

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche SCIENTIFIQUE

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل

Université Mohammed Seddik Benyahia -Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : des Sciences de la Terre et de l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم : علوم الأرض و الكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Géologie**

Option : Géologie de l'Ingénieur et Géotechnique

Thème

*Etude de stabilité des talus rocheux
Cas de la pénétrante autoroutière Djendjen-El-Eulma*

Membres de Jury

Président : Pr. MEBROUK Fateh

Examineur: Mme.TEBBIB Houria

Encadrant : Mr. KEBAB Hamza

Co- Encadrant : Dr. BAGHDAD Abdelmalek

Présenté par :

BOUDRAA Amine

KERROUM Said

Année Universitaire 2018-2019

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

REMERCIEMENT

Nous remercions tout d'abord Dieu qui nous a donné le courage et la Santé durant les années d'études.

Nous remercions notre encadrant Mr. KEBAB Hamza qui nous a entouré de ses connaissances, de sa confiance et surtout de sa gentillesse exceptionnelle, ses conseils, ses encouragements et suggestions qui ont été très utiles.

*Nous remercions notre Co -encadrant Mr. BAGHDAD Abdelmalek
Nous remercions aussi aux membres du jury qui ont bien voulu accepter d'examiner ce modeste travail.*

Nous remercions très chaleureusement toute l'équipe de L'agence national des autoroutes de la wilaya de Jijel

Nous remercions aussi adressés à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin, merci à toute personne qui nous a encouragé afin de termine ce travail et plus particulièrement Bouchouit Abdelhamid.

Saïd et Amine

DEDICACES

Tout d'abord je tiens à remercier mes très chers parents de m'avoir permis d'arriver à ce stade de mon éducation.

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon frère Ihsan

A ma très chère mère et mon cher père

A mes frères Houcine et Aissa

A toutes mes sœurs

A toute ma famille

A mon binôme AMINE

A tous mes amis surtout

Messaoud et Abdalilah

A tous mes collègues de Master II GIG promotion 2018/2019

SAID

DEDICACES

Tout d'abord je tiens à remercier mes très chers parents de m'avoir permis d'arriver à ce stade de mon éducation.

Je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère et mon cher père

A mes frères Mohammed Hicham Ahcen

Hocine Abderrahim

A toutes mes sœurs

A toute ma famille

A mon binôme SAID

A tous mes amis surtout

Soufien Yacer Ahmed

A tous mes collègues de Master II GIG promotion 2018/2019

AMINE

Résumé

La stabilité des talus rocheux constitue un axe d'études et de recherches important dont les applications concernent des domaines très variés : mines et carrières à ciel ouvert, excavations de génie civil, risques naturels liés aux mouvements de versant. L'objectif de ce mémoire focalise sur l'étude de stabilité de six talus rocheux localisés sur la pénétrante autoroutière Djendjen- El-Eulma entre le PK 18 et 24.

De point de vue géologique les talus sont formés par des masses rocheuses hétérogènes type flysch qui sont le Numidien au niveau des talus TR01 et TR02 et le Massylien au niveau du reste des talus. Le traitement statistique des données structurales par le code DIPS a montré que le flysch numidien est recoupé par trois à quatre familles de discontinuités et le flysch massylien par quatre à cinq familles. L'étude des discontinuités effectuée conformément aux recommandations d'ISRM (1981), nous a permis de constater que les discontinuités du flysch massylien sont caractérisées par un très faible espacement, une persistance très faible. Leurs des épontes sont lisses, partiellement ouvertes et moyennement altérés et celle du flysch numidien sont caractérisées par un espacement faible à moyen, une persistance faible à moyenne. Leurs épontes sont rapprochées, légèrement altérées et rugueuses. La qualité du flysch massylien est mauvaise à très mauvaise et du flysch numidien est moyenne à bonne comme révélée par le RMR_{89} et le GSI.

L'analyse de stabilité des talus rocheux a été effectuée conformément aux trois approches, géométrique en utilisant le code DIPS, empirique par l'utilisation du système SMR, et analytique par l'utilisation du logiciel SLIDE. Les résultats obtenus par l'approche analytique ont validé ceux obtenus par les autres approches dont leurs résultats sont similaires. Les techniques de confortements optées (les tirants d'ancrage, modification géométrique du talus (reprofilage), drainage) sont vérifiées par les calculs de stabilité en utilisant SLIDE, dont les résultats obtenus sont très satisfaisants ($FS > 1.5$).

En effet, il est fortement recommandé d'analyser la stabilité des talus rocheux par les approches géométrique et empirique notamment dans les phases préliminaires, voire de construction des projets, en vue de leurs rapidités, de la fiabilité de leurs résultats et de leurs faibles couts

Mots clés : rocheux, SMR, flysch, RMR, pénétrante, discontinuité

Abstract

The stability of rock slopes is a major area of study and research whose applications concern a wide variety of fields: open pit mines and quarries, civil engineering excavations, natural risks linked to slope movements. The objective of this thesis focuses on the stability study of six rock slopes located on the DjenDjen- El-Eulma highway penetrating between PK 18 and 24.

From the view geological point, the slopes are formed by heterogeneous rock masses such as the Numidian at the slopes TR01 and TR02 and the Massylian in other slopes. The statistical treatment of structural data by the DIPS code showed that the Numidian flysch is intersected by three to four families of discontinuities and the massylian flysch by four to five families. The study of the discontinuities carried out according to the recommendations of ISRM (1981), allowed us to note that the discontinuities of the massylian flysch are characterized by a very small spacing, a very low persistence. Their walls are smooth, partially open and moderately altered, and that of the flysch Numidian are characterized by low to medium spacing, low to medium persistence. Their walls are closed, slightly weathered and rough. The quality of the flysch Massylien is bad to very bad and flysch Numidien is average to good as revealed by the RMR89 and the GSI.

