



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche  
Scientifique



Université Larbi Tébessi. Tébessa  
Faculté des Sciences Exactes, des Sciences de la Nature  
Et de la Vie  
Département : Sciences de la Terre et de  
l'Univers

## MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Science de la Terre et L'Univers

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

### Thème :

**Mila's earthquake induced landslide: The failure  
mechanism**

**Glissement de terrain induit par le séisme de Mila : le  
mécanisme de rupture**

Présenté par :

El Houssaini Ouail

Louafi Amir Eddine

Devant le jury :

<b>Dr. Benhamadi H.</b>	<b>MCB</b>	<b>Université. Tébessa</b>	<b>Président</b>
<b>Dr. Djabri M.</b>	<b>MCA</b>	<b>Université. Tébessa</b>	<b>Examineur</b>
<b>Pr. Boumezbeur A.</b>	<b>PR</b>	<b>Université. Tébessa</b>	<b>Rapporteur</b>

Juin 2022

# *Remerciement*

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

*Nous tenons d'abord à remercier très chaleureusement*

***Pr. Boumazbeur Abderrahmane***

*Qui nous a permis de bénéficier de son encadrement.*

*Les conseils qu'il nous a prodigué, la patience, la  
confiance qu'il nous a témoignés ont été déterminants  
dans la réalisation de notre travail de recherche.*

*Nous présentons nos profonds remerciements aux  
membres de jury qui ont bien voulu accepter  
d'examiner et de juger notre travail de recherche.*

*Nous tenons également à remercier tous les  
enseignants et le personnel de département  
particulièrement*

***Dr. Aoun Mounira, Pr. Atmania Djamel,***

***Pr. Boubaaya Djamel.***

*Merci à tous et à toutes...*

***Amir et Ouail***

# *Dédicace*

*Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant  
pourtout.*

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère et mon  
cher père.*

*À mes frères **Massinissa, Mohamed Ali**  
ET La petite **Lina**.*

*À tout mes copains et mes amis **Ayhem et Assil**  
sans oublier mes collègues particulières*

***Sami Hafnaoui***

*Et à toute personne ayant réussi de  
prêt ou de loin à la réalisation de ce  
modeste travail.*

*Et à tous ceux qui m'aiment.*

***Ibrahim et Djaber**, vous resterez toujours au  
nos cœurs.*

**Louafi Amir**

# *Dédicace*

*Avant tout je remercie ALLAH le tout puissant  
pourtout.*

*Je dédie ce modeste travail à ma chère mère et mon cher  
père*

***Ayadi Dalila et Mohamed***

*À ma petite sœur*

***Raouane.***

*À tout mes amis, et particulièrement*

*Toute ma famille au Maroc*

*Et à toute personne ayant réussi de  
prêt ou de loin à la réalisation de ce  
modeste travail.*

*Et à tous ceux qui m'aiment.*

***Ibrahim et Djaber, vous resterez toujours au  
nos cœurs.***

***El Houssaini Ouail***

## الملخص

يتعلق الموضوع الذي تطرقنا إليه بدراسة الانهيارات الارضية الناجمة عن زلزال صيف 2020, بحيث يعتمد نجاح مشاريع البناء و التطوير على جودة و جدوى دراسة المخاطر.

يؤدي الجهل و سوء الفهم للمعايير المتعلقة بالموقع ، و خاصة بالنسبة لبناء المباني و العقارات بطريقة غير مسؤولة و دون دراسة مسبقة لنوعية و خصائص الارض لهذا الموقع يتسبب في مواقف خطيرة كحدوث الظواهر الطبيعية مثل الزلزال ، المثال المأخوذ في هذا الموضوع هو مثالي في هذا الموقف.

و نتيجة للعوامل الطبيعية و خصائص التربة في الموقع تسبب في الانهيارات الارضية الذي لوحظ على مستوى حي الخبرة ولاية ميله.

يتطرق موضوع هذه الدراسة بعد العمل الميداني تم إجراء تحليل لخطر الانهيارات الارضية التي حدثت في هذه المنطقة.

**كلمات مفتاحية : الزلزال ، الانهيارات الارضية ، العوامل الطبيعية ، الخطر ، حي الخبرة ميله.**

## Résumé

Le sujet de notre thème porte sur l'étude des glissements de terrain de la ville de Mila (cité El Kherba) provoqués par le séisme de l'été 2020. La réussite de tous projets de construction ou d'aménagement est entre autre conditionnée par la qualité et la viabilité de l'étude du risque. L'ignorance et la méconnaissance des paramètres physiques inhérents au site de construction des bâtiments et des immobiliers ou la prise de décision de construire dans un site donné sans étude préalable de la qualité et des propriétés du terrain conduisent à des situations dangereuses. L'exemple pris dans ce mémoire, qui en est le glissement de Mila, est une illustration parfaite de cette situation.

Le présent travail a été réalisé dans le cadre de la préparation de notre mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master académique dans le domaine de Géotechnique et Géologie de l'ingénieur à propos des glissements de terrain induits par le séisme.

Résultant d'une combinaison d'actions naturelles et entropiques, l'aléa glissement de terrain observé au niveau de la cité d'El Kherba à Mila a fait l'objet de cette étude. A l'issue d'un travail de terrain en grande partie, une analyse de l'aléa glissement de terrain survenu au niveau de ce site a été faite afin de déterminer les différentes causes et mécanismes responsables du déclenchement de ce mouvement. L'examen du désordre et des dégâts observés sur différents éléments exposés a été réalisé exprimant ainsi la vulnérabilité des sols intégrés au site d'étude. Enfin, une petite synthèse pour mesurer le risque ou les conséquences de cet aléa sur ce secteur du wilaya qui est largement habitable.

**Mots clés : Séisme, Glissement de terrain, Risque, Vulnérabilité, El kherba, Mila.**

## **Abstract**

The subject of our theme relates in particular to the study of landslides caused by the earthquake of the summer of 2020. The success of all construction or development projects depends, among other things, on the quality and viability of the risk study. Ignorance and misunderstanding of the physical parameters inherent to the site, especially for the construction of buildings and real estate in an irresponsible manner and without prior study of the quality and properties of the land on this site, lead to dangerous situations. The presence of natural phenomena or of the human or material order lead to situations of risk. The example taken in this thesis is a perfect illustration of this situation.

Resulting from a combination of natural and entropic actions, the landslide hazard observed at the level of the city of El Kherba in Mila was the subject of this study. After much field work, an analysis of the landslide hazard that occurred at this site was carried out in order to determine the various causes and mechanisms responsible for triggering this movement. An examination of the disorder and damage observed on various exposed elements was carried out, thus expressing the vulnerability of the soils integrated into the study site. Finally, a small synthesis to measure the risk or the consequences of this hazard on this sector of the wilaya which is largely habitable.

**Key words: Risk , Vulnerability, Landslide, Earthquake**

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Cadre géologique et géographique</b>	
I-1 Introduction.....	01
I-2- Aperçu géographique et généralités sur la région étudiée.....	01
I-2-1 Situation géographique de la Wilaya de Mila.....	01
I-3- Hydrographie de la région d'étude.....	03
I-4- Climat et Végétation de la région.....	04
I-5- Sismicité de la région.....	05
II : Cadre géologique.....	08
II-1 Domaine interne.....	08
II-2 Socle kabyle.....	08
II-3 La chaîne calcaire.....	08
II-4 Domaine médian ou le domaine des flyschs.....	09
II-5 Domaine externe.....	09
II-5-1 Domaine tellien.....	09
II-6- Avant pays.....	10
II-6-1 Avant pays allochtone.....	10
II-6-2 Avant pays autochtone.....	10
III- Géologie du bassin Néogène de Mila-Constantine.....	12
III-1 Introduction.....	12
III-2 Caractéristiques des ensembles lithostratigraphiques du bassin Néogène de Mila-Constantine.....	13
III-2-1 Trias.....	15
III-2-1-1 Jurassique.....	15
III-2-1-2 Crétacé.....	16
III-2-1-3 Crétacé moyen et inférieur.....	18
III-2-1-4 Crétacé supérieur.....	19
III -2-2 Paléogène.....	20
III-2-2-1 Paléocène et l'Éocène.....	20
III-2-2-2 Oligocène.....	21
III-2-3 Néogène.....	21
III-2-4 Quaternaire.....	25
III- 2-5- Aspect morpho structural du bassin néogène de Mila-Constantine.....	26
III-2-5-1 Tectonique du Constantinois.....	28
III-2-5-1-1 Tectonique de la plate-forme néritique constantinoise.....	28



III-2-5-2- Structures particulières.....	32
III-2-5-3- Phases de déformation de la plate-forme néritique constantinoise.....	32
III-2-5-4- Histoire paléogéographique des dépôts Mio-Pliocène.....	34
<b>CHAPITRE II : Étude générale sur les glissements de terrain</b>	
I- Introduction.....	36
II- Définition d'un glissement de terrain .....	36
III- Les mouvements de terrains.....	37
III-1- Critères de classification des mouvements de terrains .....	37
III-2- Morphologie et dynamique des mouvements de terrain.....	38
IV- Les facteurs intervenants dans les processus d'instabilité .....	47
V- Cause du déclenchement.....	49
VI - Calcul de stabilité d'un glissement.....	52
VI -1 Généralité .....	52
VI – 2- Les paramètres de calcul de glissement.....	53
VI – 3- Méthodes de calcul.....	54
VI – 4- Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité.....	60
<b>Chapitre III : Les glissements de terrain induits par le séisme</b>	
I- Introduction.....	62
II- Paramètres Sismiques.....	63
III- La magnitude et la zone affectées par les glissements de terrain.....	63
IV- Les caractéristiques de glissement de terrain et les environnements géologiques .....	65
V- Les glissements cohérents dans les roches .....	65
VI- Conclusion .....	67
<b>Chapitre IV : Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés</b>	
I - Introduction.....	68
II - Description.....	68
III - Description du glissement de terrain d'El Kherba.....	71
IV - Reconnaissance géotechnique.....	72
V - Calcul de stabilité .....	79
VI - Interprétation phénoménologique du glissement.....	80
VII- Mécanisme de la rupture et le glissement induit par le séisme.....	82
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>84</b>

## Liste des figures

Figure 01 : Situation géographique et subdivision administrative de la Wilaya de Mila.....	03
Figure 02 : Réseau hydrographique du bassin de Mila (Remmache, 2006).....	04
Figure 03: Climat du secteur étudié.....	05
Figure 04 : Sismicité de la région de Constantine de 1900-2002 (Bouadja, 2010).....	07
Figure 05: Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des Maghrébides (Durand-Delga, 1969).....	08
Figure 06 : Carte schématique de la répartition des différents domaines paléogéographiques du Nord-Est algérien (Lahondère, 1987).....	11
Figure 07 : Principaux affleurements des Séries Néritiques Constantinoises et position du bassin Néogène de Mila-Constantine dans l'ensemble (Vila, 1980, modifiée).....	12
Figure 08 : Extrait de la carte structurale 1/500.000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens et position du bassin de Mila-Constantine dans l'ensemble (Vila, 1980).....	13
Figure 09: Carte géologique du bassin de Mila- Constantine (Vila, 1980).....	17
Figure 10 : Colonne lithologique du MioPliocène du plateau de Redjas (Vila; 1980).....	22
Figure 11 : Colonne lithostratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila.....	23
Figure 12 : Coupe géologique du Miocène de Mila (Marmi et Guiraud, 2006).....	24
Figure 13 : Coupe synthétique du Néogène de Sidi Mérouane (Durand-Delga, 1969).....	24
Figure 14 : Coupe descriptive de la région de Redjas (Vila, 1980).....	24
Figure 15 : Modèle schématique des dépôts laguno- continental du bassin de Mila (Coiffet, 1992).....	27
Figure 16 : Interprétation de l'image spatiale du bassin de Mila (Benabbas, 2006).....	31
Figure 17: Coupe géologique illustrant les différents contacts structuraux de la partie Nord du bassin de Mila Constantine (Coiffait, 1992).....	35
Figure 18 : Effondrement de voûtes karstiques (G. C. Flageollet, 1989).....	39
Figure 19 : Exemples d'écroulement rocheux (G. Colas et G. Pilot, 1976).....	41
Figure 20 : Bloc diagramme d'un glissement profond.....	42
Figure 21 : Types des glissements proprement dits (Colas et Pilot, 1976).....	42
Figure 22 : Eléments descriptifs d'un glissement rotationnel (G. Philipponnat, 1987).....	43
Figure 23 : Schéma descriptif d'un glissement plan (G. Philipponnat, 1987).....	44
Figure 24 : Ripage d'une masse rocheuse (L. Trévisant, 1971).....	44
Figure 25 : Exemple d'un fluage (G. Philipponnat, 1987).....	46
Figure 26 : Schéma illustratif d'une coulée boueuse (A. Benaïssa, 2003).....	47
Figure 27 : Différentes forces agissant sur une masse en mouvement (J. Costet et G. Sanglérat, 1983).....	55

Figure 28 : Découpage en tranches d'un talus (B. Hubert et al, 2003).....	58
Figure 29 : Forces agissant sur la tranche n (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003).....	59
Figure 30 : Relation magnitude du séisme et distance des zones affectées (Keffer1984).....	64
Figure 31 : Relation magnitude du séisme et surface de glissement (Keffer1984).....	64
Figure 32 : Colonne lithologique du MioPliocène du plateau de Redjas (Vila; 1980).....	69
Figure 33 : Modèle conceptuel du glissement de terrain induit par le séisme de Mila.....	70
Figure 34 : profil du talus d'El Kherba (google earth).....	70
Figure 35 : Forme irrégulière et des blocs de sol discontinus limités par des fissures latérales, Transversales et en échelon.....	72
Figure 36 : plan d'implantation des sondages carottés et coupes géotechniques.....	73
Figure 37 : Échantillon des sondages carottés SC03, Caisse N°09.....	74
Figure 38 : Échantillon des sondages carottés SC-OE-11, Caisse N°01.....	74
Figure 39 : montre un log de sondage ou les alternances de marnes, argiles et tufs prédomine.....	75
Figure 40 : coupe géotechnique profil 1.....	76
Figure 41: Photo montrant la présence de tuf saturé dans l'escarpement de glissement.....	76
Figure 42 : Coupe géotechnique selon le profil 2.....	77
Figure 43 : Coupe géotechnique selon le profil N°3.....	78
Figure 44 : modélisation du profil N°2 avec le cercle de glissement potentiel ayant un coefficient de sécurité $F_s=0.84$ .....	79
Figure 45 : Mouvement de terrain, lateralspread.....	80
Figure 46 : Model conceptuel du glissement d'El-Kherba.....	80
Figure 47:Complexe de Graben rétrogressif formé par liquéfaction partielle à faible profondeur au- dessus d'un étalement latéral.....	81
Figure 48 : Même complexe de graben après dépôt de Peoria Löss et l'établissement de couvert végétal.....	81
Figure 49 : Glissement induit par le séisme d'Alaska 1964.....	81
Figure 50 : Diminution des contraintes effective suite à l'augmentation de la pression de l'eau.....	82
Figure 51 :Emergence de source d'eau.....	83
Figure 52 :Affaissement d'une maison suite à un défaut de portance due à la liquéfaction.....	83

## Liste des tableaux

Tableau 01 : Les surfaces de séparation avec le substratum en place (A. Millies- Lacroix, 1981).....	38
Tableau 02 : Classification des processus d'instabilités en fonction des types de discontinuités rencontrés. ....	48
Tableau 03: Vitesses des mouvements de terrains (Varnes, 1978 et Crozier, 1986).....	49
Tableau 04 :Valeurs de coefficient de sécurité FS données en fonction de l'importance de l'ouvrage (G. Filliat, 1981).....	60
Tableau 05: Les facteurs connus dans le calcul de facteur de sécurité.....	61
Tableau 06 : Les facteurs inconnus dans le calcul de facteur de sécurité.....	61
Tableau 07 : caractéristiques des sols utilisés dans les calculs.....	77
Tableau 08 : caractéristiques des sols utilisés dans les calculs.....	78

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'étude des glissements de terrain induits par un tremblement de terre joue un rôle important dans la détermination du risque sismique, car les tremblements de terre peuvent induire des dommages considérables aux infrastructures et causer des pertes de vie et des blessures. Généralement, la détermination des risques de glissement de terrain est abordée par deux stratégies principales : l'examen détaillé de cas de glissement de terrain isolés ou l'étude de la distribution des mouvements de masse sur de vastes zones. La première approche du problème étudie le comportement physique des phénomènes et nécessite une connaissance détaillée de zones limitées, obtenue par des levés précis et des mesures sur le terrain. La seconde, au contraire, nécessite de grands ensembles de données géo-référencées, pour caractériser la distribution différente des facteurs environnementaux liés aux occurrences de glissement de terrain, et utilise l'analyse statistique.

# CHAPITRE I

## Cadre géologique

### I-1 Introduction

La wilaya de Mila est pratiquement dans sa totalité située dans ce qu'on appelle le bassin de Mila. Ce bassin Néogène s'étend de puis Zighoud Youcef au nord jusqu'au Djebel Lakhal au sud et de la ville de Constantine à l'est jusqu'au sud de la ville de Grarem. Ce bassin est constitué d'une succession de formations géologiques commençant à la base par des conglomérats et se terminant par des calcaires lacustres au sommet. Entre ces deux formations, de puissantes séries de marnes, des grés et des argiles se sont déposés.

La géodynamique externe active dans la région et la présence de l'oued rhumel a provoqué des creusements intenses et un relief escarpé sur la majeure partie de la ville et la partie Est de la wilaya. Ces reliefs en pente et la nature argilo marneuse des formations ont joué en faveur du phénomène de glissement qui a donné l'aspect moutonné de l'ensemble des talus notamment aux alentours de la ville. Les facteurs de prédispositions de déclenchement des instabilités qui sont liés à la nature géologique des terrains et à la structure jouent simultanément avec les facteurs déclencheurs qui sont la pluie pour créer les instabilités et les problèmes connexes. A ces facteurs, on a assisté à l'action d'un facteur supplémentaire qui est le séisme de 4.9 pour créer une catastrophe. Ce séisme à provoquer le glissement d'El Kherba.

Le sinistre à toucher plus de milles bâtisses et à provoquer des dégâts qui s'élèves à des centaines de milliards de dinars de pertes. La zone touchée par le séisme est de preqse 03 km<sup>2</sup>. Les maisons sont complètement à totalement détruits.

Les déformations du sol vont de la simple fissure à étirement et chevauchement de plus de 10 m. des affaissements de plus de 2 mètres et des soulèvements similaires ont été enregistrés.

Ce travail est venu faire une investigation profonde sur les facteurs qui ont provoqué cette catastrophe et les mécanismes de rupture. Les résultats attendus peuvent servir de guide dans les prochains plans d'aménagement et d'urbanisme dans la wilaya.

### I-2- APPERCU GEOGRAPHIQUE ET GENERALITES SUR LA RÉGION ETUDIEE

#### I-2-1 Situation géographique de la Wilaya de Mila

La ville de Mila (l'antique Milev), dont fait partie notre secteur d'étude, est située à une cinquantaine de kilomètres à l'Ouest de Constantine et 33 km de la mer méditerranéenne; sur une superficie de 9.373 km<sup>2</sup> et d'altitude moyenne de 500 m. Sur cette aire géographique se répartissent 13 daïras et 32 communes administrative elle est délimitée par la Wilaya de

## Chapitre I : Cadre géologique

Jijel et Skikda (105 km) au Nord; la Wilaya de Constantine (50 km) à l'Est; la Wilaya d'Oum el Bouaghi et Batna, au Sud et la Wilaya de Sétif (140 km), à l'Ouest (Figure 01).



**Figure 01 : Situation géographique et subdivision administrative de la Wilaya de Mila.**

### I-3- Hydrographie de la région d'étude

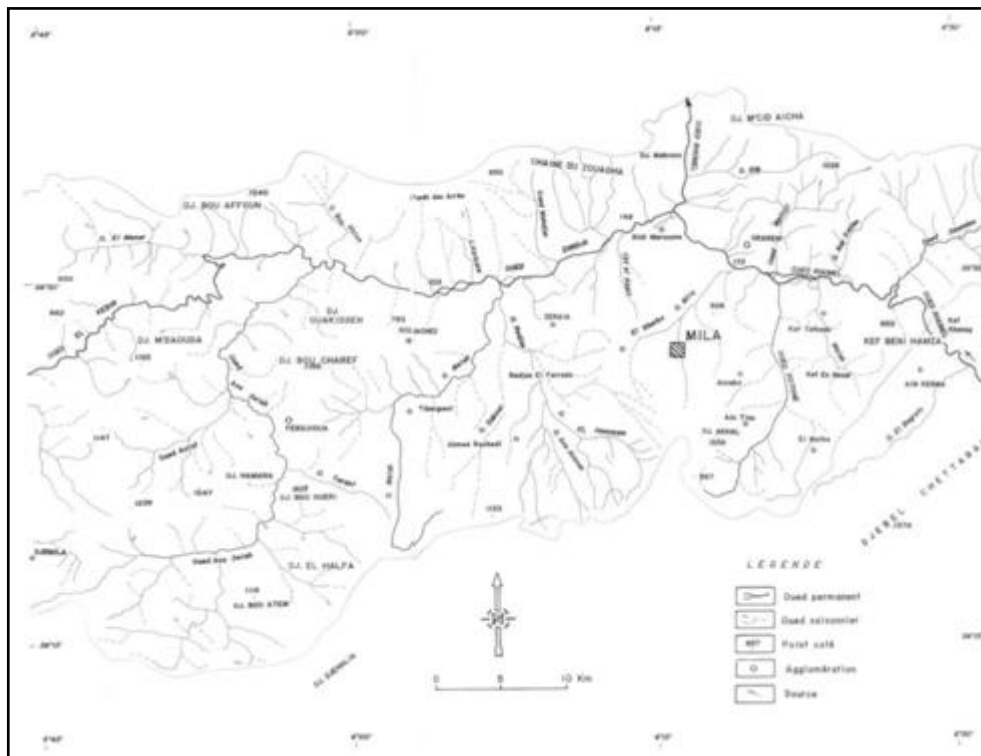
L'hydrologie du bassin de Mila-Constantine qui est caractérisé, dans l'ensemble, par une altitude moyenne d'environ 500 m et un réseau hydrographique extrêmement dense et hiérarchisé alimentant l'Oued Rhumel qui descend de 256 à 135 m pour former avec Oued Nadja, l'Oued El Kébir au centre Ouest de la commune d'el Grarem. Les affluents de ce dernier sont les Oueds Mehari, l'Oued Tadjenanet et l'oued Athmania. Il draine les hautes plaines de l'Est à l'Ouest.



## Chapitre I : Cadre géologique

La forme de la région en bassin avec un couloir Est-Ouest fait que nous avons une orientation générale du réseau hydrographique Sud-Nord ou Nord-Sud selon les cas (Mebarki, 1982) (Figure 02).

La prédominance de dépôts détritiques (conglomérats, graviers et sable), rend assez favorable l'emmagasinement des eaux et le développement de nappes phréatiques. Cependant, la contamination par les sels des roches évaporitiques rend par endroit ces eaux inutilisables.



**Figure 02 : Réseau hydrographique du bassin de Mila (Remmache, 2006)**

### I-4- Climat et Végétation de la région

La position géographique de la Wilaya de Mila est soumise aux influences du climat méditerranéen, avec des nuances qui varient du Nord au Sud. Dans la partie Nord, il règne un climat de type subhumide frais caractéristique des reliefs montagneux (Côte, 1974 ; RullanPerchirin, 1985), tan disque dans la partie Sud de la Wilaya on note une dominance des influences subarides plus ou moins doux.

Notre zone d'étude se positionne dans la partie Nord, elle bénéficie de certaine fraîcheur et d'une lame de précipitation plus ou moins importante. Elle reçoit une moyenne de 700 mm/an dans la zone montagneuse, 350mm/an au Sud et 400 à 600mm/an dans la partie centrale. Elle est marquée aussi par des écarts de température assez importants ; en Été, sec et

## Chapitre I : Cadre géologique

chaud plus ou moins long, les températures avoisinant les 40°C, mais en Hiver, doux et humide, elles sont généralement basses et peuvent parfois descendre en dessous de 0°C.

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.

