Y., (1994)** : *Etude tectonique et microtectonique des séries Jurassiques à Plio-quadernaires du Constantinois central (Algérie Nord-Oriental) : caractérisation des différentes phases de déformation*. Thèse de doctorat. Univ. Nancy, pp. 1-31.
- Azimi, C., Desvarreux, P., (1986)** : *Étude et prévision des mouvements de terrains*. Revue. Ass. Fran. de Topographie, n° 28, pp. 8-14.
- Azimi, C., Desvarreux, P., (1996)** : *Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain*. Revue Française de Géotechnique, n° 76, pp. 63-71.
- Barlow, J.P., (2000)** : *Slope movement patterns in young valley slopes in Northern Alberta, Canada*. 8th Inter. Symp. Landslides, Cardiff. UK. Telford Ed., vol n°1, pp. 113-120.
- Benabbas, C., (2006)** : *Evolution mio-plio-quadernaire des bassins continentaux de l'Algérie Nord orientale : apport de la photogéologie et analyse morphostructurale*. Thèse de doctorat. Univ. Constantine. 256p.
- Benaissa, A., (2003)** : *Glissement de terrain, calcul de stabilité*. Ed. O.P.U. (Alger), 95 p.
- Besson, L., (1996)** : *Les risques naturels en montagne*. Artes-Publialp, 437 p.
- Bhandari, R.K., Jeyatharan, K., (1994)**: *Forecasting of landslides and other mass movements*. XIII CIMSTF, New Delhi, Inde., pp. 1095-1098.
- Bonnard, Ch., (1984)** : *Risques d'instabilité. Approche pluridisciplinaire dans la détection des glissements de terrain*. Colloque sur les mouvements de terrains, Caen, France., n°1, pp. 309-316.
- Bouafia, A., 2004** : *les essais in situ dans les projets de fondations*. Office des Publications Universitaires. Uni Blida. 160p.

- Bouillin, J.P., Raoult, J.F., (1971).** *Présence sur le socle kabyle du constantinois d'un olistostrome lié au charriage des flyschs; le Numidien peut-il être un néo-autochtone?* Bull. Soc. Géol. France. n°7. 117 p.
- Bouillin, J.P., (1977) :** *Géologie alpine de la petite Kabylie dans la région de Collo et d'El Milia (Algérie).* Thèse doctorat. Univ. P. et M. Curie, 511 p.
- Bromhead, E.N., (1992):** *The stability of slopes.* Glasgow, Blackie academic, 411 p.
- Bureau de Recherche Géologique et Minière (BRGM), (2004).** *Cavités souterraines - Prévenir les risques d'effondrement.* Fiche de synt. Sc. 09, 04 p.
- Centre national des études et recherches en génie parasismique (C.G.S.), (2003) :** *Aléa sismique en Algérie et microzonage, cas de l'Algérie.*
- Chapeau, C., Durville, J.L., (2005) :** *L'eau et les risques de glissements de terrain.* Article géosc. 2, pp. 72-79.
- Coiffait, P.E., (1992) :** *Un bassin post-nappe dans son cadre structural, exemple du bassin de Constantine (Algérie orientale).* Thèse doctorat sc. Univ. Nancy, 502 p.
- Colas, G., Pilot, G., (1976) :** *Description et classification des glissements de terrains.* Bull. Liaison Lab. P. et Ch., n° spécial, pp. 21-30.
- Cordary, D., (1994) :** *Mécanique des sols.* Ed. Lavoisier Tec et Doc. Paris, 380 p.
- Costet, J., Sanglerat, G., (1981) :** *Cours pratique de mécanique des sols Tome 1 - Plasticité et calcul des tassements.* Ed. Dunod. Paris. 285 p.
- Costet, J., Sanglerat, G., (1983) :** *Cours pratique de mécanique des sols Tome 2 - Calcul des ouvrages.* Ed. Dunod. Paris. 447 p.
- Côte, M., (1974) :** *Les régions bioclimatiques de l'Est algérien.* Univ. Constantine, C.U.R.E.R., Ronéot., 6 p.
- Desvarreux, P., (1970) :** *Recherche d'une méthode d'étude des mouvements de terrains et applications pratiques.* Univ. Grenoble, 180 p.
- Durville, J.L., (1992) :** *Mécanisme et modèles de comportement des grands mouvements.* Bull. Inter. Ass. Engineering Geology, n°45, pp. 25-42.
- Durville, J.L., Lacube J., (1992) :** *Développement d'un fichier informatique sur les mouvements de terrain.* Act. Coll. Géotechnique et informatique, Paris, pp. 657-664.
- Durville, J.L., Sève, G., (1996) :** *Stabilité des pentes, glissement en terrain meuble.* Techniques de l'Ingénieur, C 1, pp. 1-17.
- Durand Delga, M., (1955) :** *Etude géologique de l'Ouest de la chaîne Numidique.* Thèse. Sc. Paris. Bull. Serv. Carte géol. Algérie. 24, 533 p.
- Durand Delga, M., (1969) :** *Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie.* Bull. Serv. Carte géol. Algérie. 39, pp. 89-131.