Rock slope stability analysis was performed according to the three approaches, geometric using the DIPS code, empirical using the SMR system, and analytical using the SLIDE software. The results obtained by the analytical approach validated those obtained by the other approaches whose their results are similar. The chosen reinforcement techniques (anchor bolts, geometrical modification of the slope (reprofiling), drainage) are verified by the stability calculations using SLIDE, whose results obtained are very satisfactory ($F_s > 1.5$).

Indeed, it is strongly recommended to analyze the stability of the rock slopes by geometric and empirical approaches, especially in the preliminary phases, or even construction of the projects, in view of their speed, the reliability of their results and their low costs.

Keywords: rocky, SMR, flysch, RMR, penetrating, discontinuity

ملخص

يعد استقرار المنحدرات الصخرية مجالاً رئيسياً من مجالات الدراسات والأبحاث التي تتعلق تطبيقاتها بمجموعة واسعة من المجالات: مناجم ومقالع الحفريات المفتوحة، وحفريات الهندسة المدنية، والمخاطر الطبيعية المرتبطة بحركات المنحدرات. يركز الهدف من هذه الرسالة على دراسة الثبات لسته منحدرات صخرية تقع على الطريق الرابط بين جن جن والعلمة بين 18 pk و 24 pk

من وجهة النظر الجيولوجية، تتشكل المنحدرات من كتل صخرية غير متجانسة من نوع الفليش مثل النوميديا عند المنحدرات TR01 و TR02 والماسيليا على مستوى المنحدرات المتبقية. أظهرت المعالجة الإحصائية للبيانات التركيبية من خلال كود DIPS أن النوميديا يتميز بوجود من ثلاث إلى أربع عائلات من التشققات والفليش الماسيليا من أربعة إلى خمس عائلات. سمحت لنا دراسة التشققات التي تمت وفقاً لتوصيات (ISRM 1981) أن نلاحظ أن تشققات الفليش ماسيليا تتميز بمسافة صغيرة جداً، واستمرار ضعيف جداً. أعمادها ناعمة ومفتوحة جزئياً و تعري معتدل، وتتميز تشققات الفليش نوميديا بمسافات منخفضة إلى متوسطة ومن استمرار منخفض إلى متوسط. جدرانها قريبة من بعضها، ومتعرية قليلاً. جودة الفليش الماسيليا سيئة إلى سيئة للغاية و الفليش نوميديا من المتوسط إلى الجيد كما كشف عنها RMR89 و GSI.

تم إجراء تحليل ثبات المنحدر الصخري وفقاً للمناهج الثلاثة، هندسياً باستخدام كود DIPS ، تجريبياً باستخدام نظام SMR، وتحليلي باستخدام برنامج SLIDE. أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النهج التحليلي أكدت تلك التي تم الحصول عليها من خلال المناهج الأخرى التي كانت نتائجها متشابهة. تم التحقق من تقنيات التعزيز المختارة (مسامير التثبيت ، التعديل الهندسي للمنحدر (إعادة التوطين) ، التصريف) من خلال حسابات الاستقرار باستخدام SLIDE ، اين تم الحصول على نتائج مرضية للغاية ($FS > 1.5$).

في الواقع، يوصى بشدة بتحليل استقرار المنحدرات الصخرية من خلال الأساليب الهندسية والتجريبية ، خاصة في المراحل الأولية ، أو حتى خلال مراحل بناء المشاريع، نظراً لسرعتها وموثوقية نتائجها وتكاليفها المنخفضة.

، اختراق، تشققات RMR ، flysch ، SMR كلمات البحث: الصخرية ،

Sommaire

Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Introduction Générale	
1.Introduction	1
2.Situation géographique.....	1
Chapitre I : Synthèse Bibliographique	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Masses rocheuses	3
I.2.1. Matrices rocheuses.....	3
I.2.2. Discontinuités	3
I.3. Caractérisation géomécanique des masses rocheuses.....	3
I.3.1. Etude de la matrice rocheuse ; roche intacte.....	3
I.3.1.1. Origine géologique.....	4
I.3.1.2. Caractéristiques physiques.....	4
I.3.1.3. Caractéristiques mécaniques	4
I.3.2. Etude de discontinuités	4
I.3.2.1. Typologies des discontinuités	4
I.3.2.2. Paramètres géométriques des discontinuités.....	4
I.3.3. Classification géomécanique des masses rocheuses	5
I.3.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation)	6
I.3.3.2. Le système RMR (Rock Masse Rating).....	6
I.3.3.3. Le système Q (NGI : Norwegian Geotechnical Institut).....	7
I.3.3.4. Le système GSI (Géological Strength Index)	8
I.4. Les types des instabilités des talus rocheux	8
I.4.1. Les glissements de terrain	8
I.4.2. Le Fluage	8
I.4.3. La solifluxion	9
I.4.4 Coulées boueuses	9
I.4.5. Les éboulements et les écroulements	10
I.5. Les causes d'instabilités des talus rocheux	10
I.5.1. Les facteurs conditionnant	10
I.5.1.1. La lithologie	10
I.5.1.2. La pente.....	11
I.5.1.3. Le relief.....	11
I.5.1.4. La proximité du réseau de drainage	11
I.5.1.5. L'activité tectonique récente à actuelle.....	11
I.5.2 Les facteurs déclenchants	11
I.5.2.1. Les précipitations	11
I.5.2.2. La sismicité	11
I.5.2.3. Les cours d'eaux et les résurgences :	11