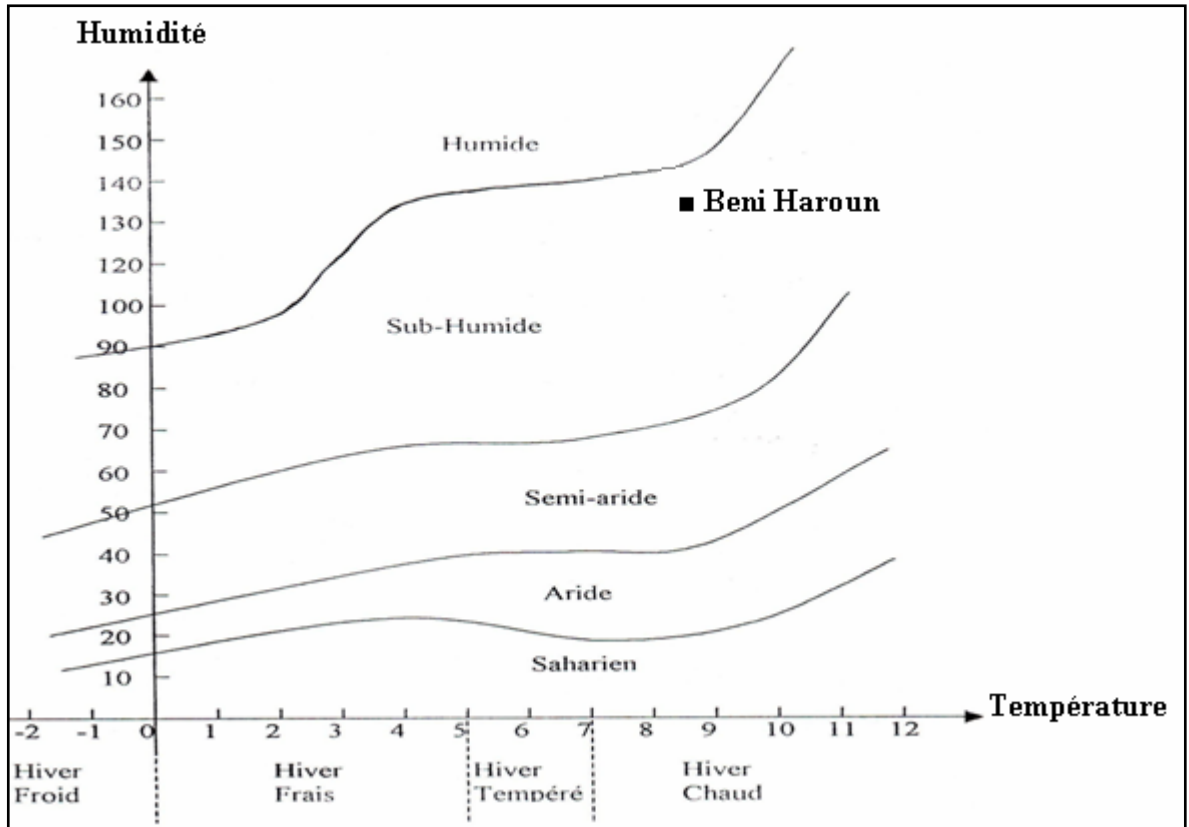


Figure 03 : Climat du secteur étudié.

### I-5- Sismicité de la région

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

La ville de Mila est située dans une région sismique classée d'après R.P.A1 comme pouvant subir des secousses d'intensité moyenne à faible. Cette zone est bordée au Nord-Ouest et au Sud-est par deux zones sismiques plus actives et d'intensité possible supérieure à 4 (Fig.4) (Michel, 2000). Parmi les épïcèntres localisées dans un rayon de 3 km autour de la ville de Mila, les séismes les plus importants sont déroulés comme suit (Michel, 2000 et Bouedja, 2010:

## Chapitre I : Cadre géologique

1. Pour la période 1951-1960, cette période est caractérisée par une sismicité faible et diffuse (période de révolution incluse) mais de magnitudes importantes (16 événements de magnitude  $M_s > 4$ ).

2. Les deux plus importants événements ont été localisés au Sud-ouest de la ville de Guelma et au Nord-Ouest de la ville de Mila. Cinq événements ont été localisés dans la région de Constantine « El Merige » (Bouedja, 2010).

À partir de 1977 des événements importants ont été enregistrés presque tous de  $M_s > 3$ . Les deux événements les plus importants se sont produits au Nord-est du village d'Ain Fakroun et au Nord du village de Chelghoum el Aïd (Bouedja, 2010).

3. Le séisme de 23/8/1978 : dans la zone de chevauchement de Sidi Mérouane à une distance de 16 km du barrage de Beni Haroun avec une magnitude non déterminée.

4. Le séisme de 20/12/1983 : dans le massif de Sidi Dris à environ 27 km au barrage de Beni Haroun avec une magnitude de 4,6 Mm. Le séisme répertorié comme le plus important est localisé sur un rayon de 50 km autour de la ville de Mila est celui du 27/1/1985, de magnitude du 5.9 Mm et dont leur épicerentre est située au Nord-est de Constantine (Iben Badis).

5. La période 2000-2002 est caractérisée par une forte activité, la majorité des événements ont des magnitudes  $3 < M_s < 4.5$ .

Cette période est bien distribuée dans la moitié Nord de la région de Constantine en petits essais. Ces épicerentres sont observés principalement dans la région comprise entre El-Kantour et le Nord de Djebel Sidi-Driss, au Nord-est de Djebel Ouasch, au Nord-Ouest du village de Sidi Mérouane, dans la région d'Oued Habeba et au Nord de la ville de Constantine (Bouedja, 2010).

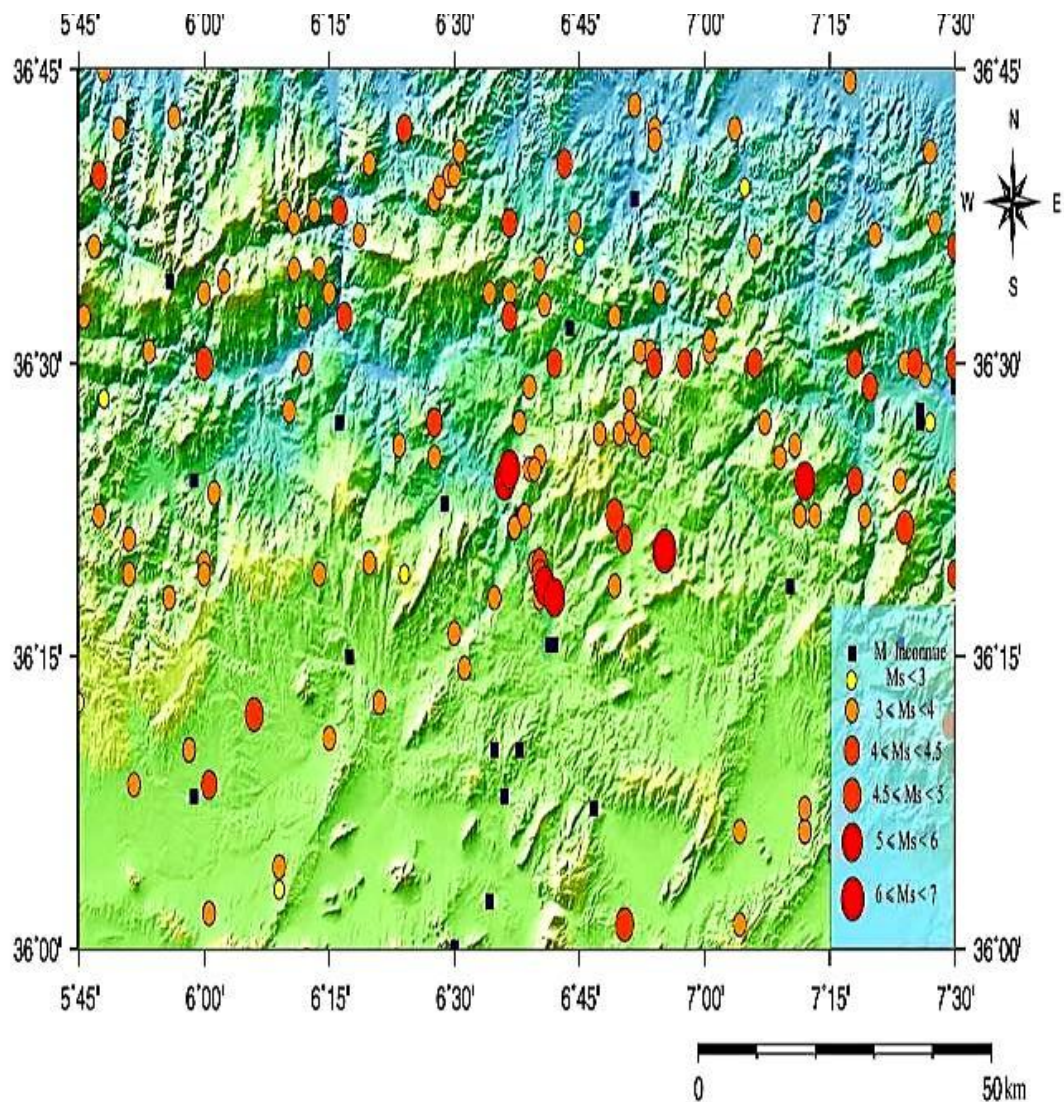
6. La période de 2003-2009 : La région Nord de Mila est caractérisée par une sismicité diffuse et des magnitudes importantes, se manifestant essentiellement dans les régions suivantes :

- La région entre Sidi Mérouane et Redjas : les épicerentres sont concentrés essentiellement le long de la vallée d'Oued Enndja et sur les versants méridionaux de la Chaîne de Zouara. La plupart des événements ont des magnitudes  $M_l > 3$ .

## Chapitre I : Cadre géologique

- La région de Mila : un alignement d'épicentres de direction NW-SE passant à la ville de Mila.

- M'Cid Aicha : au Nord du village de Grarem la sismicité est présente essentiellement sur la partie Ouest de Djebel Sidi-Driss et sur les versants de Djebel M'Cid-Aicha, parfois avec des magnitudes  $M_I > 4$  (Bouedja, 2010).



## Chapitre I : Cadre géologique

### II- Cadre géologique

De point de vue géologique, la région de Mila appartient au domaine tellien, segment oriental de la chaîne des maghrébides, (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 (Figure 05) :

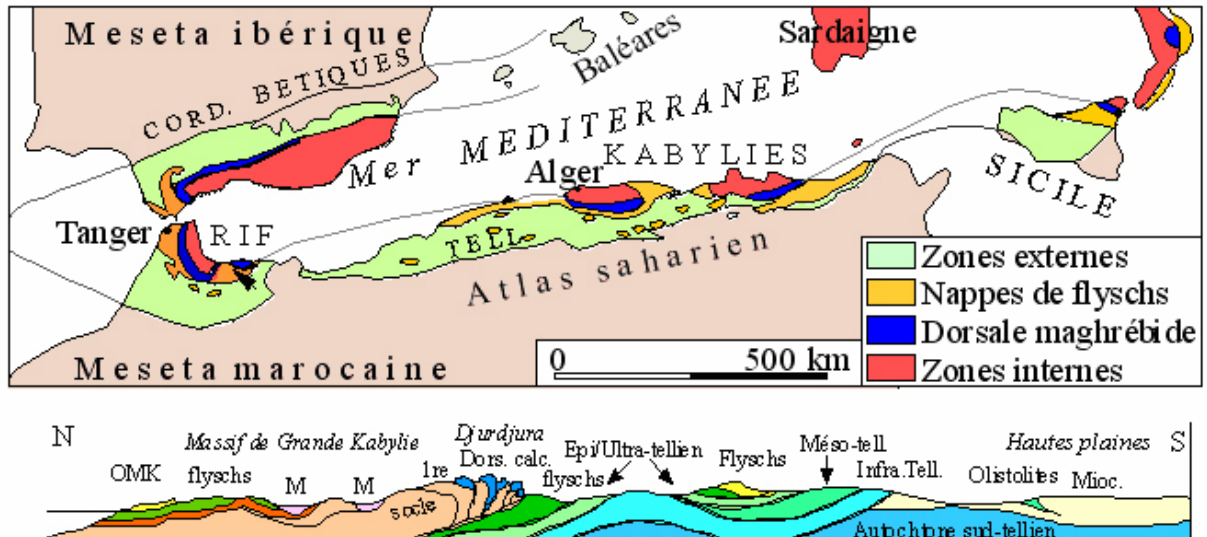


Figure 05 : Carte et coupe structurale schématique de la chaîne des Maghrébides (Durand.Delga, 1969).

#### II-1 Domaine interne

Il correspond au socle cristallophyllien et sa couverture sédimentaire carbonatée.

#### II-2 Socle kabyle

Il s'agit d'un ensemble de formations cristallophylliennes d'âge Paléozoïque (Durand Delga, 1969 ; Raoult, 1974 et Bouillin, 1977).

#### II-3 La chaîne calcaire

C'est la couverture sédimentaire du socle Kabyle qui marque la limite entre ce dernier au Nord et les zones telliennes au Sud. Elle montre des termes allant du Permo-Trias, discordant sur le socle kabyle, à l'Oligocène (Raoult, 1969 - 1974).

## Chapitre I : Cadre géologique

### II-4 Domaine médian ou le domaine des flyschs

Ce sont des formations sédimentaires allochtones d'âge Crétacé à Éocène (Raoult, 1975). Elles sont classiquement subdivisées en :

#### Flysch Maurétanien

Sont caractérisées par des formations allant du Néocomien au Lutétien (Gelard, 1969 et Bouillin, 1977).

#### Flysch Massylien

Sont essentiellement pélito-quartzitiques. (Raoult, 1969). Ces flyschs comportent une série qui va du Crétacé inférieur « Néocomien » à l'Éocène (Bouillin, 1977).

#### Flysch Numidien

Occupe une position structurale allochtone, la plus haute de l'édifice alpin. Il est représenté par une série argilo-gréseuse d'âge Oligocène à Burdigalien Basal (Raoult, 1972 et Lahondère, 1979).

### II-5 Domaine externe

#### II-5-1 Domaine tellien

Il correspond aux formations situées sur la paleomarge africaine (Bouillin, 1986). Ce sont des séries épaisses à faciès marno-calcaire d'âge Crétacé-Éocène, issues du sillon tellien (Vila, 1980). Certains auteurs notamment Lahondère (1987) subdivisaient les formations du domaine tellien en trois grandes unités (Figure 06).

#### Unités ultra-telliennes

Sont largement développées dans le Constantinois. Ces unités déposées sur sa marge septentrionale, sont caractérisées par des faciès micritiques clairs d'âge Crétacé à Eocène (Durand Delga, 1969).

#### Unités telliennes sensu-stricto

Regroupent les unités épi, méso et infra telliennes (Keiken, 1962). Ces unités correspondent aux formations carbonatées du Jurassique, souvent dolomitisées et surmontées de calcaire plus ou moins massif du Valanginien au Cénomani (Coiffait, 1992).

## Chapitre I : Cadre géologique

### Unités Péri-telliennes

Elles sont représentées au Nord et à l'Ouest de Constantine (Djebel Chettabah, Djebel Akhal, Djebel Grouz et Djebel el Kheneg). Dans la zone septentrionale et occidentale, cette unité se distingue par ses formations Jurassico-Crétacées caractérisées par des faciès intermédiaires entre les faciès de plateforme (calcaire et marnocalcaire du néritique) et des faciès de bassins (marnes du domaine tellien).

### II-6- Avant pays

Il correspond aux formations calcaires et marneuses de la plateforme constantinoise et du domaine atlasique. Il comporte l'avant pays allochtone et l'avant pays autochtone (Vila, 1980).

#### II-6-1- Avant pays allochtone comporte plusieurs unités :

##### •Unités Sud sétifiennes

Sont caractérisées par des séries sédimentaires mésozoïques de plateforme subsidente, qui admettent des intercalations pélagiques. Elles s'intercalent entre l'unité néritique constantinoise et les écailles atlasiques des Sellaoua (Wildi, 1983 et Vila, 1980).

##### •Unités néritiques constantinoises

Sont caractérisées par des séries carbonatées épaisses à microfaunes benthiques et a rudistes du Mésozoïque (Vila, 1980), déposées sur une plate-forme faiblement subsidente. Ces unités chevauchent les écailles de Sellaoua et les unités Sud sétifiennes.

##### •Unités des Sellaoua

Affleurent aux pieds des Séries Néritiques Constantinoises chevauchantes. Elles se caractérisent par des faciès bordiers du sillon atlasique. Le saut brusque de faciès entre ces séries et l'Atlas autochtone serait cependant suffisant pour envisager des raccourcissements considérables attribuables à des chevauchements de grande ampleur (Vila, 1980).

#### II-6-2- Avant pays autochtone

Est représenté par des séries sédimentaires mésozoïques épaisses et très plissées. Ces séries sont principalement localisées au niveau de : l'Atlas tunisien, l'Atlas saharien, Monts du Hodna, Monts de Batna et Monts des Aurès.

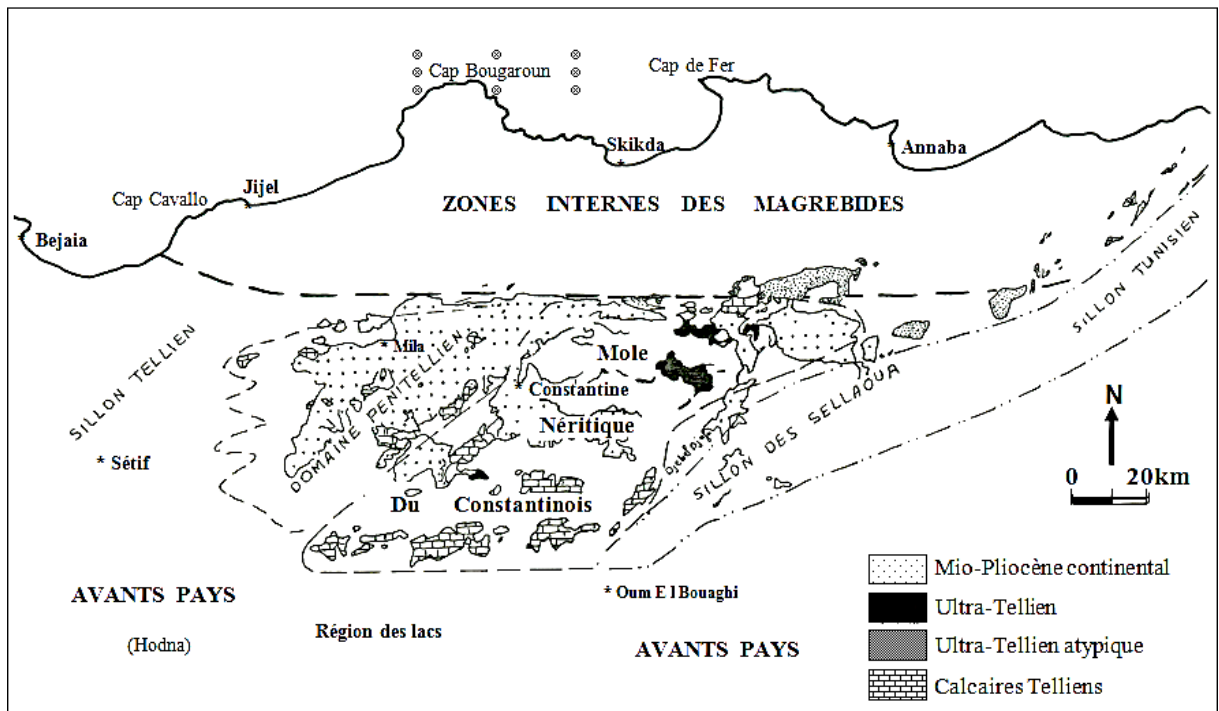


Figure 06 : Carte schématique de la répartition des différents domaines paléogéographiques du Nord-Est algérien (Lahondère, 1987).



### III- GEOLOGIE DU BASSIN NEOGENE DE MILA-CONSTANTINE

#### III-1- Introduction

Le bassin de Mila, fait partie du bassin poste nappe du Constantinois (Coiffait, 1992), allant jusqu'à une cinquantaine de kilomètres à l'Ouest de Constantine. Il est couramment dénommé bassin Néogène de Mila (renferme le sous bassin de Mila, le sous bassin de Redjas et le sous bassin de Ferdjioua).

Il couvre une superficie de 3500 km<sup>2</sup> (de quarantaines de kilomètres de largeur et de 120km de longueur). Il est limité, au Nord, par l'arête montagneuse de Kalaa Touma, Djebel M'Cid Aicha, Djebel Sidi Driss, chaînon de Zouara, Djebel Arres et Djebel Sidi Bou Azza, à l'Est, par les massifs du Djebel Chettabah et el Kheneg au Sud, par le Djebel Ossmane, Djebel Akhal et Djebel Grouz et à l'Ouest, Djibals el Helfa, Djebel Boucharef et Djebel Oukissène. Tous ces massifs représentent leur substratum (Figure 07), qui provient de domaines paléogéographiques différents (rapprochés ou superposés lors d'une phase tectonique antérieure aux dépôts Néogène (Coiffait, 1992).

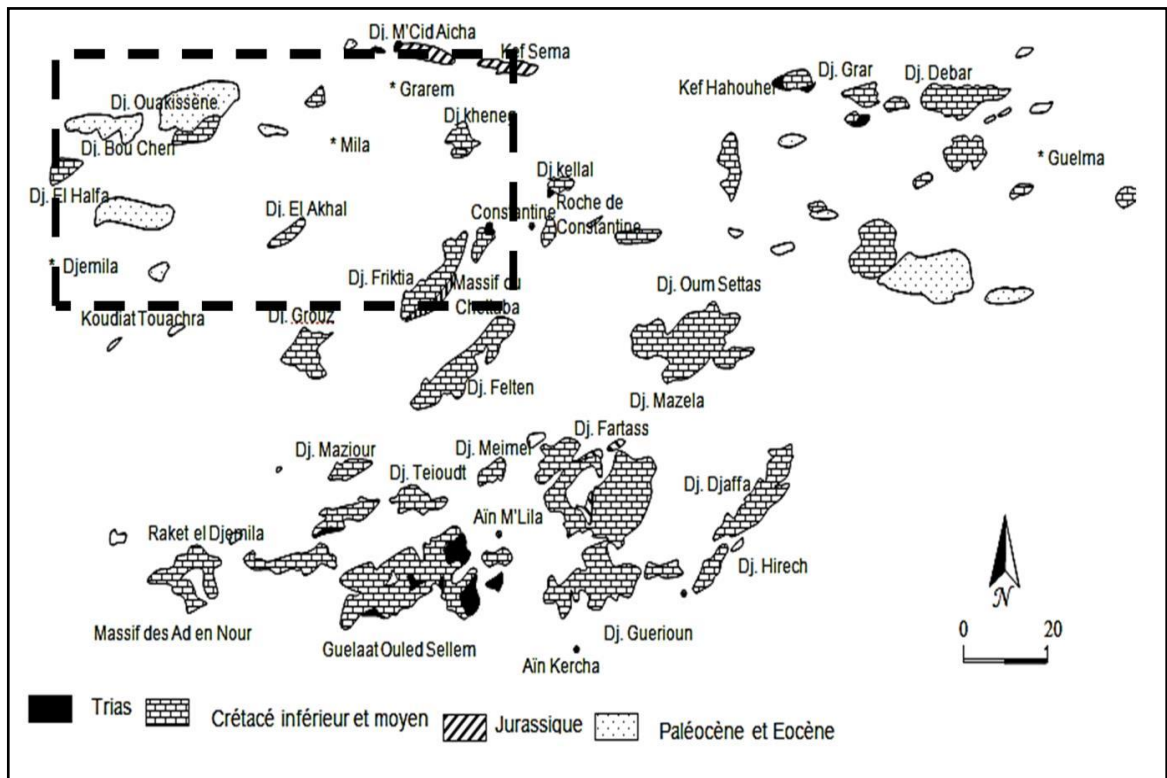
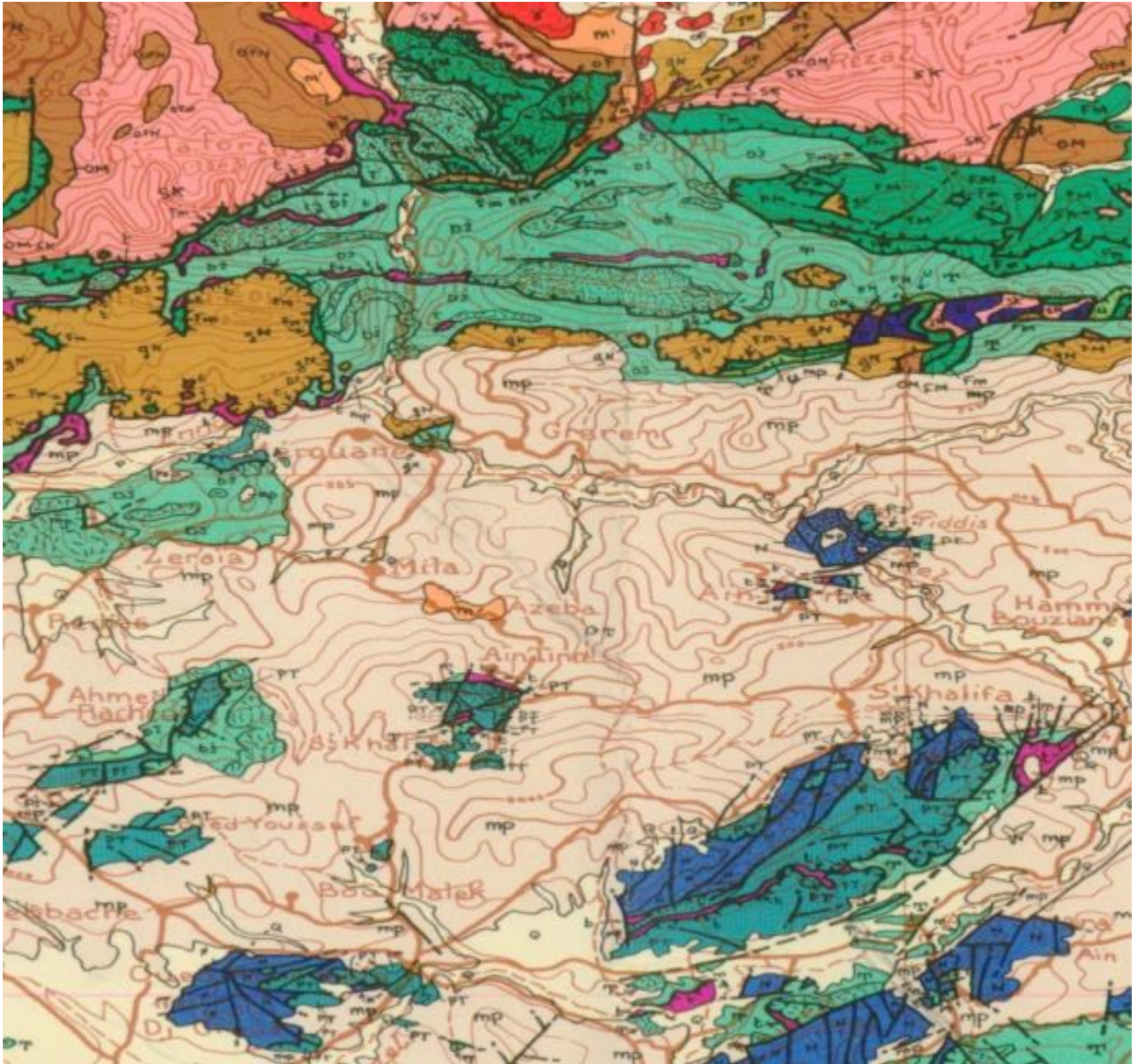


Figure 07 : Principaux affleurements des Séries Néritiques Constantinoises et position du bassin Néogène de Mila-Constantine dans l'ensemble (Vila, 1980, modifiée).