- Eden, W.J., (1973)** : *Glissement des terrains argileux*. Article CBD-143-F, 01 p.
- Favre, J.L., Gervreau, E., Durville, J.L., (1992)** : *Prévoir l'évolution des mouvements de terrain*. Revue Française de Géotechnique. N° 59, pp. 65-73.
- Fiche d'Action Élémentaire de Recherche (FAER) N°6.16** : *Sites expérimentaux de remblais sur sols mous et suivi d'ouvrages réels*.
- Filliat, G., (1981)** : *La pratique des sols et des fondations*. Ed. Moniteur. Paris, pp. 555-626.
- Flageollet, J.C., (1989)** : *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Paris. Masson, 520p.
- Gueremy, P., (1978)** : *Principes de cartographie des risques inhérents à la dynamique des versants*. Travaux de l'institut de géographie de Reims.
- Gominet, S., (2005)** : *Définitions et typologie des mouvements de terrain*. Bull. Liais. 16, 28 p.
- Habib, P., (1997)** : *Génie Géotechnique - Applications de la mécanique des sols et des roches*. Ed. Ellipses AUPELF/UREF. Paris, 222 p.
- Hubert, B., Philipponnat, G., (2003)**: *Fondations et ouvrages en terre*. Ed. Eyrolles. Paris, 548 p.
- Joleaud, L., (1912)** : *Etude géologique de la chaîne numidique et des Monts de Constantine*. Thèse, 438p. Paris et Montpellier.
- Khellaf, K., (2009)** : *Cadre géologique, aspect pétro-minéralogique et géotechnique du complexe argilo-marneux de la région Nord-Ouest de la ville de Mila : Boufouh (Mila-Algérie Nord orientale)*. Thèse magi. Univ. Tébessa, 156 p.
- Lahondère, J.C., (1979)**. *Datation des grès numidiens d'Algérie orientale, conséquences structurales*. C.R.Acad. Sc. Paris. T 289. (D). 4, pp. 383-386.
- Lebourg, Th., (2000)** : *Analyse géologique et mécanique des glissements de terrain dans des moraines de Pyrénées centrales et occidentales (France)*. Thèse doctorat. Univ. Bordeaux. 360 P.
- Léone, F., (1996)** : *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation de risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. Thèse Univ. Grenoble I.
- Malatrait, A.M., (1975)** : *Mouvements gravitaires dans le territoire couvert par la feuille St-Jean-de-Maurienne (Savoie) à 1/500000^e*. Orléans, BRGM, 218 p.
- Marre, A., (1987)** : *Etude géomorphologique du Tell Oriental Algérien de Collo à la frontière tunisienne*. Thèse d'état, Aix-Marseille II, 559p.
- Mayoraz, F., Cornu, T., Djukic, D., Vulliet, L., (1997)**: *Neural networks: a tool for the prediction of slope movements*. XIV CIMSTF, Hambourg, pp. 703-706.
- Mebarki, A., (1982)** : *Le bassin de Kébir-Rhumel - Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau*. Thèse doct. 3^{ème} cycle, Univ. Nancy II, 304 p.
- Mebarki, A., (1984)** : *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Le bassin du Kébir-Rhumel*. Edit Office des Publications Universitaires.N°8. Alger.