I.5.2.4. Le couvert végétal	12
I.6. Modes de ruptures des talus rocheux	12
I.6.1. Rupture plane	12
I.6.2. Rupture circulaire ou rotationnelle	13
I.6.2.1. Ruptures rotationnelle simple	13
I.6.2.2. Rupture rotationnelle complexe	13
I.6.3. Rupture en dièdres (wedge)	14
I.6.4. Rupture par Toppling (basculement)	14
I.7. Approches utilisées dans les études de la stabilité des talus rocheux	15
I.7.1. Approche d'état de limite d'équilibre	15
I.7.1.1. Notions de coefficient de sécurité : FS	15
I.7.1.2. Méthodes d'équilibre limite	16
I.7.2. Approche géométrique : analyse cinématique	18
I.7.3. Approche empirique.....	20
I.7.4. Approche numérique.....	20
I.7.5. Calcul automatique à l'aide d'ordinateur	21
I.8. Méthodes de confortement des talus rocheux	21
I.8.1. Tirants d'ancrage	21
I.8.2. Clous	21
I.8.3. Les micropieux.....	21
I.8.4. Le boulonnage.....	21
I.8.5. L'aplatissement des talus	22
I.8.6. L'injection.....	22
I.8.7. Le drainage.....	22
I.9. Conclusion	22

Chapitre II : Cadre Géologique

II.1. Introduction	23
II.2. Les grands ensembles géologiques de la marge Nord Algérienne	23
II.2.1. Le domaine interne	23
II.2.1.1. Socle Kabyle.....	23
II.2.1.2. Les formations de la couverture sédimentaire du socle.....	24
II.2.1.2.1. La dorsale interne	24
II.2.1.2.2. La dorsale médiane	24
II.2.1.2.3. La dorsale externe.....	24
II.2.2. Le domaine des flyschs.....	25
II.2.2.1. Le flysch Maurétanien	25
II.2.2.2. Le flysch Massylien.....	26
II.2.2.3. Le flysch Numidien	27
II.2.3. Domaine externe : « Le sillon Tellien »	27
II.2.3.1. Les séries Telliennes.....	28
II.2.3.2. Les séries de l'Avant pays	28
II.2.3.3. Les séries de l'avant pays autochtone.....	29
II.2.4. Les formations post-nappes	29

II.2.5. Les roches magmatiques.....	29
II.2.6. Les formations du quaternaire	29
II.3. Géologie locale	30
II.3.1. Géologie des deux sites TR 01 et TR02	31
II.3.2. Géologie des site TR03, TR04 TR05 et TR06	31
II.4. Aspect structural et sismique.....	32
II.4.1. Tectonique anté-Oligocène.....	32
II.4.2. Tectonique Miocène	32
II.4.3. Analyse sismo-tectonique.....	32
II.5. Conclusion	34

Chapitre III : Caractérisation Géomécanique Des Talus Rocheux

III.1. Introduction	35
III.2. Campagne de la reconnaissance géotechnique des talus rocheux.....	35
III.2.1. Essais in situ	37
III.2.1.1. Essai SPT.....	37
III.2.1.2. Essais de perméabilité (Lefranc NF 94-132).....	38
III.2.1.3. Essai Pressiométrique.....	38
III.2.1.4. Suivie des piézomètres	39
III.2.2. Essai de laboratoire	40
III.3. Études des discontinuités	40
III.3.1. Etude structurale.....	40
III.3.2. Caractérisation des discontinuités	42
III.4. Classification géomécanique des talus rocheux	46
III.4.1. Rock Quality Designation (RQD)	46
III.4.2. Rock Mass Rating (RMR).....	46
III.4.3. Geological Strength index GSI	49
III.5. Conclusion.....	51

Chapitre IV : Etude de stabilité

IV.1. Introduction.....	52
IV.2. Étude de stabilité par l'approche géométrique : analyse cinématique	53
IV.3. Etude de stabilité par l'approche empirique : Système SMR	57
IV.3.1. Système SMR.....	57
IV.3.1.1. Définition des paramètres du SMR.....	58
IV.3.1.2. Stabilité et soutènement des talus selon SMR	59
IV.3.2. Étude de stabilité des talus rocheux par SMR.....	61
IV.4. Étude de stabilité par l'approche analytique : équilibre limite	64
IV.4.1. Données d'entrés.....	65
IV.4.2. Calculs de stabilité	66
IV.5. Conclusion	69