III-2- Caractéristiques des ensembles litho-stratigraphiques du bassin Néogène de Mila-Constantine



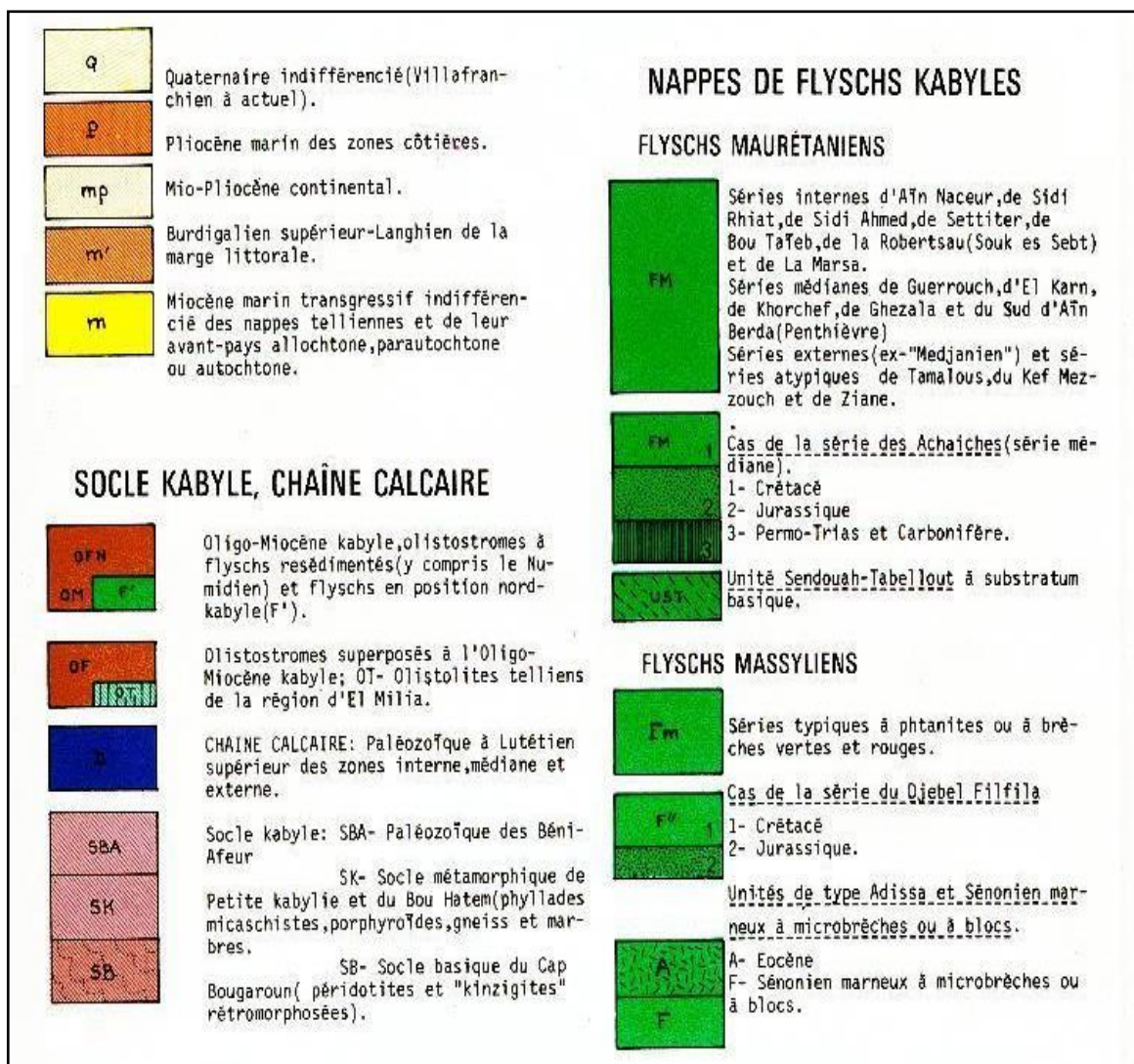
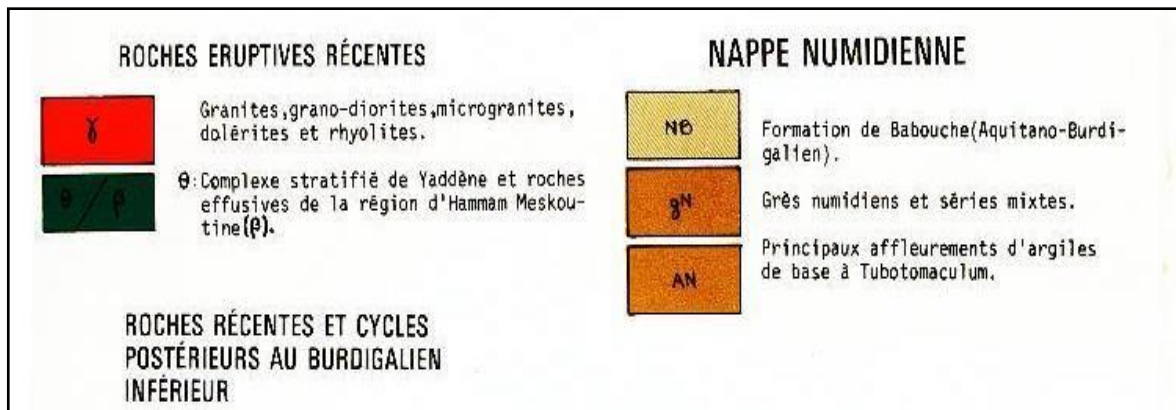


Figure 08 : Extrait de la carte structurale 1/500.000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-tunisiens et position du bassin de Mila-Constantine dans l'ensemble (Vila, 1980).

## Chapitre I : Cadre géologique

Les différents ensembles litho-stratigraphiques représentés dans le bassin de Mila-Constantine, sont résumés d'après les auteurs suivants : Durand Delga (1955), Vila (1980), Coiffait (1992) et Chadi (2004).

### III-2-1 Trias

Les formations du Trias représentent les terrains les plus anciens connus à l'affleurement dans le bassin. Ils sont essentiellement représentés par des dépôts évaporitiques et argileux. Ils n'affleurent jamais en position stratigraphique normale, mais se présentent en pointements diapiriques et en lames injectées le long des accidents tectoniques. On les voit souvent pointer à travers la couverture Mio-Plio-Quaternaire. Les formations (Fig.8 et 14) soient généralement peu étendues dans le substratum proprement dit du bassin de Constantine. Elles affleurent dans la région de Sidi Mérouane (el Hammam et Kodiat el Hamra), SE de Beinen (Kaf Azrou), au NW de Djebel Moul el M'Cid (Fej Akdal), au SW de Djebel kekra (Mat Kribsa) au pied de Djebel M'Cid Aicha à l'Ouest, entre M'Cid Aicha et Kaf Sema, Au Nord d'Ain el Kerma, deux pointements triasiques existent au Kef Beni Hamza et à l'Ouest du Bir el Mentene. Au Sud d'Ain Tin (ex : Belfort), la masse du Djebel Akhal est limitée au Nord par une lame de Trias, et au pied des massifs du Kheneg et du Djebel Chettabah.

#### III-2-1-1 Jurassique

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

Elles forment une épaisse série carbonatée dépassant les 600 m. 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 (Figure 07)

**a- Lias** : Il est représenté par des roches carbonatées massives surmontées par des calcaires à silex. Ces formations liasiques affleurent dans la région de Sidi Mérouane au NW, à el Kodiat el Hamra, (Joleaud, 1912), au SE de Beinen (Kaf Azrou) et Kodiat Es-Settra (Mat Sofa), au Nord de Draa Ache el Agab, à l'Est de Djebel M'Cid Aicha, (Durand-Delga, 1955).

**b- Dogger** : Il est essentiellement caractérisé par des formations carbonatées souvent dolomitiques.

## Chapitre I : Cadre géologique

**c- Malm :** Il est représenté par des calcaires fins à Calpionelles. Ces calcaires sont affectés par un phénomène de dolomitisation très important au Djebel Kheneg. Quand il n'est pas dolomitique est formé, dans sa partie supérieure de calcaires fins à Calpionelles, vers le Sud-Ouest (Djebel Frictia) (Figure 12), la dolomitisation se développe. Un phénomène identique s'observe vers le Nord, au Djebel Kheneg. Mais dans ce dernier affleurement, les phénomènes de dolomitisation secondaire sont importants.

Le Jurassique du substratum du bassin de Constantine et notamment du bassin voisin de Mila débute au Djebel Akhal (Fig. 8), où il affleure des roches carbonatées massives (Coiffait, 1992), surmontées de calcaires à silex, non datés, mais correspondant vraisemblablement au Lias. Dès le Jurassique cette région du substratum du bassin de Constantine s'avère être une zone de transition entre deux secteurs différents du domaine tellien (Coiffait, 1992) : le domaine des Babors, à l'Ouest et au Nord-Ouest, et le Môle Néritique de Constantine, à l'Ouest et au Sud-Ouest. Le Môle Néritique lui-même apparaît dès le Dogger comme une plate-forme, bordée au Sud-Est par une zone pélagique.

### III-2-1-2 Crétacé

Les termes crétacés correspondent dans le domaine tellien, souvent dans le Constantinois à des calcaires néritiques déposés sur une ancienne plateforme, appelée tout d'abord Autochtone «Néritique » (Durand Delga, 1955). Le Môle Néritique Constantinois est aujourd'hui morcelé du fait de la tectonique en différents massifs isolés les uns des autres, affleurant à la faveur de failles qui leur permettent de percer en horst leur couverture.

Les marnes et marno-calcaires du Crétacé inférieur, connues au Djebel el Akhal (Figure 07, 08 et 09) et qui s'observent également plus à l'Ouest dans la région d'Ahmed Rachedi, au Nord de Fredjioua, au Djebel Oukissène, au Boucharef et au Djebel el Halfa. Il s'agit là du Péni-tellien.

Quant au Crétacé supérieur, il affleure sur de grandes surfaces essentiellement au Sud du bassin de Constantine. Il constitue, avec le Tertiaire tellien également à dominante marneuse, (seul l'Yprésien est carbonaté).

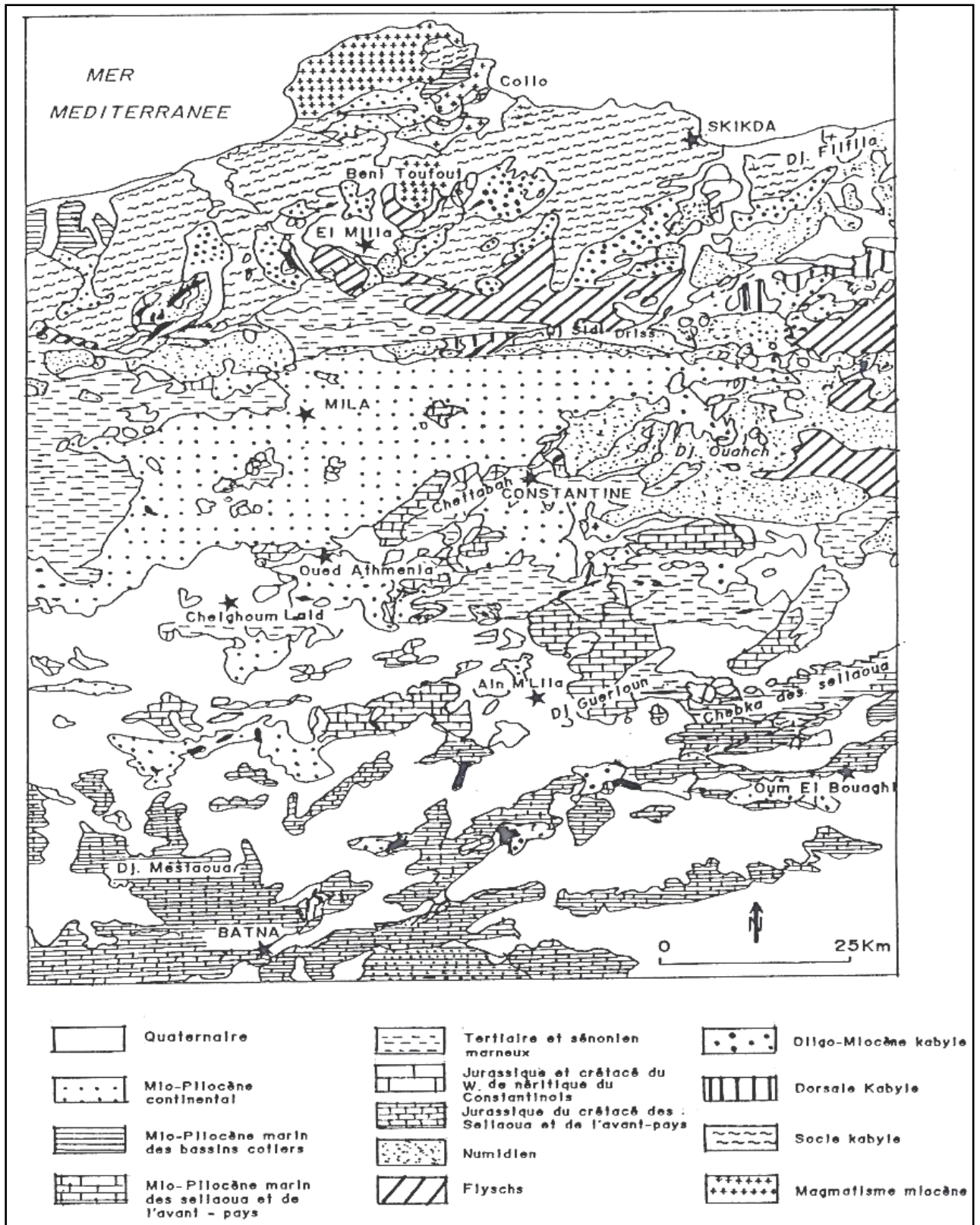


Figure 09 : Carte géologique du bassin de Mila- Constantine (Vila, 1980).

### III-2-1-3 Crétacé moyen et inférieur

Les formations du Crétacé inférieur sont caractérisées par des marnes et des marnocalcaires. Ces formations renferment des ammonites (comparables à celui de l'Ultratellien). Elles présentent une série continue et sont bien connues au Djebel Akhal (Joleaud, 1912), ainsi qu'à l'Ouest dans le massif d'Ahmed Rachedi, du Djebel Oukissène (Rouached), du Djebel Boucherf et du Djebels el Halfa (Ferdjioua) et dans la région de Sidi M'érouane (au Nord de Ache el Agab) au Sud-Ouest de Mouia, au Sud de Djebel M'Cid Aicha (région de Hamala).

Elles débutent par une alternance de marnes, de calcaires gris noir cristallins, parfois bréchiques, et de grès quartziteux gris. La série se poursuit par un puissant ensemble de marnes et de pélites calcaireuses. Les séries du Crétacé inférieur sont représentées par:

#### •Berriasien

Il débute par un conglomérat calcaire à Bélemnites.

#### •Berriasien supérieur

Correspond à quelques mètres de marnes et de calcaires marneux à calcite très finement détritique.

#### •Valenginien

Il correspond à une alternance de calcaires marneux et de marnes calcaires. Vila (1980), signale vers la base un niveau conglomératique à Duralia. Les marnes ont livré une riche faune d'Ammonites.

#### •Hauterivien

Il est représenté par une vingtaine de mètres de calcaires fins, claires à cassure foncée, alternant avec quelques marnes qui ont livré : Phylloceras, Spitidiscus, Olcodiscus et Lamellaptychus (Joleaud, 1912).

#### •Barrémien, l'Aptien et l'Albien

Ils correspondent à des marnes et marno-calcaires développés sur près de 250m. Un lambeau au flanc Sud du Djebel Akhal, présente des marnes à ammonites pyriteuses, a fourni quelques-unes des espèces caractéristiques et contenant aussi quelques passés gréseuses.

## Chapitre I : Cadre géologique

L'Albien est généralement mince à intercalations marneuses fréquentes. Seul le Djebel Grouz montre selon Vila (1980), un Albien à bancs calcaires bien développés et à silex, par-dessus des marnes et des marno-calcaires. Vila (1980) décrit un Crétacé « moyen » marno-calcaire et réduit fort comparable à celui de Djebel Karkara (Figure 11), dans les massifs affleurant au Sud-Est d'Ahmed Rachedi, aux Djebele Boucharef et Oukissène (au Nord de Ferdjioua) et au Djebel Halfa (à l'Ouest de Ferdjioua). Cette période est aussi marquée par une certaine instabilité dans la sédimentation. Cette instabilité est soulignée par la présence de surfaces durcies correspondant à des arrêts de sédimentation plus ou moins importants à la base de l'Albien, à la base du Cénomanién (au sein de celui-ci).

### III-2-1-4 Crétacé supérieur

Dans la partie centrale du domaine tellien, le Crétacé supérieur correspond, par-dessus les roches carbonatées du Cénomanién, à des calcaires en bancs beaucoup moins épais, le plus souvent micritiques et l'âge des calcaires varie d'un massif à l'autre : du Turonien (Djebel el Amrissine), Maastrichtien (Rocher de Constantine). Ces calcaires correspondent à un enfoncement progressif de la plate-forme du bassin Constantinois. Les séries du Crétacé supérieur sont représentées par :

#### •Cénomanién

Les formations du Cénomanién sont représentées par des horizons marnocalcaires de couleur grise et des marnes gris bleutées, parfois gypsifères et des barres de calcaires massifs. Il est marqué dans sa partie inférieure par une surface durcie. Ces formations sont connues dans les massifs du Djebel Kheneg, Djebel Grouz, Djebel Zouaoui, Djebel Chettabah, au chaînon de Zouara (au Nord-Ouest de la Mat el Merissa) au Nord de Djebel Berbouche, à l'Ouest de M'Cid Aicha (près de Hamala) (Figure 18).

#### •Turonien

Est également carbonaté et néritique, comporte 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 Chettabah.



## Chapitre I : Cadre géologique

### •Sénonien

Seules les formations du Sénonien inférieur sont représentées dans la partie occidentale du bassin Constantinois (Coiffait, 1992). Elles sont essentiellement formées d'alternances de marnes et de calcaires. Une surface durcie est assez fréquente au toit de ces calcaires sénoniens. Une couverture marneuse existe d'autant plus récente que l'on se déplace du Sud-Ouest vers le Nord-Est, elle débute au Sénonien au Sud-Ouest de (Koudiet Touachra), au Campanien dans le massif des Ouled Salem, mais que le Maastrichtien au Nord-Est (Rocher de Constantine) (Figure9). Seules les formations du Sénonien inférieur sont représentées dans le Djebel Kheneg et Djebel Grouz. Elles sont essentiellement formées d'alternances de marnes et de calcaires.

### •Maastrichtien

Il est composé de calcaires plus ou moins réduits selon les affleurements, comprend aussi des calcaires marneux en petits bancs, des marnes grises à la base, puis rapidement plus foncées (Figure 16).

## III-2-2- Paléogène

### III-2-2-1 Paléocène et l'Éocène

Au Paléocène et l'Éocène, le domaine tellien présente une remarquable unité de faciès, une série type de Paléocène et l'Éocène est celle de Redjas (au Nord) (Figure 10), les séries du Tertiaire tellien forment l'essentiel du substratum du bassin de Constantine: A la base, en continuité apparente de sédimentation avec les marnes du Maastrichtien sous-jacent ; 100 m environ de marnes noires parfois indurés et à débit finement feuilleté. Ces marnes contiennent très fréquemment des niveaux de boules jaunes carbonatées, assez souvent individualisées et formant des sortes de bancs à débit en miches. D'après Coiffait (1992), de nombreux lavages effectués dans ces niveaux de faciès pourtant homogène ont permis de dater :

### •Paléocène inférieur

A *Globigerina triloculinoides*, *Globorotalia pseudobulloides* et *Anomalina acuta* associés à quelques *Gumbelines* de petite taille, des débris de *Lagénidés* et des *Ostracodes* lisses ;

## Chapitre I : Cadre géologique

### •Le Paléocène supérieur

Avec *Globorotalia velascoensis*, *Globogerina triloculinoïdes* et de nombreux *Buliminidés*. Par-dessus, 150 à 200 m de calcaires à odeur fétides et bitumineux, très claires à cassure fraîche. Ils contiennent de fréquents niveaux rogneux de silex noirs. La base est assez souvent riche en concrétions.

### III-2-2-2- Oligocène

Dans le Nord Constantinois, tout entier rattaché à l'Oligocène, est constitué par une épaisse série, surtout argileuse et gréseuse, reposant en discordance sur les terrains les plus variés (Paléozoïque au Nord, Mésozoïque et Eocène au Sud).

Cette série occupe une large surface dans le bassin de Mila-Constantine, elle occupe la région entre Mouia et Sidi Mérouane, le Nord de Redjas, le chaînon de Zouara, l'Ouest de Hamala et Fedj Akdal (Durand Delga, 1955 et Vila, 1980) (Figure 13).

Elle comporte selon Durand Delga, (1955) des grès quartzeux au sommet, des marnes, argiles et calcaires au milieu et des Conglomérats à la base.

### III-2-3- Néogène

#### •Mio-Pliocène

Les formations du Mio-Pliocène recouvrent la majeure partie du bassin de Mila. Elles sont représentées essentiellement par des dépôts détritiques (conglomérats, graviers, sables, argiles) des dépôts évaporitiques (gypses, anhydrites et sel gemme) et des calcaires lacustres (Figure 11 et 12).

#### •Aquitaniens et le Burdigalien inférieur et moyen

Appelé aussi le Miocène marin, qui commence généralement par des niveaux conglomératiques et gréseux et se poursuit par des marnes gypseuses jaunâtres. Localement celles-ci présentent tous les caractères d'un dépôt synorogénique.

Le Numidien participe au substratum du bassin du Constantinois ainsi que le bassin de Mila.

Au N-E de Sidi Mérouane, il constitue la chaîne de Zouara. Le faciès des barres de grès hétérométriques alternant avec des argiles peu visibles, y est tout à fait banal.

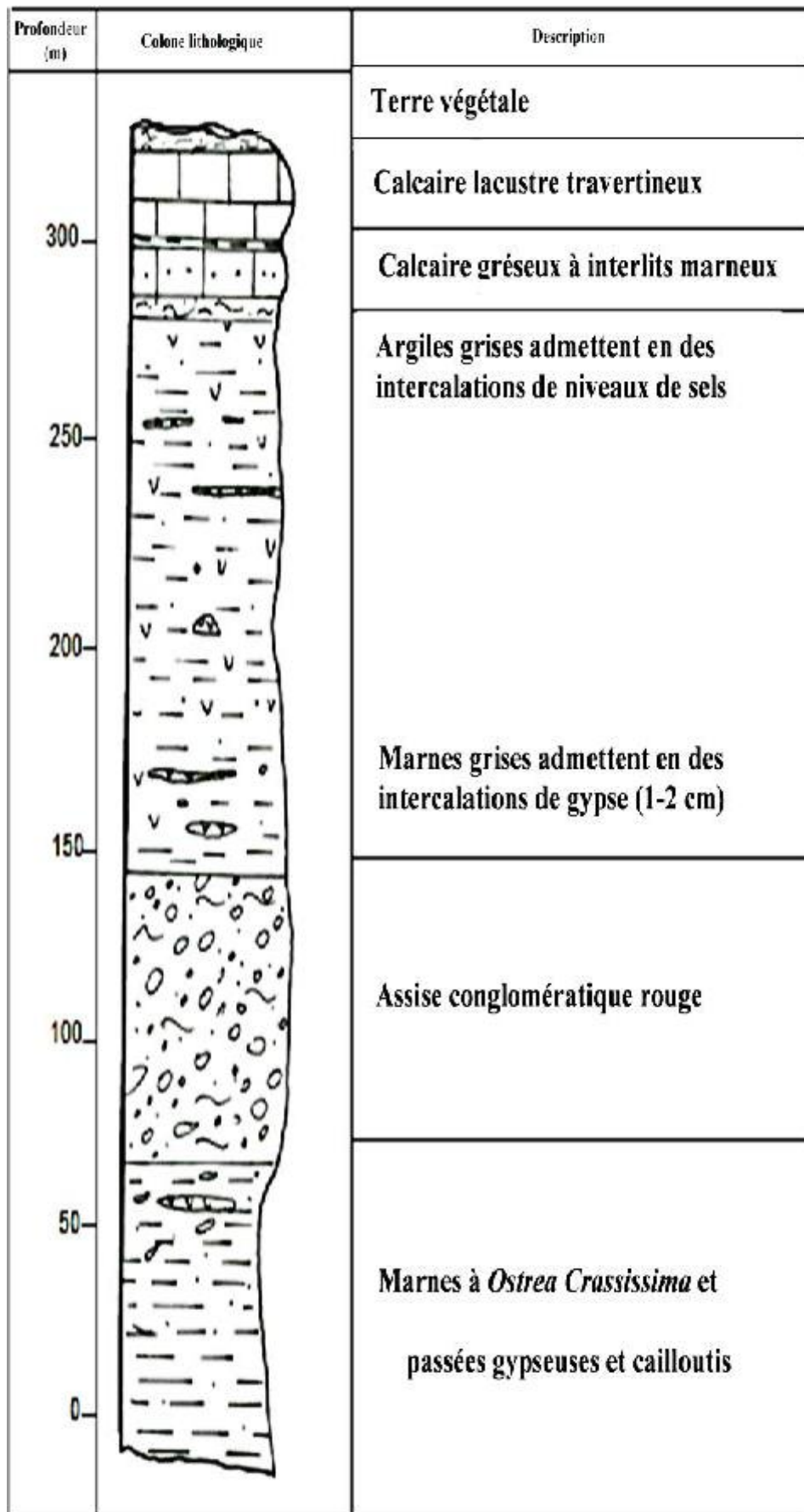


Figure 10 : Colonne lithologique du MioPliocène du plateau de Redjas (Vila; 1980).