- Michel, J.P., (2000) :** *Les techniques du béton compacté au rouleau*. Journée technique du 07 juin 2000, barrage de Beni Haroun, pp. 01-06.
- Millies-lacroix, A., (1981) :** *Classification des talus et des versants instables. Risques géologiques, Mouvements de terrain*. Bull. Liaison Lab. P. et Ch., pp. 55-62.
- Mougin, J.P., (1973) :** *Les mouvements de terrain. Recherches sur les apports mutuels des études géologique et mécanique à l'estimation de la stabilité des pentes*. Univ. Grenoble, 292p.
- Mouroux, P., Margron, P., Pinte, J.C., (1988) :** *La construction économique sur sols gonflants : Manuels et méthodes*. BRGM Edition, 125p.
- Olivier, G., Renet., J-P., (1976) :** *Essai de cartographie des risques liés à des mouvements de terrain dans la région de Saint-Martin-de- Belleville*. Bull. Liaison Lab. P. et Ch., n° spécial, pp. 40-55.
- Office de Promotion et Gestion Immobilière (OPGI) de la wilaya de Mila., (2006) :** *Analyse et diagnostic du glissement de terrain de la cité des 185 logements*. Rapport inédit. 10 p.
- Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme (PDAU) de la commune de Mila., (2007) :** *Rapport d'orientation, site naturel, pp 38-42*.
- Pilot, G., (1982) :** *Glissements de terrain liés directement à des travaux*. Revue Française de Géotechnique, n° 17, pp. 55-69.
- Philipponnat, G., (1979) :** *Fondations et ouvrages en terre*. Ed. Eyrolles. Paris, 402 p.
- Philipponnat, G., (1987) :** *Fondations et ouvrages en terre*. Ed. Eyrolles. Paris, 402 p.
- Raoult, J.F., (1974).** *Géologie du centre de la chaîne Numidique (Nord du Constantinois, Algérie)*. Thèse. Sc. Mem. Soc. Géol. Fr. ns. LIII. Paris. 21, 163 p.
- Réméniéras, G., (1980).** *L'hydrologie de l'ingénieur*. Ed. Eyrolles. Paris, 456 p.
- Rezig, S., (1998) :** *Modélisation probabiliste de l'aléa "mouvement de terrain". Développement d'une méthode quantitative pour l'aide à l'expertise*. Thèse, Ecole Centrale Paris, 203p.
- Robin, F., (1993) :** *Landslide risk assesment and acceptable risk*. Can. Geotech. J., n°31, pp. 261-272.
- Rullan-Perchirin, F., (1985) :** *Recherches sur l'érosion dans quelques bassins du Constantinois (Algérie)*. Thèse 3ème cycle, Univ. Paris I, 356 p.
- Slosson, J.E., (1992) :** *Landslides / landslide mitigation, Colorado*. The Geological Society of America, 120 p.
- Suiki, S., (2007) :** *Les argiles du bassin de Constantine-Mila : composition minéralogique, chimique et répartition des gisements*. Thèse magi. Univ. Constantine, 129 p.
- Tisot, J.P., (1983) :** *Les essais de laboratoire en mécanique des sols*. Ecole nationale supérieure de géologie appliquée et de prospection minière de Nancy.
- Trevisan, L., (1971) :** *Tavole orientative per l'identificazione dei tipo di frane*. Guida alla

classificazione delle frane, pp. 24-36.

Varnes, D.J., (1978) : *Landslides types and processes. Landslides and Engineering Practice.* Highway Research Board Special Report 29, Nat. Acad. Sci., pp. 20-47.

Vila, J.M., (1977) : *Carte de l'Algérie au 1/200 000, feuille de Constantine (P-Q ; 3-4),*. Publ. comm. Serv. Carte Geol, Algérie/SONATRACH, not. Expl. Détaillée, 45p.

Vila, J.M., (1980) : *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens.* Thèse Doct. Univ. P. et M. Curie. Paris. 3 Vol, 665 p.

Wildi, W., (1983) : *La chaîne Tello-rifaine (Algérie - Maroc - Tunisie) : Structure, stratigraphie et évolution du Trias au miocène.* Rev. Géol. Dyn. Geogr. Phy. Paris. 24, pp. 201-297.

Zaruba, Q., Mencl, V., (1982): *Landslides and their control,* Prage,Academia, 323 p.

Zebouchi, H., (2008) : *Etude géologique et géotechniques des zones instables du versant Est du barrage de Beni Haroune. Wilaya de Mila.* Thèse magi. Univ. Jijel, 154 p.