Conclusion générale

Référence bibliographique

Annexe

Liste des figures

Figure.1. Localisation des talus rocheux	2
Figure.2. Fluage.....	9
Figure.3. Solifluxion.....	9
Figure.4. Coulée boueuse	9
Figure.5. Modèle représentatif d'un écoulement.....	10
Figure.6. Rupture plane	12
Figure.7. Rupture rotationnelle simple	13
Figure.8. Glissement rotationnel complexe.....	13
Figure.9. Rupture en dièdre (Wedge)	14
Figure.10. Rupture par Toppling (basculement).....	14
Figure.11. Méthode des tranches.....	16
Figure.12. Méthode globale.....	17
Figure.13. Analyse cinématique des blocs rocheux dans un talus (Wylie, 2018).	18
Figure.14. Les principaux types de ruptures des blocs dans les talus et le stéréogramme correspondant (Wylie, 2018).(a) : rupture plane, (b)rupture wedge (dièdre), (c) rupture par toppling, (d) rupture circulaire.....	19
Figure.15. Position des différentes unités géologiques des Maghrébides.	23
Figure.16. Esquisse géologique de l'extrémité de la petite kabylie (Djellit et Andrieux, 1987).....	28
Figure.17. Colonne lithostratigraphique flysch massylien (Djellit, 1987)	29
Figure.18. Colonne lithologique du flysch Numidien (Djellit, 1987)	30
Figure.19. Nature géologique des talus rocheux étudiés	31
Figure.20. Photos de grès Numidien, prises au niveau des deux sites TR01et TR02.....	31
Figure.21. Photos de flysch massyliens, prises au niveau du tronçon du tracé de la pénétrante compris entre le PK 22 et le PK 24	31
Figure.22. Carte d'intensités sismiques maximales observées dans le nord de l'Algérie	32
Figure.23. Contexte sismo-tectonique de la région Jijel – Bougie (CRAAG ; 1971).	33
Figure.24. Carte d'implantation des essais (ANA, 2016).....	36
Figure.25. Traitement statistiques des données de mesure par le logiciel DIPS (Rocsciences , 2016)..	41
Figure.26. Les profils de rugosités et leurs valeurs de JRC correspondant	44
Figure.27. Exemple d'estimation du GSI à partir du canevas de Marinis, 2011	49
Figure.28. Analyse cinématique du talus rocheux TR01	54
Figure.29. Analyse cinématique du talus rocheux TR02.....	54
Figure.30. Analyse cinématique du talus rocheux TR03.....	54
Figure.31. Analyse cinématique du talus rocheux TR04.....	55
Figure.32. Analyse cinématique du talus rocheux TR05.....	55
Figure.33. Analyse cinématique du talus rocheux TR06.....	55
Figure.34. Géométrie du talus TR01	66
Figure.35. Géométrie du talus TR05	66
Figure.36. Résultats de calcul après confortements du talus TR01 – variante 01	67
Figure.37. Résultats de calcul après confortements du talus TR05 – variante 01	67
Figure.38. Résultats de calcul après confortements du talus TR05 – variante 02	67
Figure.39. Résultats de calcul après confortements du talus TR01 – variante 02 Les valeurs de FS obtenus pour les deux variantes sont regroupées dans le tableau suivant	68

Liste des tableaux

Tableau.1. Classification de la qualité des roches selon le RQD	6
Tableau.2. Classification de la masse rocheuse selon RMR.....	7
Tableau.3. Qualité de la masse rocheuse selon le système Q.	7
Tableau.4 Qualité de la masse rocheuse en fonction du système GSI.....	8
Tbaleau.5. Equilibre des talus en fonction des valeurs théoriques du Fs.	15
Tableau.6. Les coordonnées des emplacements des essais réalisés (WGS 84)	35
Tableau.7. Lithologie des talus rocheux selon les logs des sondages réalisés (ANA, 2016)	37
Tableau.8. Les unités géotechniques formant les talus rocheux.....	37
Tableau.9. Résultats des essais SPT.	37
Tableau.10. Les valeurs du coefficient de perméabilité	38
Tableau.11. Résultats des essai pressiométriques.....	39
Tableau.12. Les lectures piézométriques.....	39
Tableau.13. Résultats de l'essai de la résistance à la compression.....	40
Tableau.14. Classification de la résistance à la compression des roches (ISRM ,1978)	40
Tableau.15 . Les orientations des familles dominantes au niveau de chaque site	40
Tableau.16 . Recommandations d'ISRM (1981) pour caractériser les discontinuités	42
Tableau.17. Estimation de la rugosité des discontinuités par jR et jC.....	43
Tableau.18. Evaluation de la rugosité des épontes des discontinuités des talus rocheux étudiés	44
Tableau.19. Caractérisation des discontinuées de talus rocheux étudiés.....	45
Tableau.20. Qualité de la masse rocheuse selon RQD	46
Tableau.21. Détail de classification géomécanique du système RMR89.....	47
Tableau.22. Evaluations de la masse rocheuse des talus rocheux selon RMR89.....	48
Tableau.23. La qualité de la masse rocheuse selon GSI.....	49
Tableau.24. Evaluations de la masse rocheuse des talus rocheux selon GSI	50
Tableau.25. Résultats de l'analyse cinématiques des talus rocheux étudier.....	56
Tableau.26. Paramètres d'ajustement du SMR (Romana ,1985).....	58
Tableau.27. Les différentes classes de stabilité en fonction du SMR (Romana,1985).	59
Tableau.28. Les suggestions de soutènement selon les classes de SMR.....	60
Tableau.29. Slope support guidelines based on SMR (Romana,1985).	60
Tableau.30. Détail du calcul de SMR du Talus TR 01 selon l'approche de Romana (1985).....	61
Tableau.31. Détail du calcul de SMR du TR 01 selon l'approche de Anbalagna et al., (1992).....	62
Tableau.32. Les valeurs de SMR selon l'approche de Romana (1985).....	62
Tableau.33. Les valeurs de SMR selon l'approche Anbalagna et al., (1992),.....	63

Tableau.34. Estimation de la résistance à compression de la roche intact (σ_{ci}) des masses rocheuses en fonction de la typologie du Flysch (Marinos, 2011).....	64
Tableau.35. Paramètres d'entrées	65
Tableau.36. Coefficients de sécurité obtenus à l'état naturel	66
Tableau.37. Les caractéristiques des tirants d'ancrages	66
Tableau.38. Résultats de calcul de stabilité	68

Introduction générale

La stabilité des talus rocheux constitue un axe d'études et de recherches important dont les applications concernent des domaines très variés : mines et carrières à ciel ouvert, excavations de génie civil, risques naturels liés aux mouvements de versant, et donc protection de l'environnement et aménagement du territoire. Si les problèmes posés sont bien distincts selon le secteur d'activité, ils correspondent toujours à des enjeux de première importance.