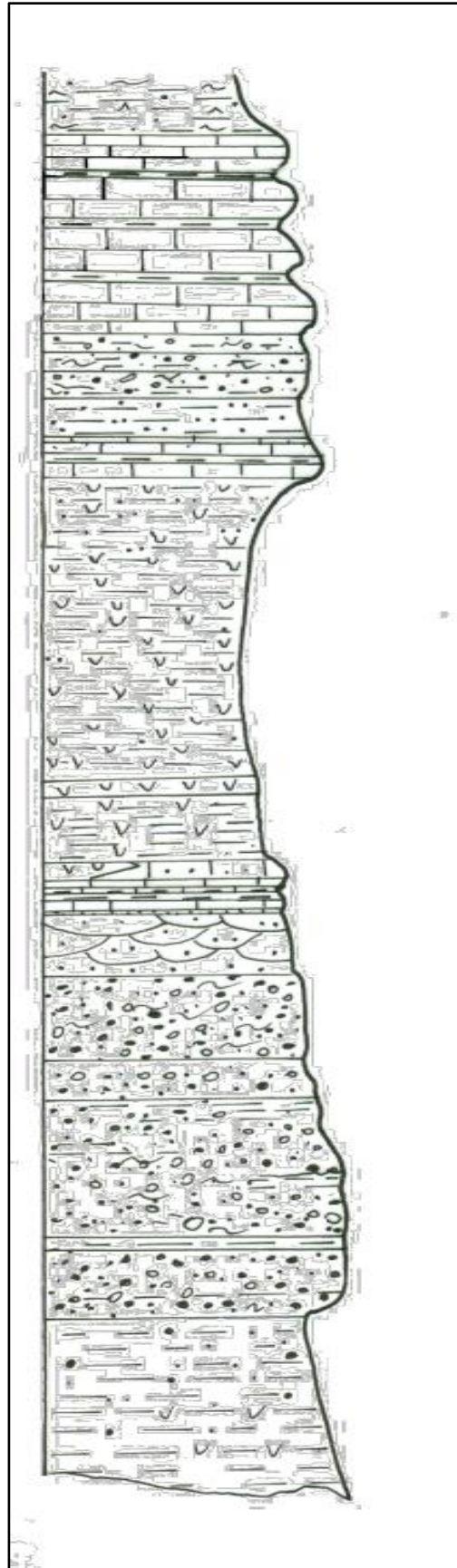
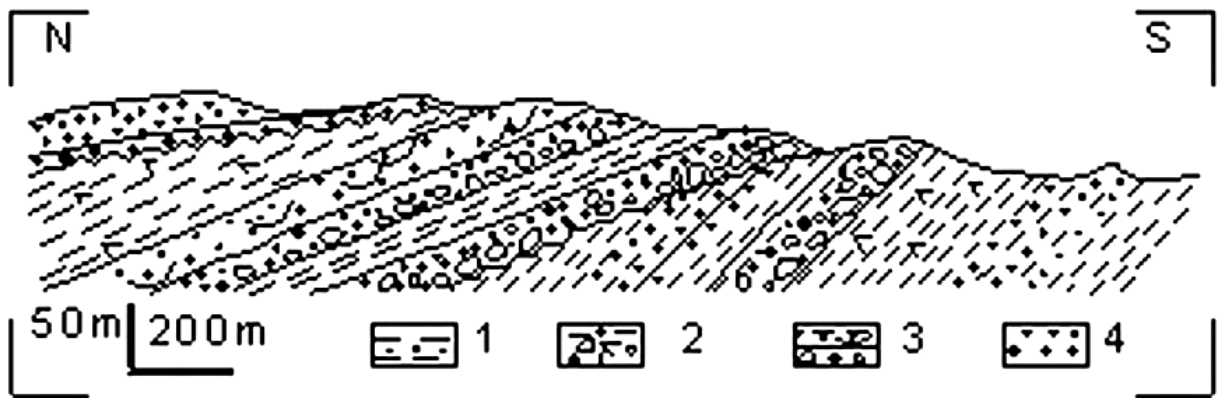


Figure 11 : Colonne litho-stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila



1- Miocène inf, 2- Burdigalien sur-Langhien, 3- Messénien, 4- Plio-Quaternaire.

Figure 12 : Coupe géologique du Miocène de Mila (Marmi et Guiraud, 2006).

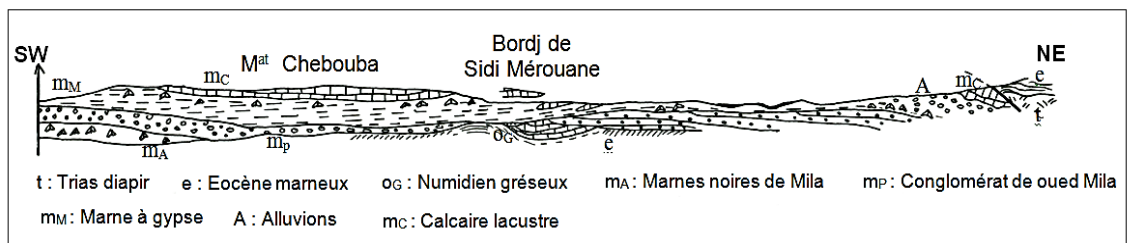


Figure 13 : Coupe synthétique du Néogène de Sidi Mérouane (Durand-Delga, 1969).

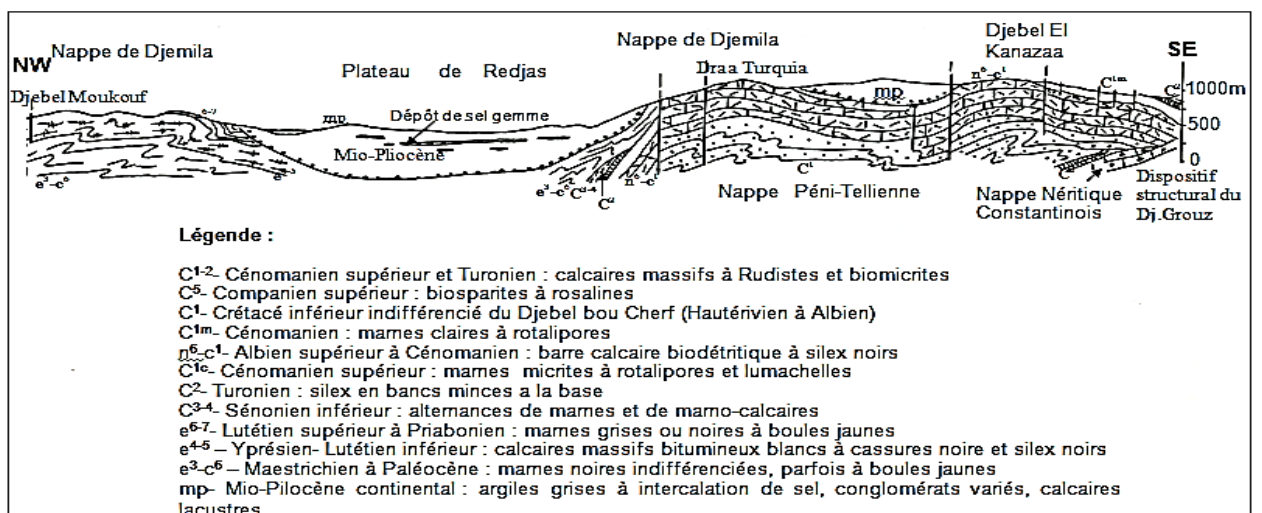


Figure 14 : Coupe descriptive de la région de Redjas (Vila, 1980).

## Chapitre I : Cadre géologique

Selon Coiffait (1992), la sédimentation au cours du Mio-Pliocène est marquée par des périodes de dépôts et des périodes de non dépôts. D'après cet auteur, trois cycles sédimentaires peuvent être distingués.

### •Cycle Langhien-Serravalien inférieur

Il s'agit de marnes sableuses à intercalations de quelques bancs de grès argileux. Ce sont les argiles de Mila, utilisés généralement en industrie céramique. La base de ce cycle est marine. Elle a pu être datée avec précision grâce à des foraminifères planctoniques du Burdigalien terminal, et atteint le Serravalien.

Des passés évaporitiques sont connus dans l'Ouest du bassin (région de l'Ouled Kebab à l'Ouest de Mila). Ce cycle est largement représenté dans la région de Mila.

### •Cycle Serravalien supérieur (Mellalien supérieur) :

Il débute par des assises conglomératiques, surmontées par des argiles sableuses rougeâtres, puis dans le Nord du bassin, viennent des calcaires lacustres et le sommet se termine par des argiles noires. La découverte de micromammifères a permis de les dater du Mellalien supérieur les parties médianes et terminales de ce cycle.

### •Cycle Turolien inférieur (Tortonien inférieur)

Ce cycle débute par une assise conglomératique suivi par une formation argilo-marneuse. On remarque que dans la partie septentrionale du bassin, la présence des niveaux détritiques et surmontés par une épaisse série de calcaire lacustre. Par contre dans sa partie Sud, le bassin est constitué au sommet par des calcaires à évaporites d'âge Pliocène inférieur. Quant à la partie septentrionale du bassin, ce sont surtout des marnes à lignites d'âge Pliocène supérieur.

### III-2-4- Quaternaire

Les formations quaternaires sont largement représentées dans le bassin de Mila au niveau des vallées : Oued Rhumel, Oued Endja...etc. Il s'agit de graviers et des blocs roulés recouverts d'une croûte calcaire feuilletés, dans une matrice limoneuse (Figure13).

### III-2-5- Aspect morpho structural du bassin néogène de Mila-Constantine

Le paysage morphologique actuel du bassin de Mila-Constantine est représenté par une série de reliefs carbonatés émergeant des formations néogènes. Cette configuration morpho-structurale est le résultat d'un l'héritage tectonique anté-mise en place des dépôts néogènes. Avant la mise en place des dépôts néogènes, le substratum de ce bassin de Mila-Constantine, formé par les séries carbonatées du Mole Néritique Constantinois sur lesquelles reposent les nappes de charriages a été morcelées par une série des accidents tectoniques cassants d'ampleur régionale. Ces accidents tectoniques, dominés par des directions Nord- Sud, Est-Ouest, Nord Est- Sud-Ouest et Nord-Ouest- Sud Est ont donné des structures en horsts et demi-horsts (Figure 15).

Après le remplissage des dépressions par les dépôts néogènes, la réactivation du jeu de ces accidents et dont l'activité se poursuit jusqu'à présent a abouti à la configuration morpho-structurale actuelle de ce bassin néogène de Mila-Constantine.

Ces accidents ont par ailleurs grandement favorisé la remontée des formations triasiques. Cette remontée qui a engendré le redressement à la verticale et parfois le renversement des massifs carbonatés a également contribué au modelage du paysage morphologique du bassin. Les zones de faiblesse des grands accidents tectoniques définissent les traces des Oueds des Chaabats et des Talwegs. C'est l'exemple de l'Oued Rhumel- Kébir qui traverse le bassin passe par la partie centrale de bassin suivant la direction E-W puis change sa direction suivant la direction N-S (Sidi Mérouane-El Milia).

Ces grands accidents tectoniques qui affectent aussi bien des formations de substratum et des dépôts néogènes sont accompagnés par un réseau doux des fractures et des diaclases qui ont joué un rôle favorable pour le dépôt des roches évaporitiques secondaires (Figure 15). La néotectonique et la tectonique récente du bassin néogène de Mila-Constantine se sont manifestées essentiellement par des décrochements et des chevauchements et des plissements liés à une phase de compression Plio-Quaternaire (Coiffait, 1992). À propos des plissements observés à proximité de la bordure septentrionale au Nord du bassin.

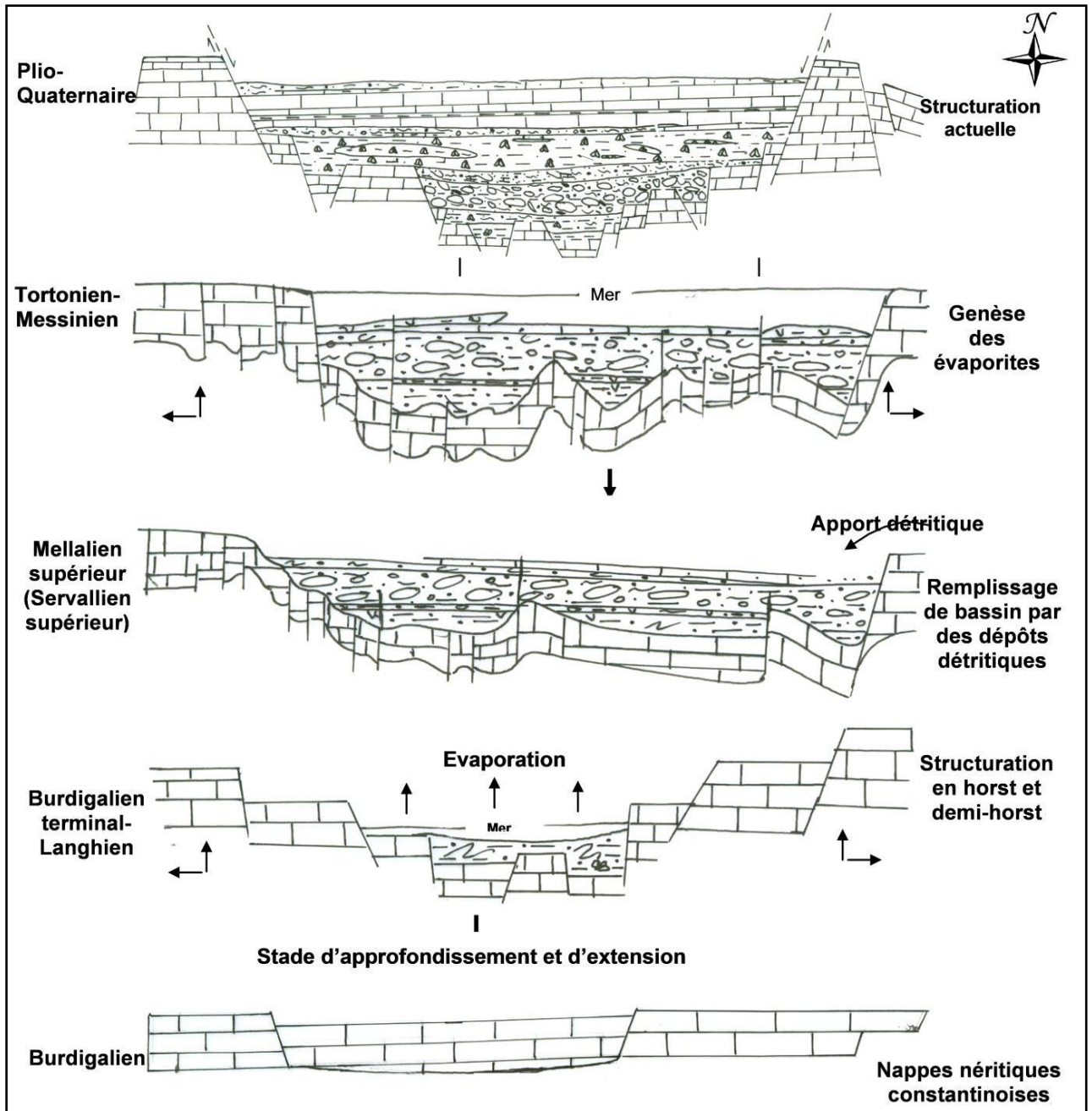


Figure 15 : Modèle schématique des dépôts laguno- continental du bassin de Mila (Coiffet, 1992).



### III-2-5-1 Tectonique du Constantinois

#### III-2-5-1-1 Tectonique de la plate-forme néritique constantinoise

La formation et la structure du bassin de Mila sont différentes selon qu'il s'agit du substratum calcaire ou de la couverture marneuse. Le premier correspondant à la plate-forme Constantinoise, forme des massifs isolés, apparaissent généralement en demi-horst sous leur couverture marneuse. Celle-ci est souvent décollée et former de véritables nappes de charriage, les nappes telliennes accumulées plus au Sud (Coiffait, 1992).

Le bassin de Constantine occupe une situation très particulière au sein de la chaîne des Maghrébides. Il se développe au pied de la limite méridionale des zones internes : flyschs internes, socle et dorsale kabyle. Cette limite correspond à un important accident orienté N100° E à N110° E plus que d'une faille proprement dite, il s'agit d'une famille d'accidents reconnus depuis longtemps : « zone faillée du Sud » (Coiffait, 1992). Cette zone de failles se suit sur plus de 80 km, du Djebel M'Cid Aicha à l'Ouest, jusque, vers l'Est au-delà du Djebel Debar au Nord de Guelma, appelée accident M'Cid Aicha R Debar.

Les structures induites par l'accident N100°E à N 110° E dans les nappes de charriages (Coiffait, 1992), et d'une manière générale dans les terrains antérieurs au Néogène, ont été bien décrite par Raoult en 1974. Mais les structures développées dans les terrains post nappes n'avaient jamais été étudiées. Au pied du Djebel Sidi Driss, deux chevauchements peuvent être observés dans les terrains néogènes. L'anticlinal de la Mat Guettara, où les calcaires vallésiens (Serravalien supérieur) de la koudiat el Kendoul reposent directement sur le flysch à affinité mauritanienne chevauche vers le Sud les argiles et les conglomérats du synclinal au cœur duquel coule de l'Oued Rhumel.

Dans la région de Sidi Mérouane, on distingue un chevauchement qui amène le numidien du chaînon de Zouara reposé sur le Miocène du bassin de Constantine (Remmache, 2006). L'importance exacte de l'accident affecte profondément le substratum du bassin de Constantine, Raoult (1974) estimait que son rejet était de plus de 300m. Remarquons enfin que si souvent un accident vertical sépare les terrains néogènes des terrains anté-nappes situés plus au Nord, on peut, par endroit, observé les terrains post-nappes reposés directement sur leur substratum. La marge méridionale du bassin de Constantine est assez différente de la bordure septentrionale, le plus souvent, les terrains de la partie Sud du bassin reposent directement sur le substratum Anté-Néogène.

## Chapitre I : Cadre géologique

Au Nord du massif du Chettabah, les séries néogènes peuvent être séparées par une faille, des calcaires crétacés. Cette faille correspond à un décrochement en régime compressif encore actuel. Le bassin de Constantine apparaît ainsi comme bassin installé sur un décrochement. Entre Constantine et Ain Tin, la base des dépôts post nappes correspond, également à de l'Astaracien, mais les dépôts sont de faciès différents (argiles gypseuses et conglomérats). Enfin, au-delà de Ain Tin, le Néogène débute par les dépôts marins des argiles de Mila. Une importante faille limite ces argiles et l'Astaracien situé plus à l'Est. Selon une coupe faite par Benabbas en 2006, passe par Djebel Akhal à Djebel Aougueb Djebel Felten. Toute la zone entre Djebel Aougueb et Djebel Felten est perturbée. Du fait de la présence du Trias dans ces lieux indique que cette zone est fortement tectonisée. Oued Seguin se présente comme une grande limite structurale, séparant les formations mésozoïques de Djebel Akhal de celles Mio-pliocènes qui constituent la structure de Ain Mtouan (Benabbas, 2006). La carte morphostructurale de la région de Constantine (Benabbas, 2006), laisse apparaître un système de fractures complexes (Figure 16).

### •La famille E-W

Elle se distingue par une extension le plus souvent supérieure à 1 km. La plupart des accidents E-W présentent une cinématique décrochant dextre. Le massif du Djebel Akhal est limité par un grand accident E-W, ce dernier ressort très bien au niveau de la carrière «SONACOM », (Benabbas, 2006).

### •La famille NE-SW :

Les accidents appartenant à cette famille sont bien représentés dans la partie centrale de la région de Mila-Constantine (Benabbas, 2006). On remarque trois structures importantes :

- Un faisceau de failles parallèles qui s'étend du Djebel Aougueb-Zouaoui et va au moins jusqu'à Djebel Bergli. Ce faisceau est directement lié à la mise en place de l'ensemble du massif de Chettabaha, ainsi qu'à l'apparition du Trias.

- Un autre faisceau plus à l'Ouest et part du versant méridional du Djebel Akhal jusqu'à Djebel Kheneg en passant par Kef En Nesour. Il semble décaler un accident E-W et son mouvement est apparemment senestre.

- Une zone de failles vient limiter Djebel Akhal dans sa terminaison orientale et empreinte un segment de l'Oued Koton. Le long de cette zone, on note la présence d'un affleurement triasique ainsi qu'une source thermale.

## Chapitre I : Cadre géologique

### •La famille NW-SE

Les accidents appartenant à cette famille sont visibles au niveau des escarpements des massifs calcaires des Djebel Akhal, Djebel Aougoub, Djebel Zouaoui, Djebel Bergli et Djebel Salah, où la cinématique est toujours dextre.

Le massif de Chettabah est traversé par un linéament très particulier qu'on peut le suivre d'El Malha à l'Est de Djebel Akhal jusqu'à Djebel Oum Kechrid, au Sud de Ain Kercha (Benabbas, 2006).

### •La famille N-S

Les accidents N-S sont souvent organisés en faisceaux ou couloirs (Benabbas, 2006). La majorité de ces accidents présente des mouvements coulissants senestres. Un de ces faisceaux représente la limite occidentale de Djebel Akhal. Dans le cadre régional, cette famille est affectent tous les domaines paléogéographiques.

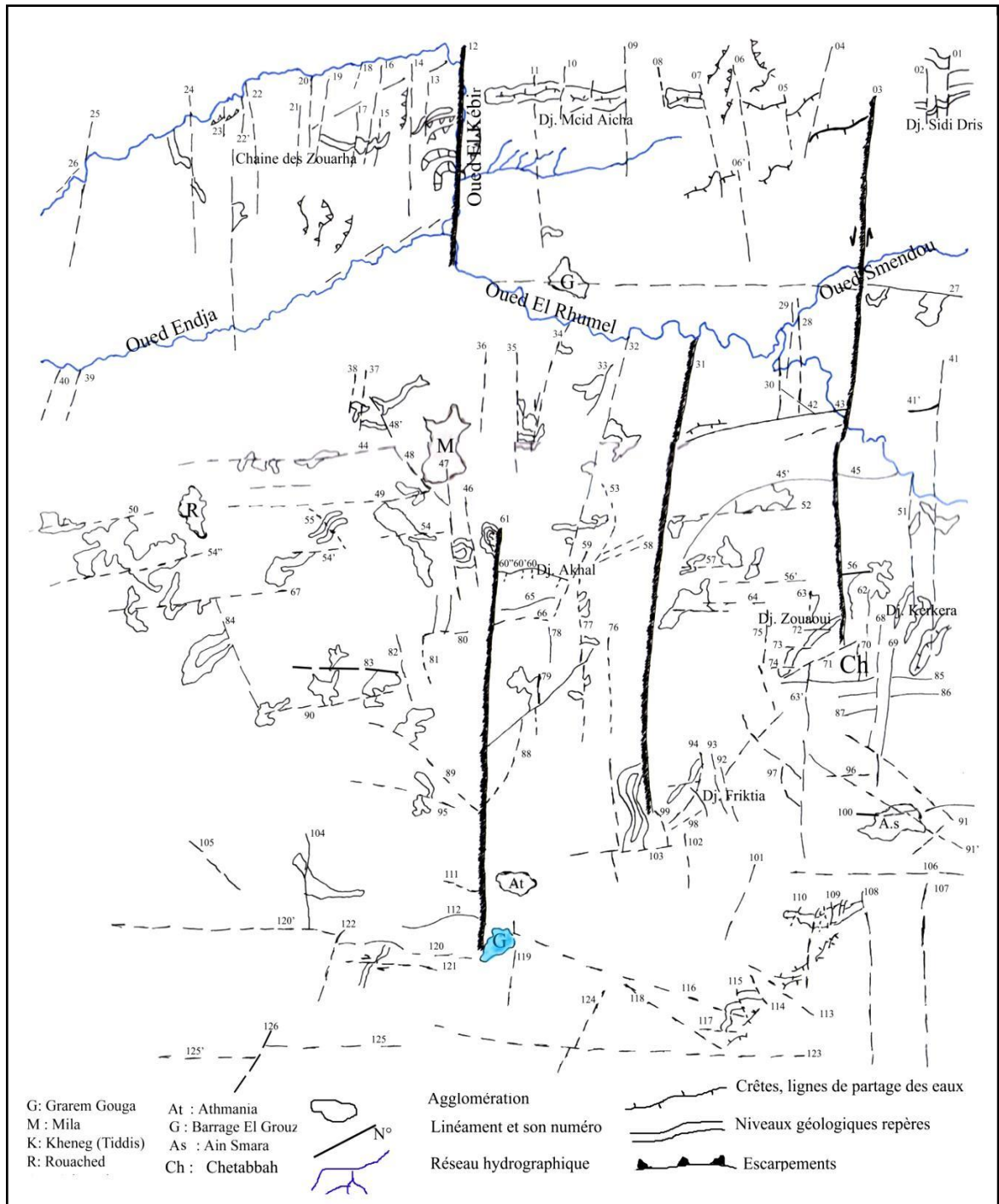


Figure 16 : Interprétation de l'image spatiale du bassin de Mila (Benabbas, 2006)

### III-2-5-2- Structures particulières

- **Structure de Djebel Akhal**

Entre la dépression de Ain Tin et le réservoir d'Oued El Kaïm, une importante crête topographique s'étant d'Est en Ouest correspond selon les études antérieures à une écaïlle de charriage (Allochtone) formées de calcaires, de dolomies et de marnes datant du Jurassique et du Crétacé. Cette structure est bien visible dans le paysage est constitué le point culminant de notre région. L'importance du massif réside dans son aspect morfo-tectonique, en effet, il évolue à la faveur des accidents profonds principalement E-W. En outre l'ensemble du massif est parcouru par un réseau complexe de fractures associées à de nombreux décrochement et qui sont le résultat d'une évolution tectonique polyphasée accentuée et amplifiée lors de la mise en place des nappes de charriages (Benabbas, 2006).

- **Structure semi-circulaire de Sidi Khelifa**

Si les structures circulaires et semi circulaires sont assez répandues dans les terrains cristallophylliens, elles sont par contre très rares en pays sédimentaires (le cas de notre terrain).

La structure semi-circulaire de Sidi Khelifa est une morfo-structure fort intéressante. La forme circulaire est mise en relief par le réseau hydrographique d'une part et d'autre part par une érosion importante, incision et surcreusement des ravins et ravines, empreinte quelque fois des segments d'accidents (Benabbas, 2006).

La photo interprétation permet le déchiffrement d'une série d'accidents qui serait liée à cette structure (N-S, E-W et NE-SW). La genèse de cette structure serait liée selon Benabbas, 2006, à :

1. La présence de plusieurs accidents décrochant affectant cette zone.
2. La présence d'une intrusion magmatique pas très profonde.

### III-2-5-3 Phases de déformation de la plate-forme néritique constantinoise

Pour pouvoir reconstituer la succession des évènements tectoniques, il est important de déterminer d'abord l'âge de la mise en place des nappes de charriages. Il sera ensuite possible d'aborder la succession des phases postérieures à cette mise en place des nappes, puis de déterminer la succession des évènements antérieurs (Coiffait, 1992).

## Chapitre I : Cadre géologique

Dans la région de Constantine, l'empilement, des unités telliennes, est dû à une phase tectonique unique. On peut affirmer que la mise en place des nappes s'est produite après le début du Burdigalien.

Coiffait (1992), a souligné, dans le lit du Chabat Bou Irkour, 4 km au Nord-Est de Mila, le flysch à microbrèches massylien est recouvert par des formations post nappes dans lesquelles le Burdigalien terminal a pu être daté. Dans le secteur de la Mechtat Bou Ksaiba Ed-Decha, sesont recouverts par ces mêmes séries post nappes. La phase de mise en place des nappes, au Burdigalien moyen à supérieur, si elle a structurée profondément cette région, n'est cependant pas responsable, tant s'en fait de son orogénèse. Diverses phases tectoniques, sont responsables de la déformation et la structuration du bassin de Constantine :

### **Phase du Vallésien (Tortonien inférieur)**

Aucun dépôt n'a pu être daté directement du Vallésien. Mais sous les argiles de Zighoud Youcef, existent plusieurs niveaux détritiques (conglomérats de Ras Sioud, argiles de el Ouit Kranga, conglomérats du Kef Mguerguet) correspondent sans doute au Vallésien. Mais ces niveaux tout comme les conglomérats de l'Oued Mila (Figure 17), dont ils constituent un équivalent latéral, sont discordants sur les terrains sous-jacents datés du Vallésien (Tortonien inférieur) au Nord de Constantine, et du Burdigalien supérieur -Langhien dans le secteur de Mila même (Figure 15).

Les effets de cette phase sont divers. La discordance des séries de base du cycle Vallésien Tortonien prouve qu'il y a eu plissement ou basculement des terrains. La discordance des conglomérats de l'Oued Mila (rapportés au Vallésien inférieur) aussi bien sur les argiles burdigaliennes que sur les terrains astaraciens prouve que c'est à cette phase du Vallésien inférieur qu'il faut attribuer le jeu de faille N 30° E limitant les argiles de Mila et Astaracien au Nord-Est de Ain Tin.

### **Évènements tectoniques fini-Miocène**

Toujours à l'Est immédiat de Zighoud Youcef, la phase tectonique Plio-Quaternaire, est importante qu'elle soit, n'est pas la seule à avoir affecté cette région. Il existe une lacune de plusieurs millions d'années entre les argiles de Zighoud Youcef (7.2 à 9 Ma) et les terrains pliocènes de l'Oued Smendou (2.9 Ma). Cette lacune est d'ordre tectonique, compte tenu des conditions d'affleurement, on ne peut pas observer le contact entre les terrains pliocènes et miocènes.

### Phase du Pliocène supérieur

Elle est bien représentée dans la région de Zighoud Youcef, dans les argiles sub-verticales du Pliocène supérieur (2.9 Ma) dans la mesure où il n'est pas possible de mettre en évidence plusieurs phases tectoniques postérieures aux gisements à micromammifères de la région de Zighoud Youcef. Coiffait en 1992 est amené à considérer, que c'est cette phase Pliocène supérieure qui a structurée toute la bordure septentrionale du bassin de Constantine. Lors de son étude de Sidi Mérouane, Durand-Delga en 1955 signale, au Sud de la Mechtat Bou Krelif, des galets mal cimentés qu'il attribue, sans preuve paléontologique au Pliocène. Coiffait (1992), suggère que ces conglomérats soient coincés sous le Trias, il estime qu'il s'agit d'un cordon d'alluvions plaquées à la limite du Miocène continental et perchées à une quarantaine de mètres au-dessus de l'Oued Endja.

### III-2-5-4 Histoire paléogéographique des dépôts Mio-Pliocène

D'après les données de la littérature, les dépôts qui comblent le bassin de Mila débutent localement par des formations marines d'âge Burdigalien terminal- Langhien. Ces formations passent vers le haut à des formations continentales d'âge Miocène et Plio-Quaternaire. Au Burdigalien, la mer recouvre la plateforme constantinoise, mais la submersion n'est pas totale car de nombreuses régions restent émergées, dont les massifs anciens septentrionaux. Cette émergence a été accompagnée d'une érosion très importante. Ce cycle du Burdigalien terminal-Langhien est géographiquement réduit, contrairement au cycle Astaracien qui est bien développé (Fig.18). Ce dernier caractérisé par l'assise détritique de Ras Selim et les pélites à gypses de la Mechtat Lakfal marque bien la limite Serravalien-Tortonien (Coiffait, 1992). L'assise des marnes à *Ostrea Crassissima* caractérise l'Helvétien (Coiffait, 1992). À mesure qu'on monte dans le Miocène supérieur, les dépôts deviennent lagunaires, puis toute influence marine cesse. Le Constantinois est transformé en un immense bassin fermé, occupé par des lacs temporaires qui sont remblayés par les matériaux grossièrement détritiques provenant de reliefs voisins.

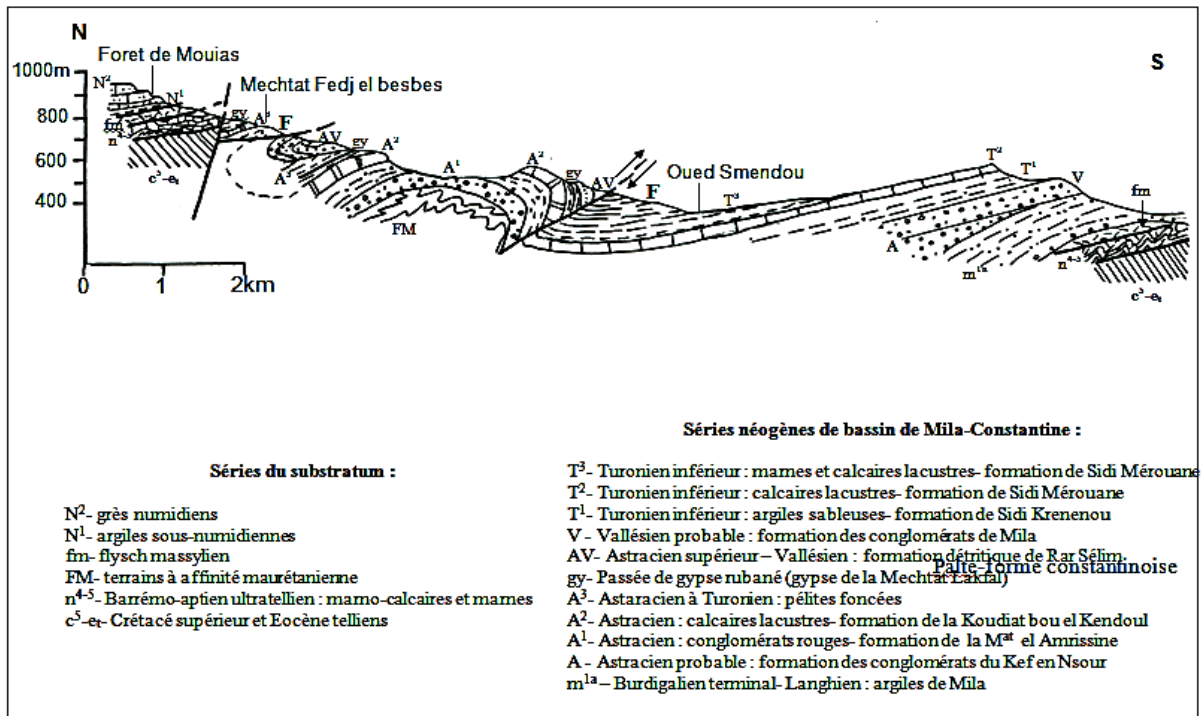


Figure 17 : Coupe géologique illustrant les différents contacts structuraux de la partie Nord du bassin de Mila Constantine (Coiffait, 1992).



# CHAPITRE II

## Étude générale sur

## les glissements de terrain

### I- Introduction

Le phénomène de glissement de terrain a été intensivement étudié pour 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 de 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.

### II- Définition d'un glissement de terrain :

On regroupe sous le terme de mouvements de terrain toute manifestation de déplacement d'une masse de sol le long d'une pente sous l'effet de la pesanteur. Selon Varnes et al (1978) les glissements de terrain comprennent les affaissements, effondrements, écroulements, glissements et écoulements. Ces mouvements sont la cause de l'action conjuguée des facteurs de prédisposition (variables quasi-statique) et de facteurs déclencheurs.

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 glissements de terrains présentent une très grande variété compte tenu des différences dans les amplitudes, les matériaux, les modes de déplacement, les effets induites, l'environnement géographique, etc. Ce chapitre est réservé dans une première partie à la détermination des différents types des mouvements de terrain et leurs classifications.

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

### III- Les mouvements de terrains

#### III-1- Critères de classification des mouvements de terrains

Une description complète d'un mouvement de terrain se révèle extrêmement utile car elle permet de mieux apprécier les causes du phénomène et, par conséquent, d'entreprendre des travaux confortatifs avec le maximum de chances de succès.

Il est donc indispensable de définir et de préciser les termes descriptifs d'un mouvement de terrain et d'élaborer une classification simple et capable de servir. Il existe de nombreuses classifications faisant intervenir des critères déferents, parmi les critères classiques de reconnaissance, on trouve :

#### -Les propriétés physiques et mécaniques

Ce sont des matériaux instables : Elles sont reconnues et quantifiées sur le terrain ou en laboratoire (poids volumique ( $\gamma$ ), porosité ( $n$ ), indice des vides( $e$ ), teneur en eau ( $w$ ), la résistance au cisaillement, ...). Ces propriétés physiques et mécaniques permettent l'estimation de la stabilité du talus par le biais de son coefficient de sécurité.

#### - 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).

#### - 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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

formations mylonitiques dans les roches indurées). La définition de la surface de rupture constitue dans la reconnaissance des mouvements de terrain, un point important.

### III-2- Morphologie et dynamique des mouvements de terrain

#### Les affaissements et les effondrements

Sont des mouvements gravitaires à composante essentiellement verticale qui résultent de l'évolution de cavités souterraines (Figure 18). 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.

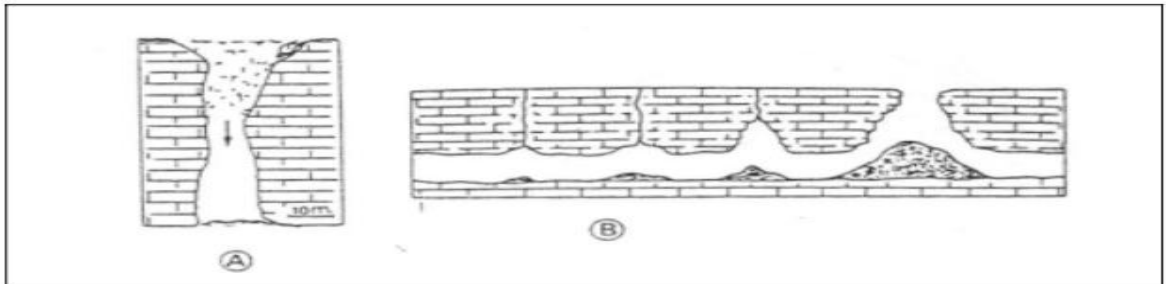
Type de discontinuité	Surface de séparation	Surface visible après le mouvement	Nature du matériau	Dynamique
Rupture franche et irrégulière, car fonction des défauts de la roche	Rupture, cassure ou décrochement	Totalement à partiellement visible	Roche (consolidé)	Chute
Cisaillement avec surface plus ou 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 01 : Les surfaces de séparation avec le substratum en place (A. Millies-Lacroix, 1981).**

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

### 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 18 : Effondrement de voûtes karstiques (G. C. Flageollet, 1989).**

**Légende :** A) avant 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).

### 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).

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

### Les chutes

Des 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 (Figure 19). Les terrains les plus propices à ces manifestations sont les formations massives, fracturées, pouvant former des hautes falaises (calcaires, roches cristallines et cristallophylliennes) (A. Benaïssa, 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.

### 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.

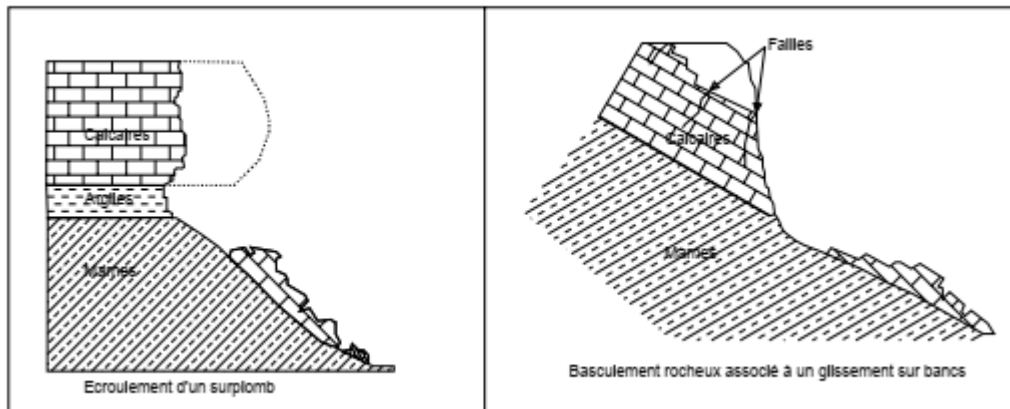


Figure 19 : Exemples d'éroulement rocheux (G. Colas et G. Pilot, 1976).

### 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 (Figure 20) 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).

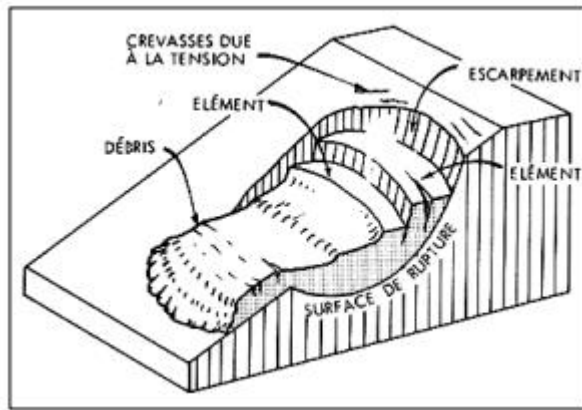


Figure 20 : Bloc diagramme d'un glissement profond.

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.

### 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) (Figure 21). 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.

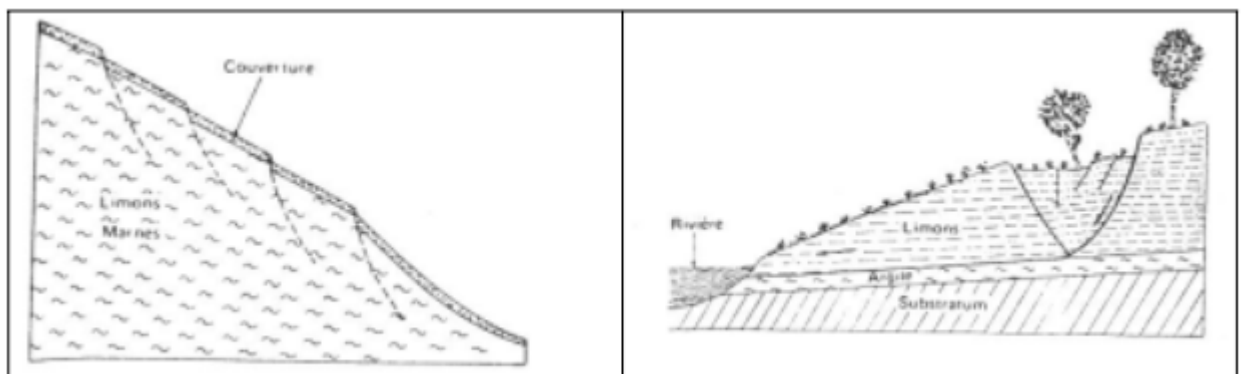


Figure 21 : Types des glissements proprement dits (Colas et Pilot, 1976).

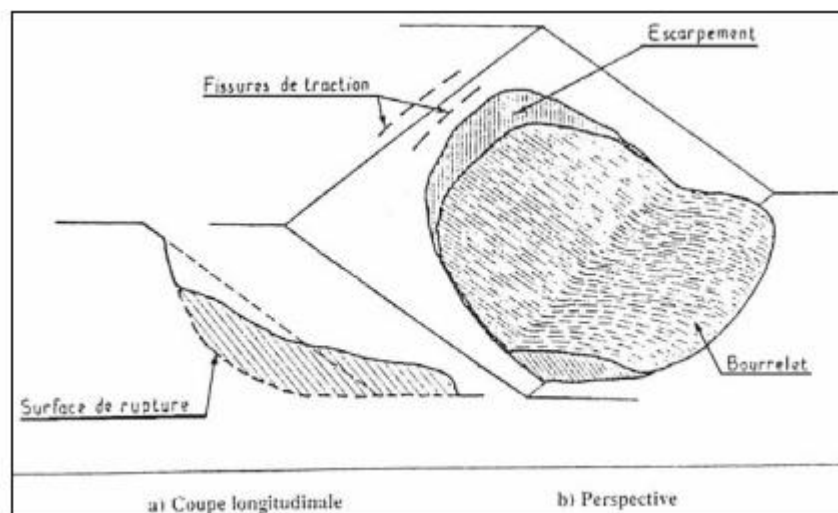


### Les glissements circulaires

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 : (Figure 22)

- 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 22 : 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 dû 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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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 (Figure 23). Une telle couche est appelée "couche savon" (G. Filliat, 1981, G. Philipponnat, 1987).

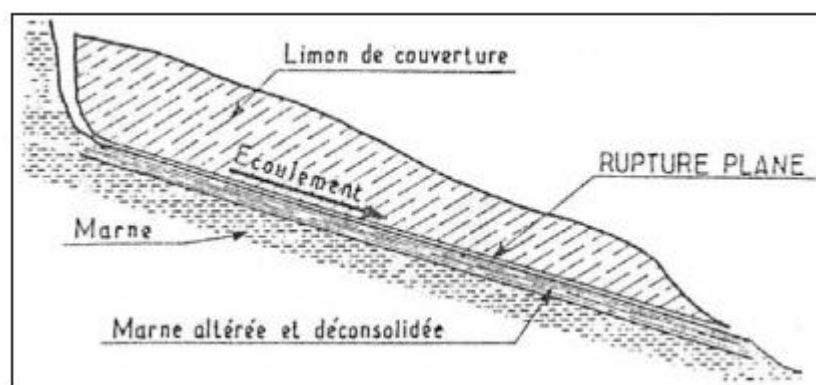


Figure 23 : Schéma descriptif d'un glissement plan (G. Philipponnat, 1987).

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 (Figure 24).

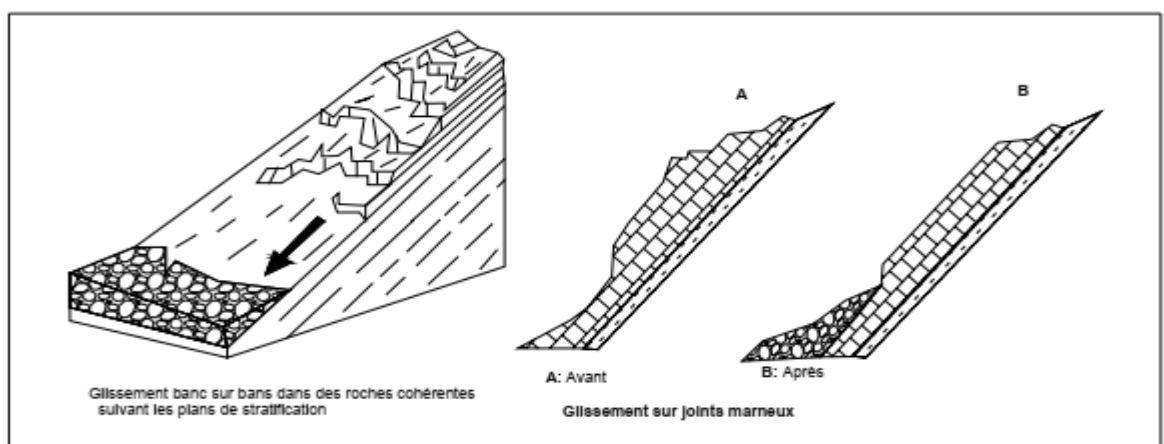


Figure 24 : Ripage d'une masse rocheuse (L. Trévisant, 1971).

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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 : Géo-Slope, Nixes et Trolls, Plaxis...etc. permet de cerner cette difficulté.

### Glissements par fluage et coulées boueuses

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

#### 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 25 montre une couche de marne fluant sous le poids excessif du massif calcaire limité par une falaise, les sollicitations ( $\sigma_v$ ) vont entraîner la fissuration du banc de calcaire et l'écroulement de la falaise par la suite.

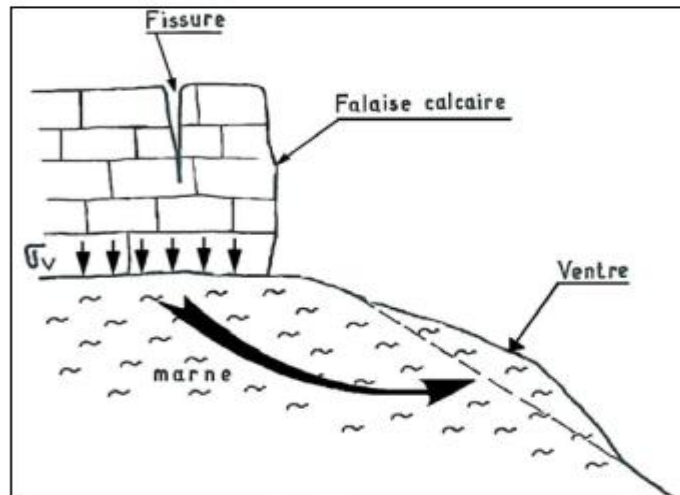


Figure 25 : Exemple d'un fluage (G. Philipponnat, 1987).

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).

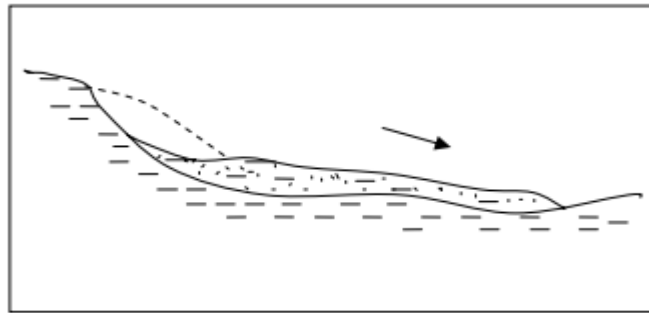
### Les coulées boueuses

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. Benaissa, 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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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 (Figure 26).