Dans le domaine des mouvements de versants naturels, les enjeux concernent la protection des personnes, des biens et des infrastructures. Il s'agit plus, ici, de définir les volumes de matériaux instables, pour dimensionner des ouvrages de protection directe vis-à-vis des habitations et des infrastructures, ou de protection indirecte telles que des galeries de dérivation de cours d'eau, l'ouverture et l'aménagement des routes afin d'éviter des catastrophes liées à la formation de barrages par les matériaux éboulés et glissés. Il est également important d'identifier les facteurs déclenchants ou aggravants des mouvements afin de mettre en place des méthodes de surveillance et éventuellement de confortement.

Quel que soit le domaine d'application, l'expérience montre que chaque masse rocheuse est un cas unique, et qu'il n'existe pas de recettes standards ni de solutions de routine qui permettent d'obtenir systématiquement la bonne réponse au problème posé. Il importe donc de mettre en place une méthodologie bien maîtrisée, basée directement sur une approche géologique, et donc structurale, de la masse rocheuse.

Dans le cadre de la conjonction et l'assurance de la fluidité du trafic entre l'autoroute Est – Ouest et les différents pôles économiques et les grands centres urbains, plusieurs pénétrantes autoroutières sont lancées, parmi elles celle de Djen-Djen-d'El – Eulma qui relie le port de Djendjen et l'autoroute Est-Ouest au niveau de la ville d'El-Eulma.

Des sections du tracé de cette pénétrante passent par des masses rocheuses ce qui nécessite des études de leurs stabilités afin d'assurer d'une part l'avancement des travaux, et d'autre part pour garantir la protection des transporteurs et des biens lors la mise en marche de cette pénétrante.

Situation géographique

Les talus rocheux objet de notre étude sont situés du Nord vers le Sud entre le PK 18 et le pk 24 sur le tracé de la pénétrante autoroutière qui relie le port de Djendjen et l'autoroute Est-Ouest au niveau d'El Eulma (figure 1).

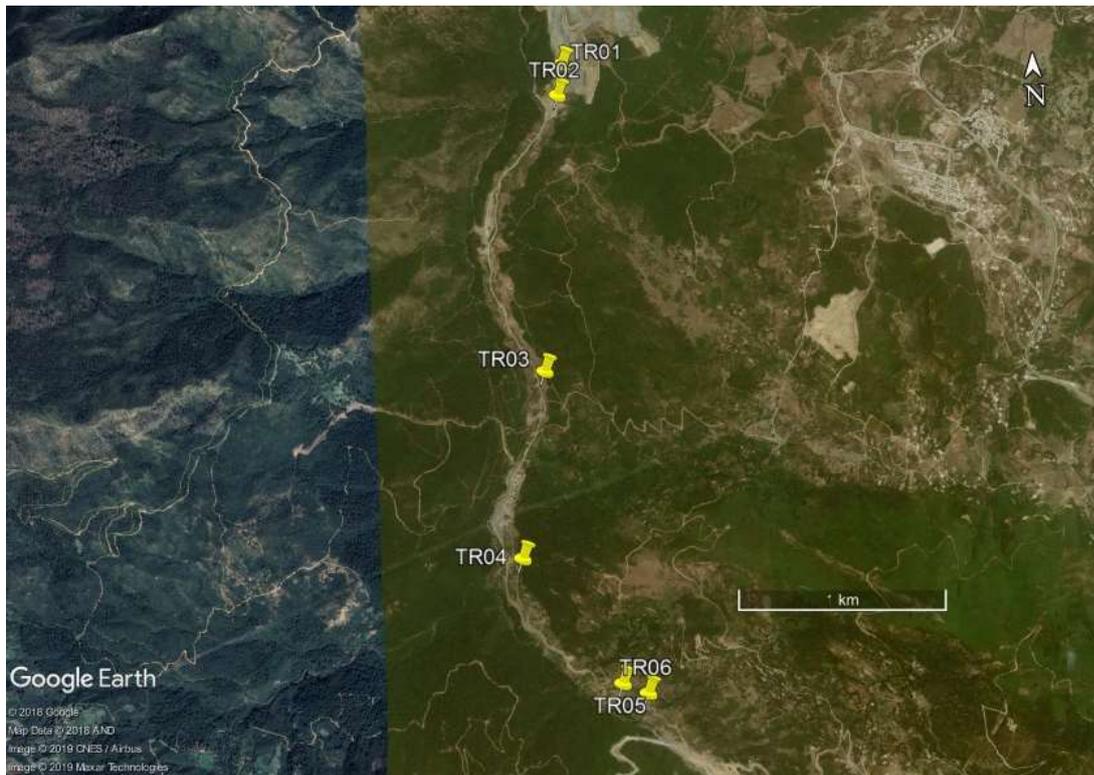


Figure.1. Localisation des talus rocheux (google earth)

Objet et méthode de travail

L'objectif de ce projet de fin d'étude localise sur l'étude de stabilité des talus rocheux situés sur la pénétrante autoroutière qui relie le port de Djendjen et l'autoroute Est-Ouest au niveau de la ville d'El – Eulma. La démarche optée pour réaliser ce travail est décomposée en plusieurs étapes :

- La caractérisation de la masse rocheuse par l'acquisition, puis l'analyse, de données géologiques et géomécaniques ;
- La détermination des mécanismes potentiels de rupture, par l'utilisation de trois approches différentes : analyse cinématique, empirique et analytique (équilibre limite).
- Analyse des facteurs déclenchant ou aggravants des ruptures afin de proposition des moyens de confortements bien adaptés aux modes de ruptures

Ce travail est organisé dans le mémoire comme suit :

- Introduction Générale.
- Chapitre I : synthèse bibliographique sur talus rocheux
- Chapitre II : Cadre géologique.
- Chapitre III : Caractérisation géomécanique des talus rocheux.
- Chapitre IV : Etude de stabilité.
- Conclusion générale et recommandations

I.1. Introduction

Les problèmes de stabilité des pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues, des barrages et dans les exploitations à ciel ouvert. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoque des pertes en vies humaines ainsi que des dégâts naturels considérables. Pour cela, ce phénomène constitue l'une des préoccupations majeures des géotechniciens et des gestionnaires des ouvrages d'art et miniers.