**Figure 26 : Schéma illustratif d'une coulée boueuse (A. Benaissa, 2003).**

### IV-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).

### Les facteurs de terrain

Les facteurs relevant de la nature des terrains en mouvement peuvent être attribués aux caractéristiques des matériaux déplacés, soit qu'il s'agit de mouvement dans les sols et terrains meubles ou dans les roches cohérentes. Certaines classifications sont basées sur les caractéristiques de la surface de séparation qui peut délimiter la partie du terrain qui a subi un déplacement non nul de la partie qui n'a subi aucun déplacement. On rencontre ce genre de rupture dans les terrains

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

meubles.

La surface de rupture peut être une zone d'épaisseur variable où l'on distingue une masse de terrain ayant subi des déplacements petits à grands, de faible ou grande amplitude. Cette zone sépare la masse de terrain qui n'a subi aucun déplacement de celle qui s'est déplacée. Elle enregistre lors du mouvement, un très fort remaniement, on parle parfois de zone broyée. MillieLacroix (1981), a proposé une classification des processus d'instabilités en fonction des types de discontinuités rencontrés. (Tableau 02)

PAGE Chute	55	<b>Rupture franche et irrégulière, car fonction des défauts de la roche</b>	Rupture, cassure ou décrochements	Totalement a partiellement visible
<b>Type de discontinuité</b>	<b>Surface de séparation</b>	<b>Surface visible après le mouvement</b>	<b>Nature matériau</b>	<b>Dynamique</b>
<b>Cisaillement avec surface plus ou moins lisse</b>	Surface plane, circulaire ou courbe	Partiellement visible en amont	Sol ou roche (peu remanie)	Glissement
<b>Surface ou zone irrégulière et rugueuse avec friction et</b>	Surface de frottement	En partie a	Sol ou sol et	Coulée

**Tableau 02 : Classification des processus d'instabilités en fonction des types de discontinuités rencontrés.**

L'état de la pente joue un rôle important dans la stabilité des versants. Suivant la nature des terrains elle ne doit pas dépasser un seuil limite. Par exemple, la pente d'un versant de matériaux pulvérulents (sans cohésion), est théoriquement stable si l'angle de la pente ne dépasse pas l'angle de frottement interne de ces matériaux.

D'autres facteurs de terrains de moindre importance mais ils apparaissent dans certaines classifications, le versant, la morphologie de la masse déplacée, les formes et les dimensions de ses masses ainsi que la localisation géographique, qui sont des critères de classification le plus souvent pris simultanément et comme critères accessoires (Flageolet, 1989).

### **vitesse du mouvement**

La détermination de la vitesse du mouvement après le déclenchement de celui-ci est quasiment impossible. D.J.Varnes (1978), a établi une échelle des vitesses applicable à tous les types de mouvement. (Tableau 03). On s'aperçoit cependant que l'échelle n'est pas appliqué par

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

tous. Si, en effet, il permet de distinguer entre eux les grands types de mouvement, elle n'a pas un degré de finesse suffisant quand il s'agit de changement, avec le temps, ou selon le secteur, à l'intérieur des limites d'un versant en glissement (Flageolet, 1989).

	3 m/s	0.3 m/an	1.5 m/j	0.5 m/an	1 a 1.5 m/an	0.5 m/an	0.3> m/an
	E.R	T.R	R.	M.	L.	T.L.	E.L
Chutes, écroulements de rochers							
Avalanches de débris							
Coulées de terre de débris							
Glissements de roches							
Glissement rotationnel de roches							
Glissement rotationnel de sol							
Glissements plans de roches							
Glissements plans de sol							
Glissement de débris							

**E.R** : extrêmement rapide, **T.R** : très rapide, **R** : rapide, **M** : modéré, **L** : lent, **T.L** : très lent

**E.L** : Extrêmement lent.

**Tableau 03 : Vitesses des mouvements de terrains (Varnes, 1978 et Crozier, 1986).**

### V-Cause du déclenchement

Le passage de l'état de stabilité à l'état d'instabilité révèle des causes nombreuses et variées, les unes externes, comme l'érosion d'un bas de pente par la mer ou par une rivière, par l'ouverture d'une carrière, les secousses d'un tremblement de terre et la surcharge d'une construction. Les autres sont internes, par l'augmentation de la pression interstitielle après de fortes pluies, ou à la suite d'une accumulation d'eaux usées rejetées dans le sol et le développement de l'altération des matériaux, c'est généralement la cause la plus mal connue, et qui reste souvent inconnue. C'est pourquoi la cause du déclenchement est rarement retenue comme critère de classification et ce, d'autant moins qu'il y a rarement une cause unique mais souvent une combinaison de causes complexes.

### 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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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  $\phi$ ) 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.

### 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-



## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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.

### 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 :  $\varphi$ ; angle de frottement interne et  $\theta$ ; 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).

### 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.

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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

### Actions sismiques

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. Les ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire qui s'ajoute dans le bilan des forces déstabilisatrices sur un versant. 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). Le passage des ondes sismiques à une certaine accélération provoque la liquéfaction des matériaux meubles saturés et engendre la rupture et les glissements.

## VI- CALCUL DE STABILITE D'UN GLISSEMENT

### VI-1 Généralité

Le calcul de la stabilité de terrain 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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

importante car elle permet de choisir les paramètres nécessaires pour l'ouvrage, a fin 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.

### VI-2 Les paramètres de calcul de glissement

Toutes les méthodes de calcul nécessiteront de connaître :

- La géologie : c'est-à-dire la nature des terrains et éléments sur les discontinuités.

Les terrains généralement sont hétérogènes, les surfaces non-circulaires, consiste une combinaison de sections plans et courbés, sont les plus probables. Souvent les glissements rétrogressive se constituent d'un ensemble de surfaces courbées.

- Modes de ruptures :

Pour Terzaghi et Peck (1967) ; «les glissements occurrent sous presque toutes les manières concevables, lentement ou soudainement, avec ou sans condition (cause) apparente ».

Les modes de ruptures d'un versant dues à la diminution soudaine ou graduelle de la force des matériaux de versant ou au changement de la géométrie de ce dernier ; comme par exemple la suppression du pied.

- Les propriétés mécaniques des terrains et/ou des discontinuités :

Les surfaces de ruptures planes souvent se produit dans un sol contient une couche, ou des joints, de caractéristique médiocre influence la forme de la surface, elle suit l'extension de cette couche. L'exemple type des glissements transnational affecte des terrains marneuses couvrent un substratum plus dure, pour les circulaires ils affectent des matériaux plus homogènes.

- La géométrie en 2 ou 3 dimensions de talus

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

- Les conditions hydrodynamiques (hauteur d'eau et écoulements)

### VI-3 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.

#### 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 :  $C$ ,  $\phi$  et  $\gamma$ , si le milieu est aquifère la pression interstitielle  $U$  sera ajoutée à ces paramètres (G. Filliat, 1981 ; J. Costet et G. Sanglérat, 1983).

Dans la (Figure 27), 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) ?

¾ Tout d'abord, le poids  $W$  des terres, appliqué au centre de gravité  $G$ .

¾ 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  $c''$ , 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  $K''$  est parallèle à  $AB$  et passe par le point  $D$  tel que :

$$OD = r \frac{\alpha_0}{\sin \alpha_0}$$

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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 **R**.

¾ 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 :

$W + U + K'' + R = 0$  d'où la somme des moments :

$$Wl - Um - Rn - 2r^2 \alpha_0 \frac{c}{F_s} = 0$$

Dans ces équations, les forces **W**, **U** et **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 **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).

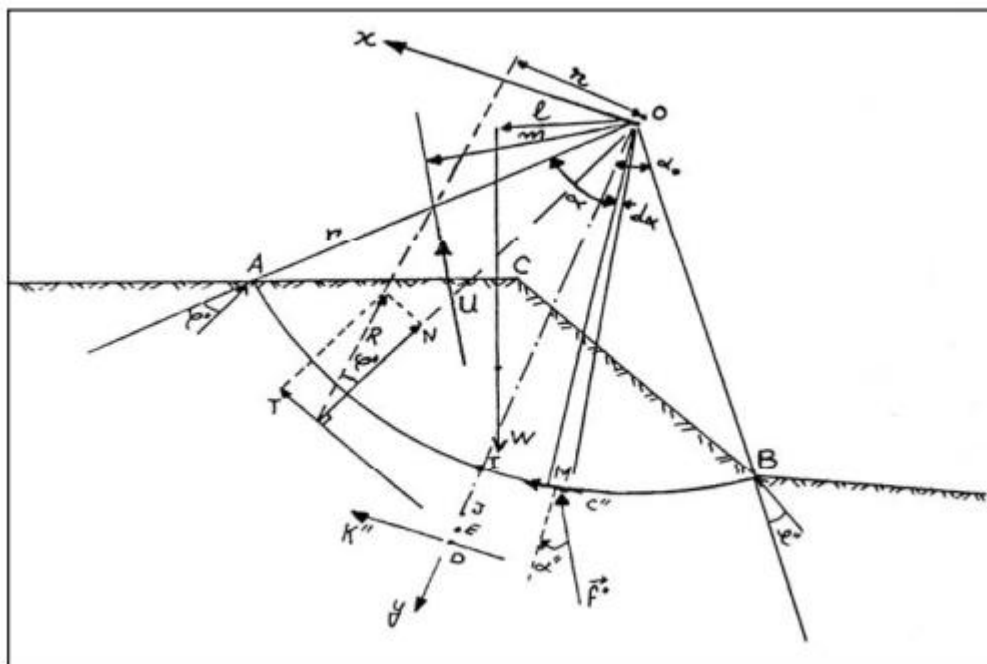


Figure 27 : Différentes forces agissant sur une masse en mouvement (J. Costet et G. Sanglérat, 1983).

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

### Méthode des tranches

Les terrains sont rarement homogènes et isotropes et l'utilisation de la méthode globale est donc limitée. Les méthodes dites des tranches sont souvent utilisées. Le principe est de découper le volume étudié en certain nombre de tranches (en général verticales).

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.

Cette méthode 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).

En général les surfaces de rupture considérées sont des cercles, mais certaines méthodes de tranches (Sarma, par exemple) ne nécessitent pas cette hypothèse.

### 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:  $c_i$ ,  $\phi_i$  et  $\gamma_i$  (Figure 28 ). 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 :

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

- 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 inter tranches.
- Les pressions hydrauliques.

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

$\frac{3}{4}$  Le moment moteur, comme celui du poids des terres  $W$ , de l'eau interstitielle et des surcharges éventuelles, qui tend à provoquer le glissement.

$\frac{3}{4}$  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 inter tranches 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 :

$$(R_n) t = c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \phi_i \dots \dots \dots (1)$$

La somme des moments pour toutes les tranches est :

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

avec :  $m$ : nombre total de tranches,

$c_i$  et  $\phi_i$ : caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est situé  $AB$ .

L'expression du coefficient de sécurité  $F_s$  sera :

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

$$F_S = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} (c_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n} \dots\dots\dots (3)$$

Avec les notations définies sur la (Figure 28).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  $\gamma_w$  : poids volumique d'eau)

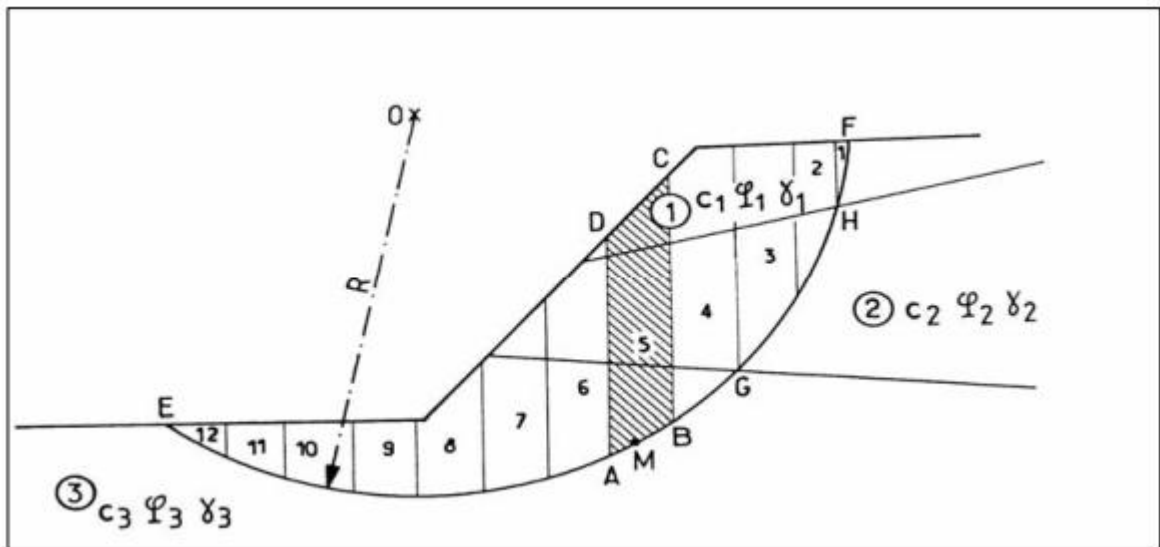
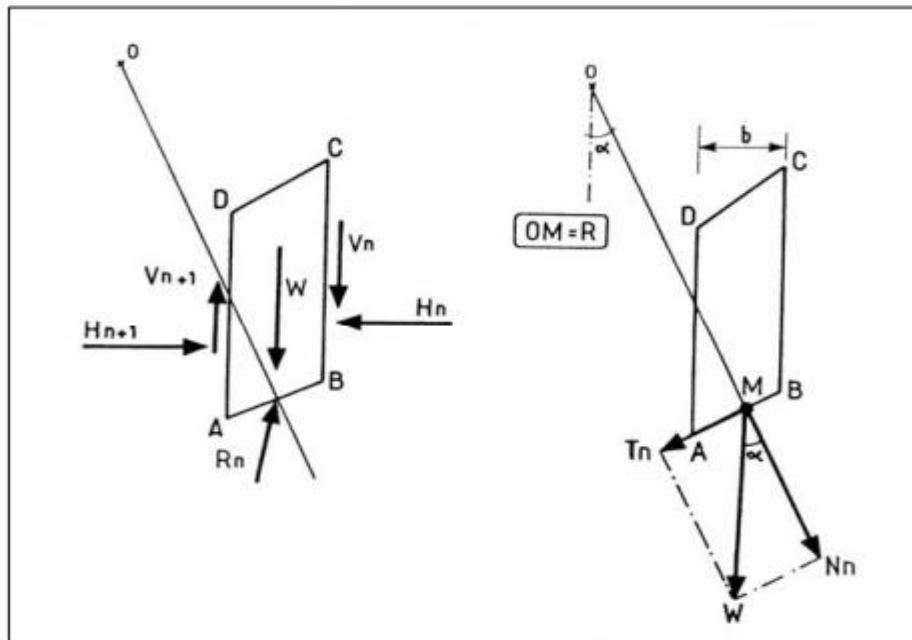


Figure 28 : Découpage en tranches d'un talus (B. Hubert et al, 2003).





(a) Décomposition complète

(b) Hypothèse de Fellenius

Figure 29 : Forces agissant sur la tranche n (B. Hubert et G. Philipponnat, 2003).

### Méthode de Bishop simplifiée

La méthode de Bishop est plus réaliste et le coefficient de sécurité obtenu par cette méthode est supérieur à celui obtenu par la méthode de Fellenius. Un calcul de stabilité effectué par la méthode de Fellenius donne donc une valeur pessimiste de sécurité, il va donc dans le sens de la sécurité.

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

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

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.

### VI-4 Choix de la valeur du coefficient de sécurité dans le calcul de stabilité

Le facteur de sécurité minimal **FS** 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 (**Cu**)). 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 04 :

$F_s$	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 04 : Valeurs de coefficient de sécurité FS données en fonction de l'importance de l'ouvrage (G. Filliat, 1981).**

## Chapitre II : Étude générale sur les glissements de terrain

Nombre des connues	Description
N	Somme des forces horizontales
n	Somme des forces verticales
n	Somme des moments
n	Critère de Mouher-coulomb
4n	Nombre total des équations

**Tableau 05 : Les facteurs connus dans le calcul de facteur de sécurité**

Nombres des inconnus	Description
n	Intensité de la normal a la base du tranche
n	Point d'application de la normal a la base
n-1	Intensité de la force normale intertranches
n-1	Point d'application de la normal
n-1	Intensité de la force tangentielle
n	Force tangentiel a la base du tranche
1	Facteur de sécurité
6n-2	

**Tableau 06 : Les facteurs inconnus dans le calcul de facteur de sécurité**

Les deux tableaux illustrant le nombre total des équations ainsi que le nombre des inconnus, il ya donc  $2n-2$  inconnus plus que d'équations. Les différentes méthodes des tranches diffèrent par les hypothèses simplificatrices qu'elles adoptent pour obtenir les équations supplémentaires. Il n'est pas si simple de rajouter exactement  $2n-2$  équations dès lors que l'on a n tranches : certaines méthodes rajoutent plus de  $2n-2$  équations ou des hypothèses complémentaires incompatibles avec les équations de la statique.

La méthode de Fellenius (dit méthode Suédoise) est la méthode la plus ancienne des méthodes des tranches. La méthode de Bishop est la plus couramment utilisée. Ces deux méthodes supposent que la surface de rupture est circulaire et que le point d'application des réactions est le milieu de la tranche.

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  $FS= 1.5$  pour Bishop (l'approche de Fellenius est plus conservatoire que celle de Bishop).

# CHAPITRE III

## Les glissements de terrain induit par les séismes

### I – Introduction

Les séismes sont reconnus depuis longtemps comme une cause majeure de glissements de terrain. Des glissements de terrain provoqués par des tremblements de terre ont été documentés depuis au moins 373 ou 372 avant JC et ont causé des dizaines de milliers de morts et des milliards de dollars de pertes économiques au cours du siècle actuel. Lors de certains tremblements de terre, des glissements de terrain ont dénudé des milliers de kilomètres carrés.

La stabilité d'un talus est fonction du rapport des forces stabilisantes sur les forces déstabilisantes. Les ondes sismiques provoquent une sollicitation dynamique supplémentaire qui s'ajoute dans le bilan des forces déstabilisatrices sur un versant. 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 même déliquification des sols meubles saturés. 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).

Dans l'étude des glissements de terrain induits par les séismes, un certain nombre de questions que Keffer (1984) a soulevé méritent d'être mentionnées :

- Comment le nombre et la distribution des glissements de terrain dépendent de la magnitude du tremblement de terre, de l'intensité des secousses et d'autres paramètres sismiques ?

-Quels types de glissements de terrain sont causés par les tremblements de terre ? Lesquels de ces types sont les plus dangereux pour la vie humaine et les biens ?

-Quels matériaux géologiques sont les plus sensibles aux glissements de terrain lors des tremblements de terre ?

-Les tremblements de terre réactivent-ils les anciens glissements de terrain déclenchés par des causes non sismiques ?

Keffer (1984) dans son étude sur plus de 40 séismes a conclu qu'à partir de la magnitude 4 sur l'échelle Richter il commence à provoquer les glissements. Les matériaux les plus sensibles aux glissements de terrain induits par les tremblements de terre comprennent les roches faiblement cimentées, les roches indurées avec des discontinuités, les dépôts résiduels et colluviaux, les sols volcaniques contenant de l'argile sensible, les lœss, les sols cimentés, et les

## Chapitre III : Les glissements de terrain induits par les séismes

dépôts deltaïques granulaires. Les anciens glissements de terrain peuvent être réactivés par les tremblements de terre mais à un degré moindre que dans les matériaux non affectés.

Les mouvements de masses induits par le séisme peuvent être des avalanches, des coulées de pierres et mouvement latérale de masses de sols et des coulées de boues.

### II - Paramètres Sismiques

Cinq mesures ont été choisies pour relier les paramètres sismiques à la distribution des glissements de terrain. Ces mesures sont les plus petits tremblements de terre qui provoquent des glissements de terrain, la relation entre la magnitude et la zone affectée par les glissements de terrain, la relation entre la magnitude et la distance maximale des glissements de terrain par rapport à l'épicentre, la relation entre la magnitude et la distance maximale des glissements de terrain par rapport à la rupture de la faille, et l'intensité minimale de secousse à laquelle les glissements de terrain peuvent se déclencher.

### III - La magnitude et la zone affectées par les glissements de terrain

Les données de l'étude étendue élaboré par Keffer (1984) ont montré qu'on a peu de glissements induits par des séismes de magnitude inférieure à 4. Cette étude a montré également que la zone affectée par les dommages de glissement est dans un contexte général proportionnel à la magnitude du séisme (figure 31). Cependant, il existe plusieurs autres facteurs qui influent sur la relation magnitude du séisme et la zone affectée. Ils comprennent les différences régionales dans l'atténuation sismique, les incertitudes dans les déterminations de surface et de magnitude, les paramètres sismiques autres que la magnitude et les conditions géologiques locales. Les conditions géologiques influencent la zone en contrôlant la distribution des sites sensibles, un effet plus évident pour les petits événements où la zone secouée est petite et peut ne contenir que quelques pentes sensibles dispersées.

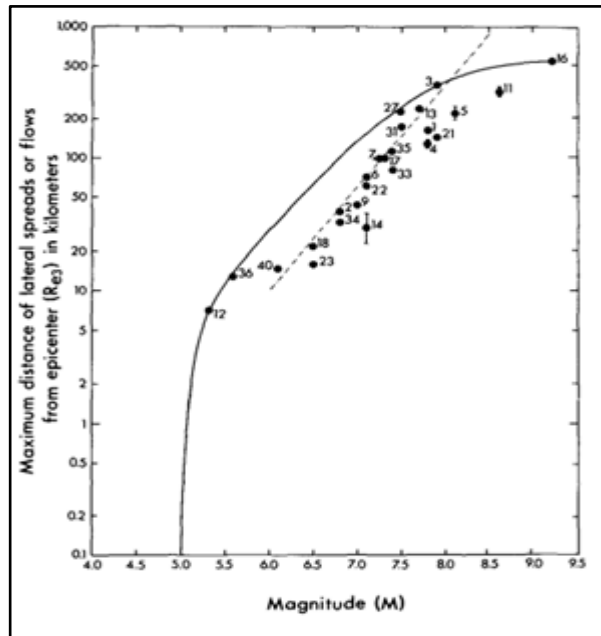


Figure 30 : Relation magnitude du séisme et Et distance des zones affectées (Keffer1984)

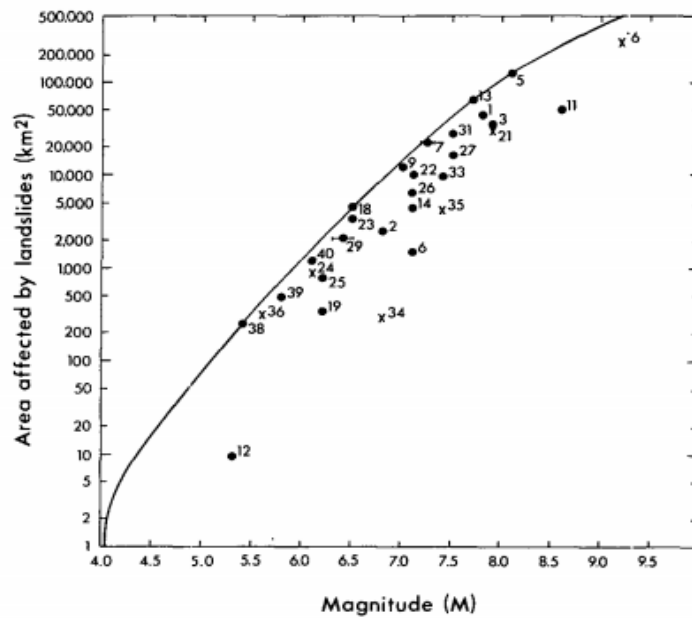


Figure 31 : Relation magnitude du séisme et surface de glissement (Keffer1984)

## Chapitre III : Les glissements de terrain induits par les séismes

### IV - Les caractéristiques de glissement de terrain et les environnements géologiques

Les caractéristiques et les environnements géologiques des glissements de terrain induits par les tremblements de terre porte spécifiquement sur les environnements qui les produisent dans les conditions sismiques.

Les roches faiblement cimentées produisant des chutes de pierres comprenaient la pierre ponce, le tuf, le schiste, le silt stone, le grès et le conglomérat. Les rochers dans la moraine et dans le sol résiduel ont également produit des chutes de pierres, tout comme les roches cisailées et altérées. Bien que des chutes de pierres provoquées par des tremblements de terre se soient produites dans pratiquement tous les types de roches, la plupart concernaient des matériaux étroitement coupé de joints ou faiblement cimentés.

### V - Les glissements cohérents dans les roches

#### Affaissements

Rocheux Chaque affaissement rocheux se compose d'un ou d'un petit nombre de blocs cohérents et profonds qui glissent sur des surfaces de cisaillement basales incurvées de sorte que le mouvement implique une composante de rotation vers l'avant. Les types de roches spécifiques impliqués dans des tremblements de terre historiques étaient le basalte avec des cendres et des brèches inter stratifiées, de la pierre ponce, de l'andésite, du granit, de la pierre verte, de l'ardoise, du schiste, de l'amphibolite, du schiste, de la siltite et du grès.

#### Glissement des Blocks

Les glissements de blocs rocheux, également généralement profonds, consistent en un ou quelques blocs qui glissent sur des surfaces de cisaillement basales planes ou légèrement incurvées. Le mouvement implique donc peu ou pas de rotation. Les surfaces de cisaillement basales sont des plans de litage ou d'autres discontinuités qui plongent hors des pentes, permettant aux blocs de se déplacer sans distorsion significative. Keffer (1984) reporte que des glissements de blocs rocheux ont pris naissance sur des pentes plus raides que  $15^\circ$  dans le tuf, l'andésite, la pierre ponce faiblement cimentée et le schiste, le mudstone, le silt stone et le grès faiblement cimentés ou étroitement joints.

#### Glissements de sol perturbés

Ils se composent de nappes de sol, de quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur, qui se désagrègent au cours du mouvement en un fouillis chaotique de petits blocs et de grains de sol individuels. Le matériau le plus souvent impliqué dans les glissements de terrain perturbés



## Chapitre III : Les glissements de terrain induits par les séismes

était du sable meuble, résiduel ou colluvial avec peu ou pas d'argile ; des dizaines de milliers de glissements de sol perturbés dans de tels matériaux se sont produits lors des tremblements de terre. Le tremblement de terre de 1960 au Chili a provoqué des milliers de glissements de sol perturbés dans un sol volcanique saturé constitué d'une alternance de couches de gravier scoriacé et d'argile sensible produite par l'altération des cendres à grains fins. Lors du tremblement de terre de 1970 au Pérou, des dépôts saturés de matériaux fluvioglaciers et de glissements de terrain ainsi que du till, des cendres volcaniques et des colluvions ont échoué en milliers de glissements de sol perturbés.

### **Avalanches de sols**

Ils ont plus désagrégées et se déplacent plus rapidement que les glissements de terrain perturbés. Ils consistent généralement en des flux de grains et de petits blocs de sol.

### **Glissements cohérents dans le sol**

Les affaissements de sol : sont généralement profonds, consistent en un ou quelques blocs cohérents qui glissent sur des surfaces de cisaillement basales incurvées de sorte que le mouvement implique une rotation vers l'avant. Ces glissements de terrain sont caractérisés par des escarpements en forme de croissant, des blocs avec des surfaces inclinées vers les crêtes des pentes et des orteils bombés. De nombreux remblais affaissés étaient non compactés ou mal compactés.

Les affaissements dans les remblais composés de sable ou de limon étaient plus fréquents que dans les remblais composés d'argiles. Les alluvions des plaines inondables ont produit des affaissements de sol dans plus de tremblements de terre historiques que tout autre matériau naturel, et les alluvions sableux ont produit plus d'affaissements que les matériaux plus grossiers ou plus fins.

### **Écoulements terrestres lents**

Ils ont des corps en forme de langue ou de larme d'argile, d'argile limoneuse ou de limon argileux délimités par des surfaces de cisaillement latérales et basales discrètes. Ces glissements de terrain se déplacent principalement par cisaillement aux limites ; la déformation interne est mineure. Les surfaces de cisaillement basales sont saturées.

## Chapitre III : Les glissements de terrain induits par les séismes

### Épandages et écoulements latéraux dans le sol

Les épandages latéraux du sol se déplacent en translation sur des zones de graviers, de sables ou de limons liquéfiés ou, occasionnellement, sur des argiles sensibles rendues fluides par des perturbations. Toutes ces zones basales sont saturées. Les propagations latérales du sol étaient les plus courantes dans les remblais artificiels granulaires et les alluvions des plaines inondables. La plupart des étendues latérales alluviales se trouvaient le long de canaux fluviaux actifs ou abandonnés ou dans des marais. La plupart des matériaux alluviaux dans les étendues latérales étaient de l'Holocène ; quelques-uns étaient des remblais artificiels qui ont rompu par épandage latéral. A notre opinion le glissement de terrain de Mila est de ce genre.

### VI – CONCLUSIONS

Les zones affectées par les glissements de terrain lors d'un tremblement de terre est en corrélation avec la magnitude. Certains niveaux seuils de secousses du sol sont nécessaires pour déclencher les différents types de glissements de terrain, les données historique le positionne a environ 4 sur Richter.

En particulier, ces glissements de terrain peu profonds et très perturbés provenant de pentes abruptes sont probablement sensibles aux secousses de courte durée et à haute fréquence caractéristiques des petits tremblements de terre, cas du glissement en question. Les glissements de terrain cohérents, généralement profonds, sont initiés par des secousses plus fortes et probablement de plus longue durée, et les propagations et écoulements latéraux par des secousses encore plus longues et plus fortes.

# CHAPITRE IV

## Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés

### I – Introduction

Devant le manque de terrains adéquats pour accommoder la croissance rapide de la population de Mila, les autorités ont considéré tout espace disponible pour l'extension urbaine indépendamment de son adéquation à l'usage. Des espaces marginaux comme El Kherba, sont alors urbanisés malgré sa notoriété pour ne pas être constructible.

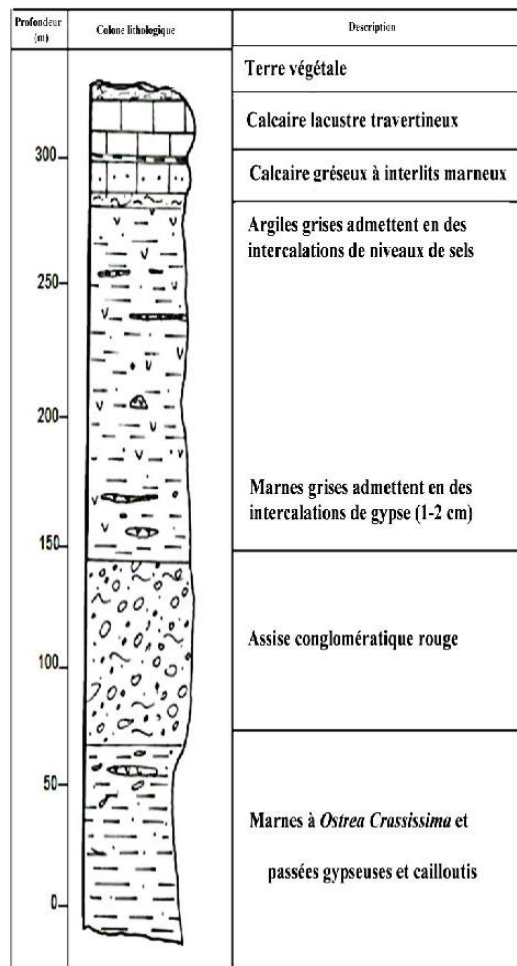
Elle est connue depuis les temps anciens par le site de 100 puits (Bled 100 bir). L'urbanisation de cette partie de Mila est fait en réponse de l'exode rurale qu'ont connue les régions limitrophes de la ville durant les années 90.

### II - Description

#### Géologie du site

Le bassin de Mila est un bassin néogène poste nappe qui s'étend depuis Zighoud Youcef au Nord Est jusqu'à Fedj-Mzala au Sud West et du rocher de Constantine jusqu'au gorges de Beni-Haroun au nord. La lithostratigraphie commence par des conglomérats polygéniques à la base et se poursuit par des marnes et des argiles sur des épaisseurs considérables.

Au sommet il se termine par des grès et des sables surmonté parfois par des argiles rouges et des calcaires lacustres. Les marnes et les argiles contiennent souvent des intercalations de gypses. La lithostratigraphie et résumée par un log stratigraphique établie (Vila ; 1984) figure 32.



**Figure 32: Colonne lithologique du MioPliocène du plateau de Redjas (Vila; 1980).**

Le site d'étude est situé sur un long et large versant recouvert de dépôts de colluvions. Le dépôt est constitué de matériaux limoneux argileux à l'intérieur desquels des poches et des lentilles de matériaux meubles granuleux remplis d'eau pourraient se trouver dans toute la zone.

Le substratum marneux dans le site d'étude se trouve à des profondeurs variables allant de quelques mètres à plus de 80 m par endroits selon les données des sondages carottés.

Les informations qui peuvent être recueillies à partir du mode de dépôt des formations des versant e les observations faites sur le terrain on a pu proposer un modèle géologique conceptuel du talus d'El-Kherba (figure 34).

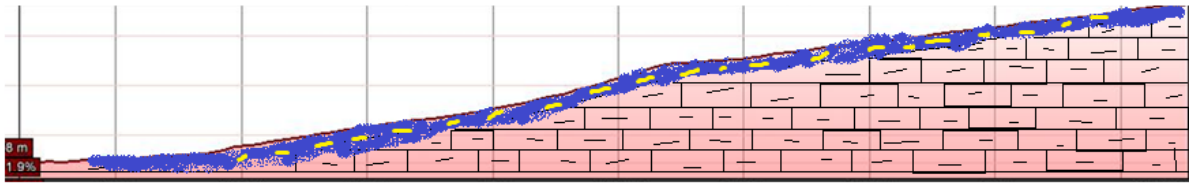


Figure 33 : Modèle conceptuel du glissement de terrain induit par le séisme de Mila.

La figure 34 montre le profil topographique du talus d'El Kherba.

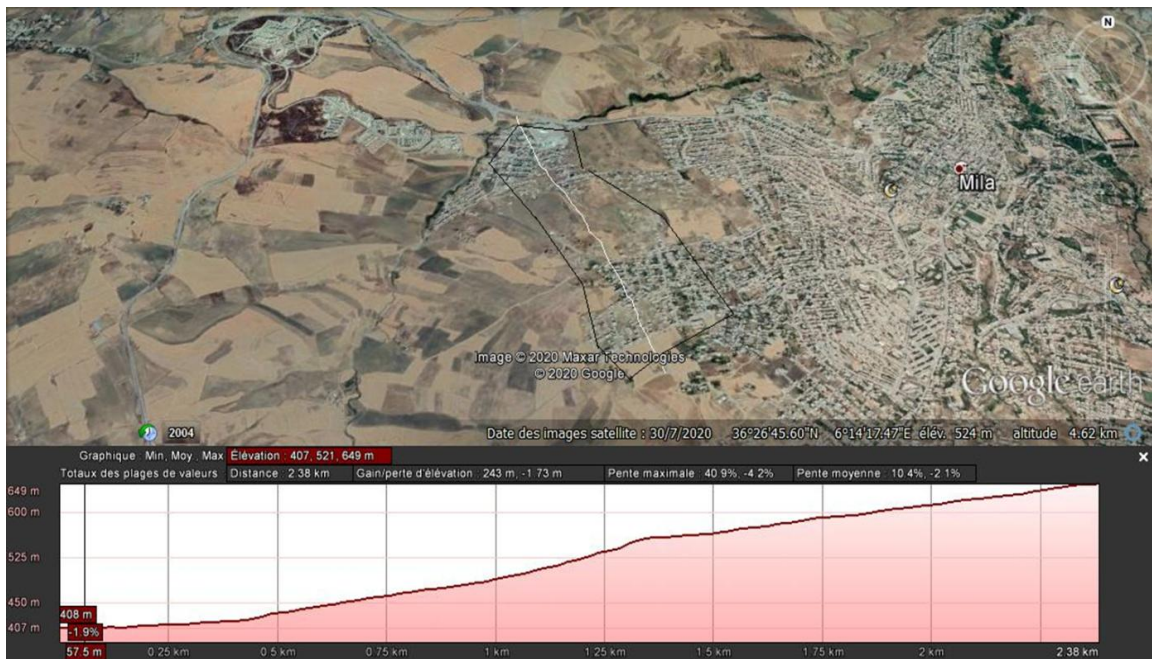


Figure 34 : profil du talus d'El Kherba (google earth).

La première observation concernant la morphologie du talus (figure 34) montre que ce dernier n'a pas encore atteint le profil d'équilibre. Une rupture de pente est bien marquée au niveau du milieu du talus. Qu'est-ce que signifie une telle configuration ? Elle peut traduire la présence d'une couche plus compétente intercalée dans les marnes et qui est restée perchée à cause de sa plus grande résistance relative à l'érosion. Cependant le log stratigraphique ne montre rien du genre. La deuxième explication possible est que le talus a connue des glissements anciens que l'érosion est en train de les saper.

### III - Description du glissement de terrain d'El Kherba

Les désordres observés au niveau du site d'el Kherba sont typiques de ceux rapportés par plusieurs auteurs décrivant les glissements induits tel que Keefer (1984). Les matériaux les plus sensibles aux glissements de terrain induits par les tremblements de terre comprennent les roches faiblement cimentées, les roches indurées avec des discontinuités, les dépôts résiduels et colluviaux, les sols volcaniques contenant de l'argile sensible, les loess, les sols cimentés, et les dépôts deltaïques granulaires. Les anciens glissements de terrain peuvent être réactivés par les tremblements de terre mais à un degré moindre que dans les matériaux non affecté.

Les glissements induits par le séisme dans les sols des versants se composent généralement de nappes de sol, de quelques décimètres à quelques mètres d'épaisseur, qui se désagrègent au cours du mouvement en un fouillis chaotique de petits blocs. Le matériau le plus souvent impliqué dans les glissements de terrain perturbés était du sable meuble, sol résiduel ou colluvial avec peu ou pas d'argile, des dizaines de milliers de glissements de sol perturbés dans de tels matériaux se sont produits lors des tremblements de terre.

Pour le site étudié, il s'agit d'un long et large talus d'approximativement 3 Km<sup>2</sup> affecté par des mouvement de terrain qui se sont survenue à la suite d'une secousse tellurique de 4.9 sur Richter survenue le 08 Aout 2020 à 7h15. La zone affectée présente une structure ressemblant à une succession de horst et de graben. Dans de nombreux endroits, le sol est très perturbé, dans d'autres, il ressemble à une nappe de sol très peu épaisse qui a subi des glissements le long de pente. Les glissements apparaît aussi comme des morceaux de terrain délimités par des fissures latérales, longitudinales et en échelonfigure 35 qui se sont déplacés comme des radeaux les uns par rapport aux autres.

Sur le site du glissement on remarque aussi que les fissures sont grandes ouvertes (figure suivante) et les flancs sont dans la plupart des cas mal définis.

On observe aussi que les caractéristiques de compression ne sont pas courantes, au contraire, les caractéristiques distensives sont omniprésentes.

Le glissement apparaît comme une longue nappe ou les structures en horst e grabens se succèdent. La distance de glissement ne semble pas correspondre à la taille de glissement. Dans de nombreux cas, l'eau sort sous haute pression.



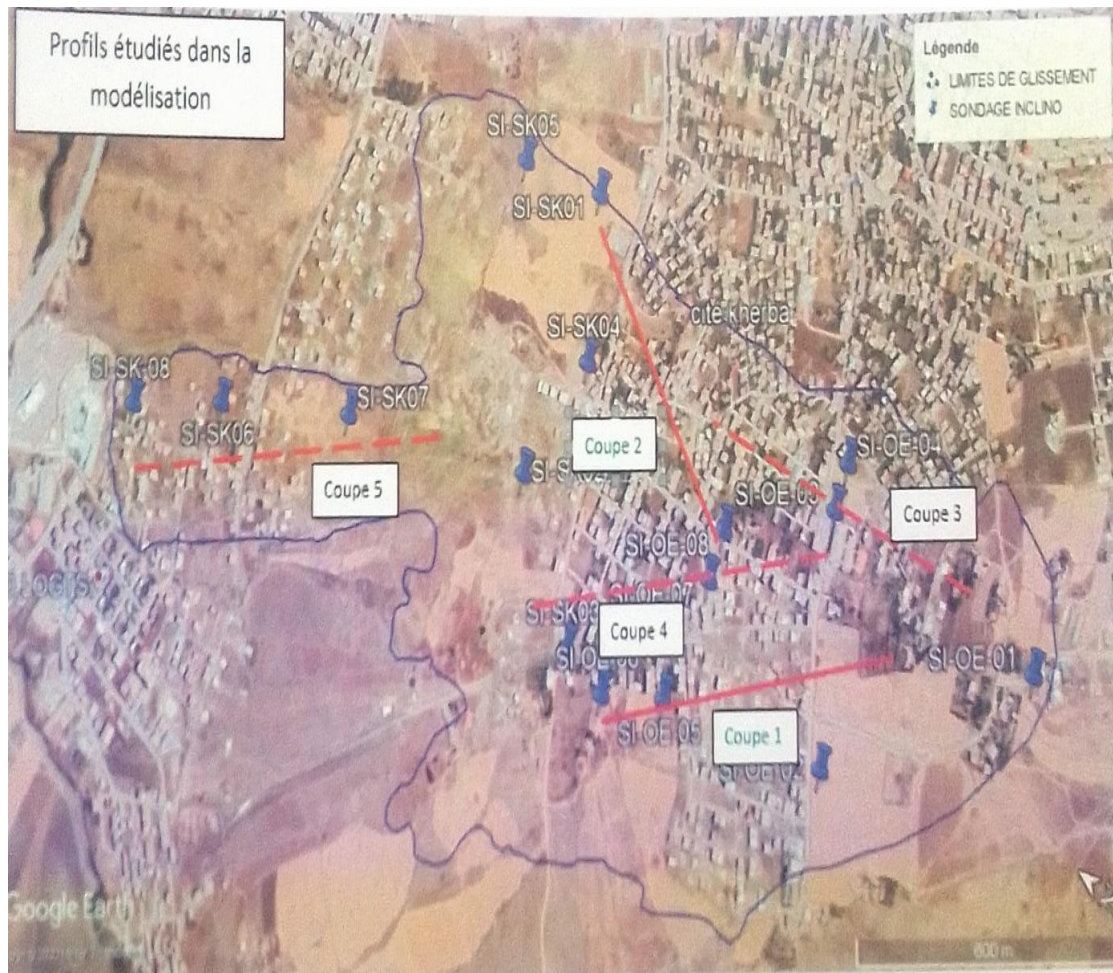
**Figure 35 : Forme irrégulière et des blocs de sol discontinus limités par des fissures latérales, transversales et en échelon.**

#### **IV - Reconnaissance géotechnique**

Après le séisme le gouvernement à charge le laboratoire de LNHC de réaliser une campagne d'investigation géotechnique ou plusieurs sondage carotté et essais géotechniques ont été réalisés.

La disposition des sondages carottés figure 36 est faite de manière à donner une vision claire du sous-sol du site affecté par le glissement.





**Figure 36 : plan d'implantation des sondages carottés et coupes géotechniques.**

Les observations des carottes de sondages montrent une certaine alternance des marnes beiges, des argiles et des argiles noires contenant suffisamment de matériel organique et qui sont fort probable d'anciens horizons de sols.

Cette disposition suggère une activité de glissement très intense ou plusieurs coulées se sont venues s'installer les unes sur les autres (photos carotte).



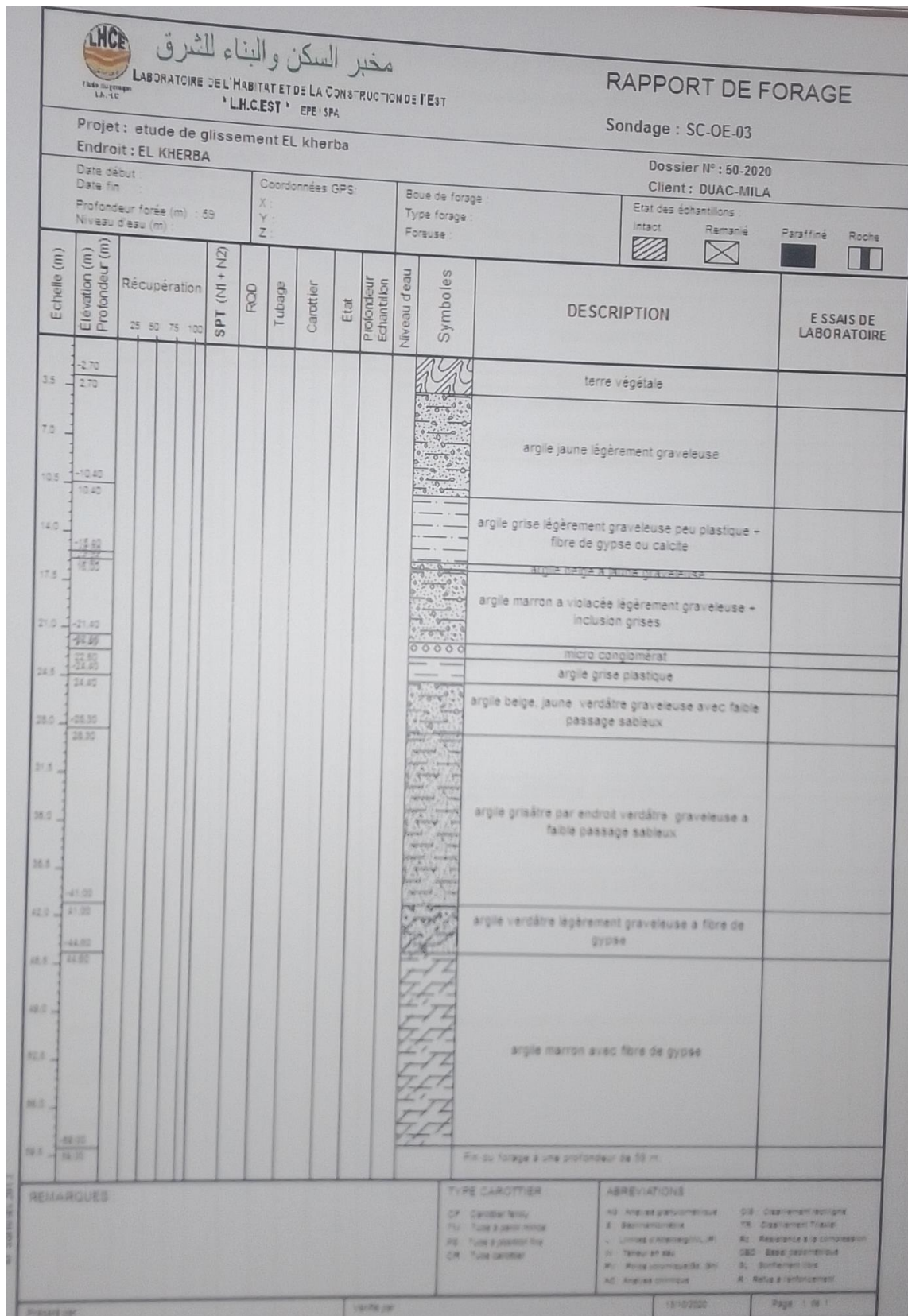
Figure 37 : Échantillon des sondages carottés SC03, Caisse N°09.



Figure 38 : Échantillon des sondages carottés SC-OE-11, Caisse N°01.

La description détaillée des sondages carottés a permis d'établir des logs détaillés et dressé des coupes géotechniques très en détails.

## Chapitre IV : Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés



**Figure 39 : montre un log de sondage ou les alternances de marnes, argiles et tufs prédomine.**

## Chapitre IV : Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés

### Les sols du profil N°1

L'exploitation des données de sondage ont permis l'élaboration de coupe géotechnique (figure 40) où les différents horizons de sol sont bien montrés. La succession des dépôts selon cette coupe transverse montre que le talus était façonné par des vallons dus au ruissellement temporaire, ce qui a donné des variations d'épaisseur latéralement. La nature des dépôts suggère également le caractère altérite. Les photos prises des escarpements de glissement montrent la présence de poches et même couche de tufs saturés (figure 41).

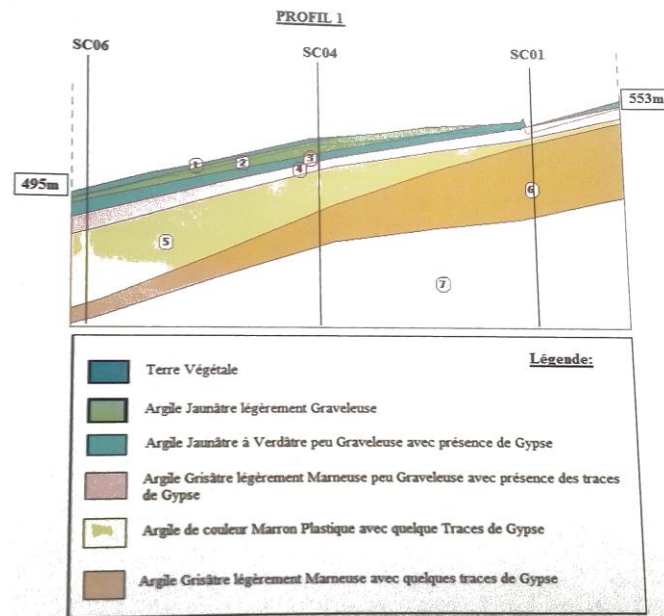


Figure 40 : coupe géotechnique profil 1

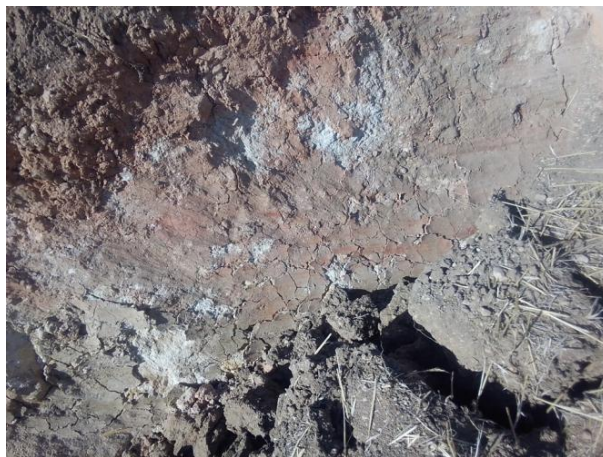


Figure 41 : Photo montrant la présence de tuf saturé dans l'escarpement de glissement

## Chapitre IV : Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés

### Propriétés des sols du profil N°1

Ce profil est situé dans la zone instable à une pente de 12.6%. Les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes couches de sols profil 1. Il s'agit de sols fins peu cohérents qui peuvent correspondre en majorité à des limons très peu argileux.