I.2. Masses rocheuses

La masse rocheuse est considérée comme une structure discontinue, composée d'éléments continus plus ou moins homogènes, de forme géométrique quelconque de roches séparés par des discontinuités. En résumé, elle est représentée par une matrice rocheuse séparés par des discontinuités

I.2.1. Matrices rocheuses

La matrice rocheuse est définie comme un volume de roche intacte qui possède des propriétés homogènes et non coupée par des discontinuités. Elle fait ainsi référence aux blocs non-fracturés situés entre les discontinuités structurales. En fonction des caractéristiques des masses rocheuse et de son histoire géologique, la taille de ces blocs peut varier de quelques millimètres à plusieurs mètres. (Hoang,2010).

I.2.2. Discontinuités

En mécanique des roches, le terme discontinuité désigne toute interruption des propriétés mécanique ou physique dans la matrice rocheuse. Il s'agit souvent d'une dégradation des propriétés mécaniques sur des zones de très faible épaisseur. Les discontinuités sont généralement des lieux de grande déformabilité, où la rupture est plus facile et où l'eau circule plus facilement.

I.3. Caractérisation géomécanique des masses rocheuses

La reconnaissance des masses rocheuses fracturées permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors de l'étude d'un projet de construction ou lors de l'expertise de sinistres. Elle constitue le lien entre la cause d'un sinistre et les remèdes que l'on se propose de mettre en place. Cependant, son étude nécessite une caractérisation de la matrice rocheuse, ainsi que celle des discontinuités.

I.3.1. Etude de la matrice rocheuse ; roche intacte

Le type de la roche intacte est indiscutablement le paramètre le plus important, qui définit toutes les autres caractéristiques de la matrice et la masse rocheuse. Leurs propriétés physico-mécaniques sont une source capitale dans la compréhension de son comportement et ceux de la

masse rocheuse dont la complexité est avérée. Ces dernières ont une grande influence sur la stabilité des talus et des pentes.

I.3.1.1. Origine géologique

C'est la classification qui se base sur l'origine géologique : magmatique, sédimentaire et métamorphiques

I.3.1.2. Caractéristiques physiques

Les propriétés physiques, les plus importantes à déterminer sont : la masse volumique, la porosité, l'humidité et la dureté, la teneur en eau, module de Young, altérabilité, l'abrasivité ...

I.3.1.3. Caractéristiques mécaniques

Les propriétés mécaniques sont : la résistance à la compression uniaxiale ou triaxial, la résistance à la traction, la résistance au cisaillement (direct, simple et triaxial) pour déterminer l'angle de frottement interne et la cohésion,

I.3.2. Etude de discontinuités

Toute masse rocheuse, quelle-que soit son histoire et sa localisation, possède des discontinuités. Celles-ci peuvent être prononcées, invisibles, cimentées ou bien ouvertes, mais elles existent.

I.3.2.1. Typologies des discontinuités

En géologie les discontinuités sont regroupées par catégories :

- **Les diaclases** : ce sont des fractures de la roche, issues d'une rupture par compression, traction ou cisaillement liées aux mouvements tectoniques. Les deux parties de la roche qui se sont constituées n'ont cependant pas bougé ;
- **Les failles** : ce sont des fractures identiques aux diaclases mais qui ont entraîné un mouvement relatif des deux parties de la roche encaissante.
- **Les plans de stratification** : dans les roches sédimentaires, ce sont les joints séparant deux couches d'époques et de conditions de dépôt différentes.
- **La schistosité et la foliation** : dans les roches métamorphiques, la forte compression perturbe et transforme l'organisation des minéraux internes
- **Les fentes d'extension** : Elles sont formées sous l'effet d'une traction qu'a subi le massif au cours des mouvements tectoniques. Elles sont souvent remplies de cristallisation de calcite ou de quartz.

I.3.2.2. Paramètres géométriques des discontinuités

Beaucoup de discontinuités sont le résultat d'une ou plusieurs actions mécaniques que la masse rocheuse a subi au cours de son histoire tectonique. A chacune de ces actions, elle peut

associer une ou plusieurs familles de discontinuités. Les discontinuités sont toujours assimilées à des surfaces planes.

Généralement une discontinuité ou une famille de discontinuités est définie par les paramètres géométriques suivants :

- **Orientation** : la position du plan de discontinuité est décrite par son orientation dans l'espace muni d'un repère ayant un axe parallèle au nord magnétique. Elle est représentée par la direction de la ligne d'intersection du plan de discontinuité et du plan horizontal, et par le sens et l'angle de pendage de la ligne de plus grande pente. Il existe deux méthodes de mesure pour caractériser l'orientation d'une discontinuité : la méthode dite de la direction (0 à 180° et la méthode dite de l'azimut (0 à 360°). L'orientation peut être représentée graphiquement en utilisant la projection stéréographique
- **Nombre de familles de joints** : l'étude statistique à l'aide de la projection stéréographique fait apparaître généralement les familles de discontinuités qui existent dans la masse rocheuse. Parfois, il est cependant nécessaire de renoncer à représenter le système de discontinuités par un ensemble de familles directionnelles.
- **Persistance** : est l'extension spatiale d'une discontinuité sur l'affleurement.
- **Espacement** : est la distance moyenne perpendiculaire séparant deux joints d'une même famille
- **Fréquence** : est définie comme le nombre de joints par mètre linéaire.
- **Ouverture** : l'ouverture est l'espace qui sépare deux surfaces des joints. Elle est des fois remplie par différents matériaux.
- **Taille des blocs** : contrôlé par l'espacement et la fréquence des joints
- **Rugosité** : est la mesure des irrégularités et des ondulations de la surface du joint relativement à son plan moyen
- **Remplissage** : dans l'ouverture, c'est le matériau comblant le vide. Il peut être solide et résistant ou bien être un vrai lubrifiant.

I.3.3. Classification géomécanique des masses rocheuses

Afin d'avoir une caractérisation qualitative et quantitative des masses rocheuses fracturées lors les études de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet, surtout quand des informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ des masses rocheuses, ne sont pas disponibles, des systèmes empiriques de classifications géomécaniques ont été proposées et continuées à évoluer depuis plus d'un siècle.

La classification géomécanique consiste à quantifier la masse rocheuse par une note empirique décrivant sa qualité par une série de termes allant d'un très bon rocher à un rocher très médiocre.

Plusieurs systèmes empiriques ont été développés et utilisés en génie civil et minier pour caractériser les masses rocheuses fracturées, et ce, en se basant, en grande partie, sur la fracturation et le comportement mécanique, tels que : RQD, RMR, Q, GSI...etc.

I.3.3.1. Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deer et al. (1967) afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influence le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par les forages. Il est défini comme le rapport en pourcentage entre la somme des longueurs des parties intactes de plus de 100 mm et la longueur totale de carotte considérée

$$QD = \sum \frac{\text{Longueurs de carottes de long } \geq 10\text{cm}}{\text{Longueur du forage}} \times 100$$

La classification de la roche selon le paramètre RQD est donnée dans le tableau.1

Tableau.1. Classification de la qualité des roches selon le RQD

RQD [%]	Classes	Description de la fracturation
>90	I	Très bonne
90 à 75	II	Bonne
75 à 50	III	Moyenne
50 à 25	IV	Faible
< 25	V	Très faible

I.3.3.2. Le système RMR (Rock Masse Rating)

Le RMR a été développé par Bieniawski dans les années 1970. Il est basé sur l'expérience professionnelle de l'auteur dans des tunnels de faible profondeur pour des massifs sédimentaires (Bienawski, 1989). Depuis son apparition, le système initial a reçu de nombreuses modifications, par Bieniawski, 1974 ; 1976 ; 1979 et dernièrement en 1989. Donc l'utilisateur du système doit mentionner quelle version était utilisée.

Le RMR₈₉ c'est une note qui traduit la « qualité » du de la masse rocheuse. Il résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (d'A1 à A5) et d'une note d'ajustement (A6)

$$RMR_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

- A1 : Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte
- A2: RQD (Rock Quality Index)
- A3 : Espacement moyen des discontinuités
- A4 : Condition des discontinuités (ouverture, persistance, rugosité...)
- A5 : Les conditions hydrogéologiques du massif rocheux ;

- A6 : Ajustement : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

Afin de pouvoir classer la masse rocheuse déterminée à partir de la valeur du RMR, Bieniawski a présenté une classification comprend 5 groupes d'intervalle de 20 points par classe, dont la description rocheuse variant entre roches de très faible à très bonnes qualité (voir tableau.2).

Tableau.2. Classification de la masse rocheuse selon RMR

Classes	I	II	III	IV	V
RMR	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Description	Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

Le RMR permet aussi d'estimer des propriétés supplémentaires comme le temps de soutien moyen, cohésion et angle de friction du massif rocheux

I.3.3.3. Le système Q (NGI : Norwegian Geotechnical Institute)

Cette classification est introduite par Barton et al. en 1974 . Elle est développée pour prévoir le soutènement des excavations exécutées dans des terrains à contrainte horizontale élevée (Barton et al. 1974). La note finale du système Q est calculée comme suit

$$Q = \frac{RQD}{JN} \cdot \frac{Jr}{Ja} \cdot \frac{Jw}{SRF}$$

- RQD (Rock Quality Designation) caractérise la qualité des carottes de sondage.
- Jn (Joint set number) représente le nombre de familles de discontinuités.
- Jr (Joint roughness number) représente la rugosité des épontes de la famille de discontinuité la plus défavorable en termes d'orientation,
- Ja (Joint alteration number) caractérise l'état d'altération des discontinuités.
- Jw (Joint water réduction) est un facteur de réduction dû à la présence de l'eau dans les joints.
- SRF (Stress Reduction Factor) est un facteur de réduction des contraintes dans le massif

L'indice Q peut varier de 0.001 à 1000, dont la qualité la masse rocheuse est regroupée en 9 classes, où chaque classe correspond à une qualité de la masse rocheuse (Tableau.3)

Tableau.3. Qualité de la masse rocheuse selon le système Q.

Indice Q	Qualité de la masse rocheuse
400 – 1000	Exceptionnellement bonne
100 – 400	Extrêmement bonne
40 – 100	Très bonne
10 – 40	Bonne
4 – 10	Moyenne
1 – 4	Pauvre
0,1 – 1	Très pauvre
0,01 – 0,1	Extrêmement pauvre
,001 – 0,01	Exceptionnellement pauvre

I.3.3.4. Le système GSI (Géological Strength Index)

Ce système est par introduit par Hoek et al, en 1995, qui sert à estimer la réduction de résistance du massif rocheux en différentes conditions géologiques. Il est déterminé empiriquement à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. Donc il s'appuie sur une observation directe de la structure de la masse rocheuse in situ. Sa note est un nombre sans dimension, varie entre 5 et 95 (Tableau .4). Sa valeur sert à estimer également les paramètres de la masse rocheuse et l'utilisation du critère de résistance de Hoek & Brown. Dans le but de caractériser tous les types de la masse rocheuse, weak, flysch... etc, ce système a été modifié par plusieurs auteurs.