Couche	Cohésion (c) (kPa)	Angle de frottement interne ( $\phi$ ) (°)	Poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
Argile jaunâtre	13	17	19.00
Argile différente couleurs	18	15	19.00
Argile marron	14	15	19.40
Argile grisâtre	40	15	20.00

Tableau 07 : Caractéristiques des sols utilisés dans les calculs.

### Les sols du profil N°2

La coupe géotechnique selon le profil N°2 est parallèle à la pente et le long du sens général du glissement (figure 42). La coupe montre une alternance de couche d'argiles jaunâtre, argiles variées, d'argile marron et grisâtre. Ces argiles sont ce qu'on appelle les altérites et sont le produit d'altération, d'érosion et de déposition du versant.

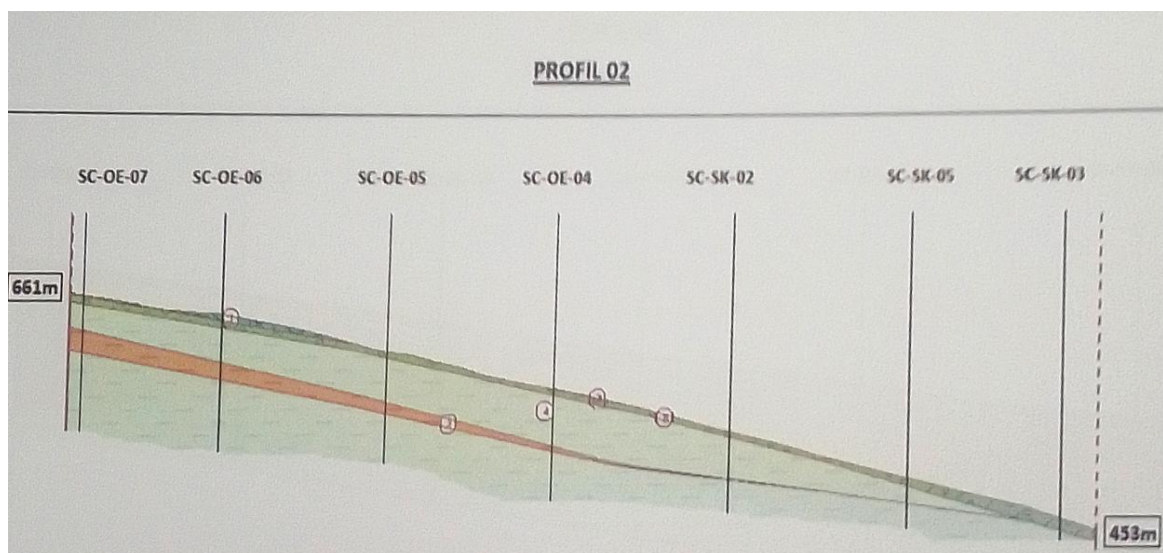


Figure 42 : Coupe géotechnique selon le profil 2

## Chapitre IV : Le versant d'El-Kherba et les dommages constatés

### Propriétés des sols du profil N°2

La pente du talus le long de ce profil est de 10.1%. Le tableau 08, présente les caractéristiques physiques et mécaniques des différentes couches de sols correspondantes. Ces sols ont une cohésion qui varie de 12 à 40 kPa. Ils sont très peu cohérent et se sont encore des altérites et sont en général un mélange de limon, tufs, argiles.

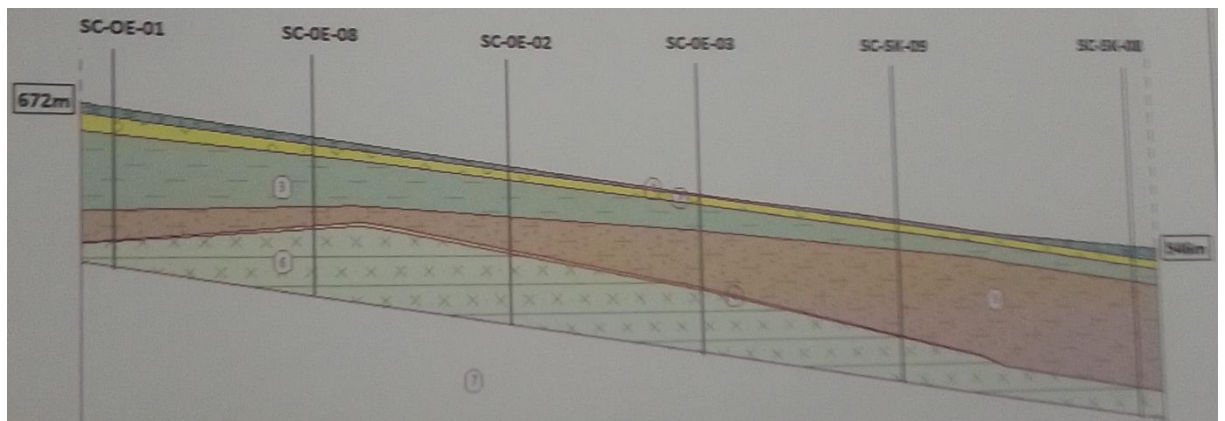
Couche	Cohésion (c) (kPa)	Angle de frottement interne ( $\phi$ ) (°)	Poids volumique humide ( $\gamma_h$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
Argile jaunâtre	13	17	19.50
Argile différente couleurs	12	17	19.00
Argile marron	14	15	19.30
Argile grisâtre	40	15	20.00

Tableau 08 : caractéristiques des sols utilisés dans les calculs.

### Les sols selon le profil N°3

La coupe géotechnique selon le profil N°3 est parallèle d'orientation sensiblement N – S. Elle fait un angle de presque 30° avec le sens général du glissement (figure 43). La coupe montre une alternance de couche d'argiles jaunâtre, argiles variées. La coupe montre également le substratum marneux à une profondeur de 570m.

Les propriétés de ces sols sont pratiquement les mêmes que les précédents. Ils sont très peu cohérent, avec un angle de frottement moyen de l'ordre de 15 à 20°.



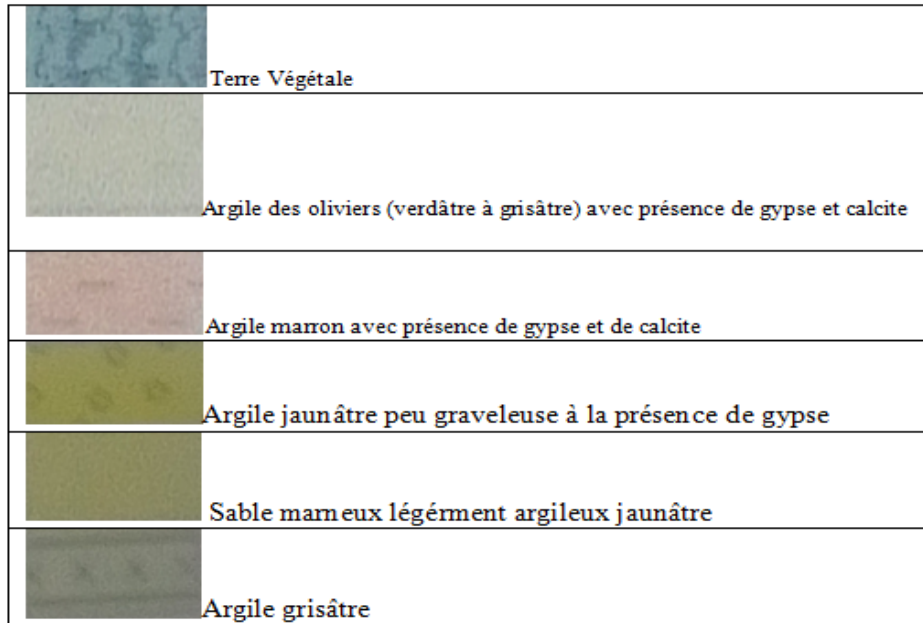


Figure 43 : Coupe géotechnique selon le profil N°3

### V - Calcul de stabilité

Un calcul du coefficient de sécurité par le logiciel Geo5 est réalisé par le laboratoire de LNHC Oum E Bouaghi. Dans ce calcul on a pris en considération les forces sismiques. La valeur du facteur de sécurité obtenue est égale à 0.84. Cette valeur montre que le terrain dans son état actuel est instable.

La figure (figure de cercle de glissement, donner la un numéro) montre le cercle de glissement potentiel du profile N°2, le  $F_s = 0.84$ . Le cercle le plus probable passe par une profondeur de glissement maximale de 70m. Cette profondeur est confirmée par les inclinomètres installés dans la zone centrale du glissement. Les inclinomètres montrent que le terrain est toujours en mouvement.

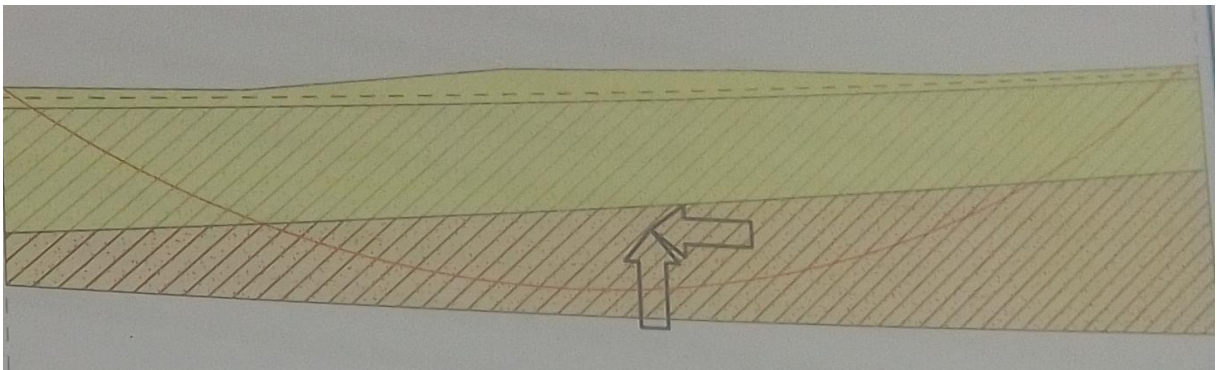


Figure 44 : modélisation du profil N°2 avec le cercle de glissement potentiel ayant un coefficient de sécurité  $F_s=0.84$

### VI - Interprétation phénoménologique du glissement

D'une manière générale ce mouvement de terrain n'est ni un effondrement, ni un affaissement, ce n'est pas un écoulement de terre, c'est un glissement complexe planaire qui ressemble beaucoup à une propagation latérale (lateralspread). Il ressemble à celui de la figure suivante. Ce type de mouvement affecte les terrains meubles ou peu argileux et saturé d'eau et généralement suite au séisme un peu comme le cas d'El Kherba.

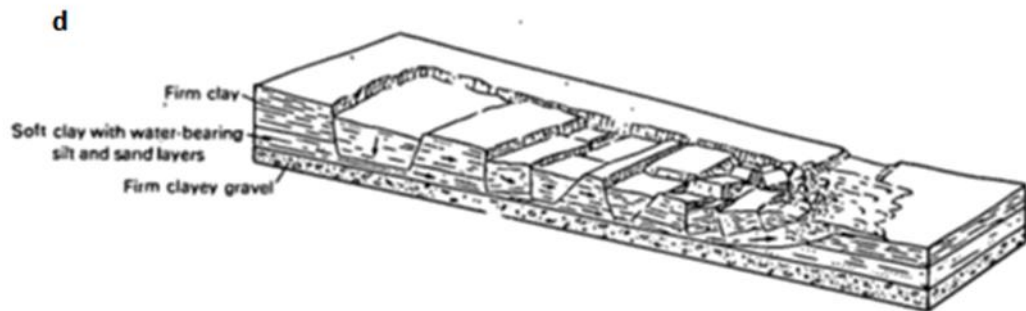


Figure 45 : Mouvement de terrain, lateralspread

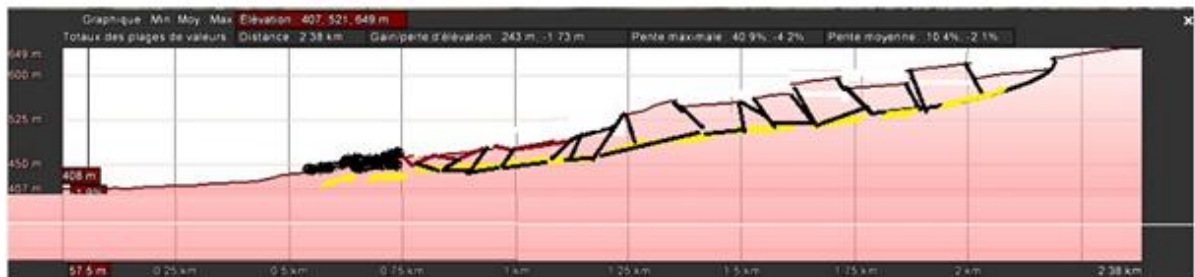


Figure 46 : Model conceptuel du glissement d'El-Kherba

Notre modèle de glissement induit par séisme ressemble à celui survenu au Canada où la présence de poche de silt et argile saturé on conduit à l'initiation de mouvement par liquéfaction. Il ressemble également à autre exemple survenue en Alaska 1964 après un séisme (Wilson and Seed 1964). Dans ce cas la présence d'une couche discontinue de silt saturé a provoqué par liquéfaction un glissement spectaculaire d'une large parcelle des hauteurs de Turnagein (Alaska) figure 49.



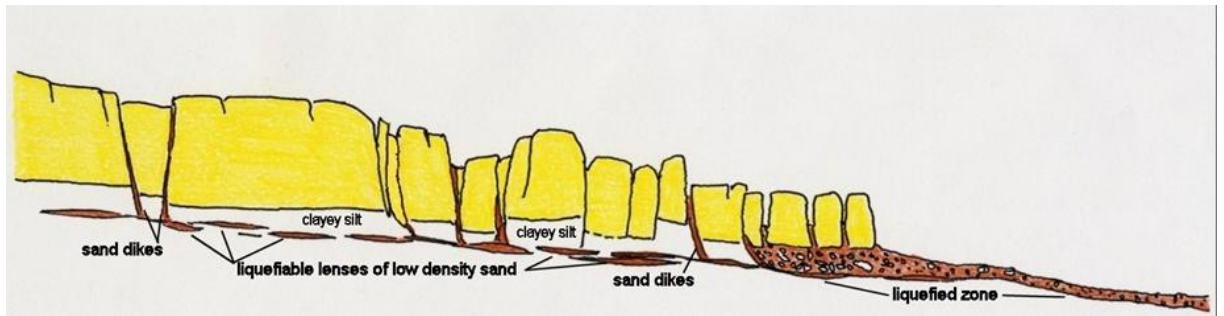


Figure 47: Complexe de Graben rétrogressif formé par liquéfaction partielle à faible profondeur au-dessus d'un étalement latéral

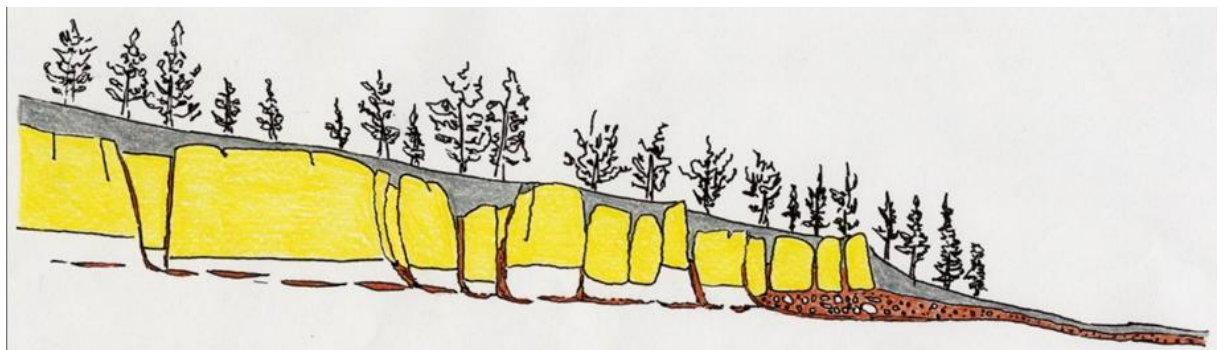


Figure 48 : Même complexe de graben après dépôt de Peoria Loess et l'établissement de couvert végétal.

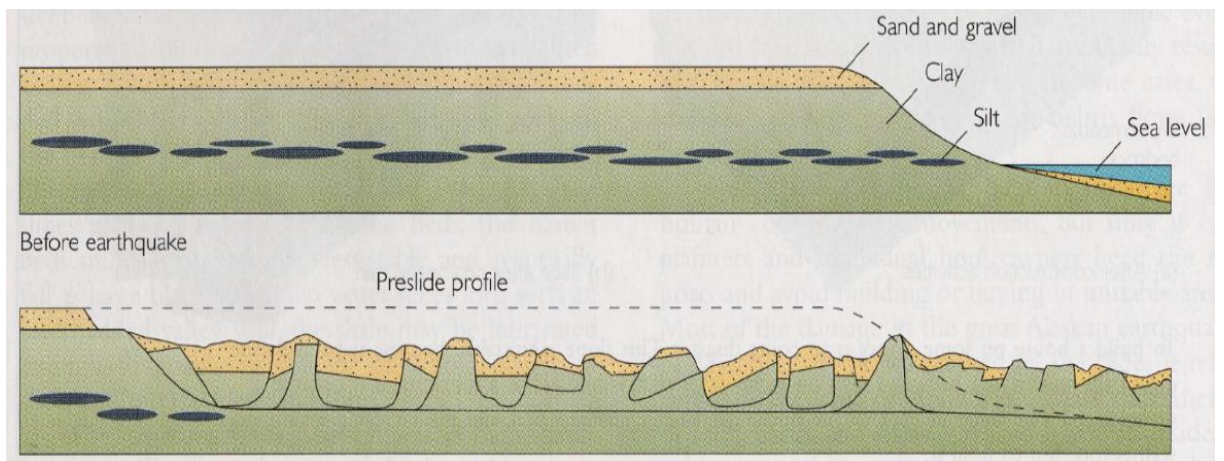
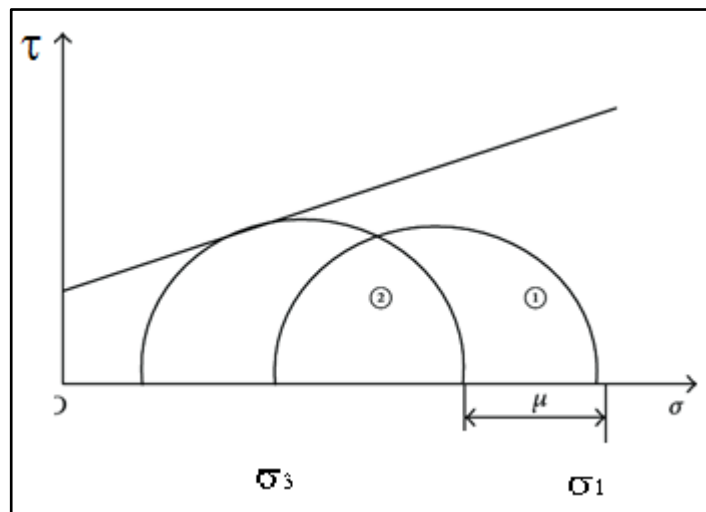


Figure 49 : Glissement induit par le séisme d'Alaska 1964.

### VII- Mécanisme de la rupture et le glissement induit par le séisme

Le mécanisme des glissements de terrain induits par les tremblements de terre est fondamentalement différent du mécanisme des glissements de terrain provoqués par la pluie ou la fonte des neiges. Une perte significative de résistance au cisaillement le long de la surface de glissement peut se produire instantanément par le chargement cyclique d'une contrainte de cisaillement importante pendant les tremblements de terre. Les deux facteurs suivants sont considérés comme des facteurs essentiels provoquant une telle diminution soudaine de la résistance au cisaillement.

L'une est la diminution de la contrainte effective due à l'augmentation de la pression interstitielle excessive, l'autre est la destruction de la structure consolidée du sol. Dans certains cas, les deux facteurs peuvent fonctionner simultanément. Suite au chargement cyclique lors de l'arrivée successive des trains d'ondes sismiques le sol se met à vibrer et perd son cohésion juste au moment où l'eau entre dans l'espace inter-granulaire. Un état où toute la charge est prise par l'eau induit la liquéfaction même local du milieu saturé et provoquant une chute instantanée des contraintes de cisaillement et par conséquent la rupture du sol.



**Figure 50 : Diminution des contraintes effective suite à l'augmentation de la pression de l'eau.**

Ce phénomène est à notre avis responsable du glissement de terrain d'El Kherba. Un des indices est l'émergence des sources d'eau sous pression. Le second est l'enfoncement de quelques maisons de la figure 52 témoignant la perte de cohésion des sols de fondation par liquéfaction figure 51.



Figure 51 :Emergence de source d'eau



Figure 52 :Affaissement d'une maison suite à un défaut de portance due à la liquifaction

### CONCLUSION GÉNÉRALE

Grâce aux récentes activités de recherche intensives sur les glissements de terrain induits par les tremblements de terre, certains progrès ont été réalisés. Dans les chapitres précédents, les éléments suivants sont décrits :

1- Le glissement spectaculaire affectant la ville de Mila (cité El Kherba) en l'été 2020 est provoqué par un séisme de magnitude 4.9 sur Richter. Ce glissement a provoqué des pertes énormes ou des milliers de maisons individuelles ont été rendues inhabitables.

2- Les types de mouvement des glissements de terrain induits par les tremblements de terre sont bien vérifiés sur le glissement étudié.

3- Les caractéristiques typiques des glissements de terrain induits par les tremblements de terre sont communément reconnues.

4- Une certaine relation est trouvée entre les types de mouvement et les propriétés géologiques.

5- Les sondages carottés ont révélés l'existence de plusieurs loupes d'anciens glissements

6- Le mécanisme causal s'explique par la diminution de la contrainte effective due à l'augmentation de la surpression interstitielle d'une part et par la destruction de la structure consolidée du sol d'autre part.

Des recherches supplémentaires sont encore nécessaires pour examiner les questions suivantes :

1-La susceptibilité à la liquéfaction des tufs et des poches de sol meuble du versant.

2-modélisation de la stabilité du versant on utilisant l'accélérogramme du séisme de Mila de 2020.

3-Proposition des remèdes de stabilisation suite au résultat de modélisation

4- Concernant l'efficacité des mesures techniques de stabilisation, la stabilisation des glissements de terrain causés par les précipitations, ont montré certaines fonctions sont efficaces également aux glissements de terrain induits par les tremblements de terre. Cependant, la question reste de savoir comment concevoir des mesures techniques de prévention suffisamment résistantes

## Bibliographie

- [01]A.Benaïssa : Glissement de terrain, calcul de stabilité. Edition O.P.U. (Alger), 95 p, 2003.
- [02]A.Mebarki : Le bassin du kebir-Rhumel : Hydrologie de surface et aménagement des ressources en eau .Thèse de doctorat 3ème cycle, 1982.
- [03]Coiffait P.E.: Un bassin post-nappe dans son cadre structural, exemple du bassin de Constantine (Algérie orientale). Thèse Doctorat sciences. Université de Nancy, 502 p, 1992.
- [04]David K. Keefer : Landslidescaused by earthquakes, U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Road, MS 998, Menlo Park, California, 1984.
- [05]Durand Delga.M : Mise au point sur la structure de NE de Berbérie. PublServ. Carte géo. Algérie, n°39, 1969.
- [06]Durand-Delga M. et FontbotéJ.M: Le cadre structural de la méditerranée occidentale. Recherches Géologiques Minières, t.2, n°115, Paris, pp.67-85, 1980.
- [07]Durand-Delga.M: Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique (Algérie). Thèse Sciences Paris et Bulletin de Services de Cartes géologiques. Algérie, 2ème série, N° 24, p533, 1955.
- [08]Durand-Delga.M: Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Bulletin de Services de Cartes géologiques. Algérie. 39, pp 89-131, 1969.
- [09]EDF: Expertise et étude du glissement de Sibari, rapport partiel N°2-Reconnaissancespécification techniques, 54P, 2002.
- [10]EDF: Expertise et étude du glissement de Sibari, rapport partiel N°2-Reconnaissances spécification techniques-révision1, 54P, 2002.
- [11]Filliat.G et Jaques.D: La pratique des sols et des fondations, 1981.
- [12]Flageollet.J.C: Les mouvements de terrains et leur prévention, 221P, 1989.
- [13]Gelard.J.P: Le flysch à base schisto-gréseuse de la bordure méridionale et orientale du massif du Chettabah , Le flysch maurétanien (grande kabylie). Bull. Soc. géol. Fr. (7).Paris, 1969.
- [14]Laboratoire National de l'habitat et de la Construction : Étude de glissement d'El Kherba, Rapport de forage, échantillon des carottes.

## **Bibliographie**

[15]M.Chadi, Cadre géologique et structural des séries crétacées néritiques du Constantinois (Est-Algérien). Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 218P, 2004.

[16]N.Cheref : Étude géologique et mécanique des glissements de terrains dans la région de Souk Ahras (Mechroha, Zaarouria, Hammamtassa).Thèse de Magister, centre universitaire Cheikh Labri Tebessi, 225P, 2007.

[17]S.Zouaoui: Étude géologique et géotechnique des glissements de terrains dans le bassin néogène de Mila : glissement de Sibari. Thèse Magister. Université de de El Hadj Lakhdar, Batna, 172p, 2008.

[18]W.Chettah: Investigation des propriétés minéralogiques et géomécaniques des terrains en mouvement dans la ville de Mila « Nord-Est d'Algérie ». Thèse Magister. Université d'El Hadj Lakhdar, Batna, p177, 2009.