Tableau.4. Qualité de la masse rocheuse en fonction du système GSI

Classes	I	II	III	IV	V
GSI	95-76	56-75	55-41	40-21	< 20
Qualité de la masse rocheuse	Très bonne	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

I.4. Les types des instabilités des talus rocheux

Les instabilités des talus rocheux sont des manifestations du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles ou anthropiques (terrassment, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.).

Ils recouvrent des formes très diverses qui résultent de la multiplicité des mécanismes initiateurs (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique), eux-mêmes liés à la complexité des comportements géotechniques des matériaux sollicités et des conditions de gisement (structure géologique, géométrie des réseaux de fractures, caractéristiques des nappes aquifères, etc.) (Institut des Risques Majeurs, 2008).

Les mouvements de terrains les plus fréquents dans la nature sont :

I.2.1. Les glissements de terrain

Les glissements de terrain sont des mouvements, par la translation latérale, de masses compactes et/ou de terrain meuble glissant vers l'aval au niveau d'une surface de rupture nettement individualisée. Ils résultent d'une rupture par cisaillement et se produisent en général sur des talus ou des versants de pente modérée à raide. Ils sont produits le plus souvent lors des travaux de BTP.¹

I.2.2. Le Fluage

Les phénomènes de fluage correspondent à des mouvements lents dus à des sollicitations atteignant le domaine plastique donc proche de la rupture. L'état ultime peut être soit la stabilisation, soit la rupture (figure.2)

¹ BTP : bâtiment et travaux publics

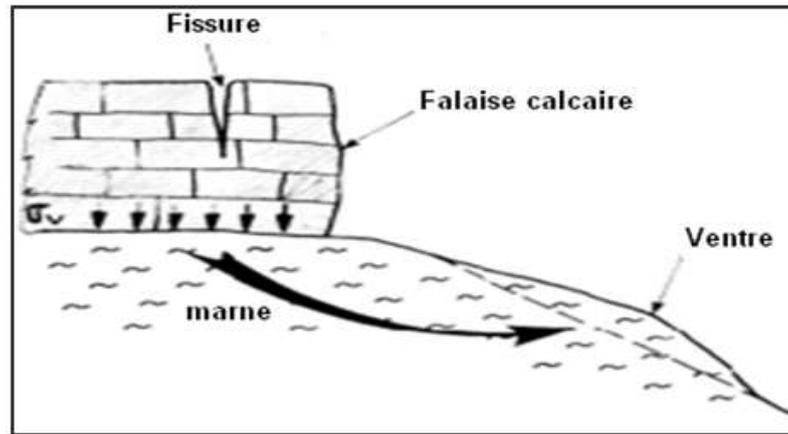


Figure.2. Fluage (Kabou et Merad, 2013)

I.2.3. La solifluxion

Les phénomènes de solifluxion représentent un cas particulier de fluage. C'est un phénomène superficiel provoqué par la variation volumique du sol au cours des saisons : gel et dégel en montagne, alternance de saisons sèches et pluvieuse. (figure.3). (Kabou et Merad , 2013).

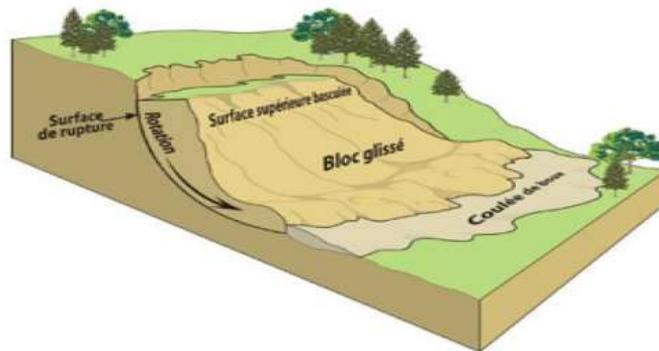


Figure.3. Solifluxion (Kabou et Merad, 2013).

I.2.4 Coulées boueuses

Elles sont dues à des infiltrations d'eau provoquant des mouvements de sols dans laquelle les matières glissées se comportent comme un liquide. Elles se produisent essentiellement en montagne.

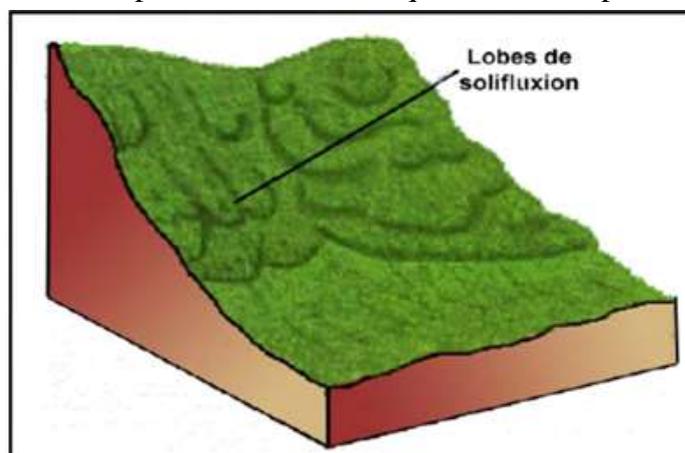


Figure.4. Coulée boueuse (Kabou et Merad, 2013).

I.2.5. Les éboulements et les écroulements

Eboulements et écroulement sont des phénomènes instantanés, rapides ou événementiels mobilisant des éléments rocheux plus ou moins homogènes, qui se déroulent en l'espace de quelques secondes à quelques minutes, avec peu de déformation préalable d'une pente abrupte jusqu'à une zone de dépôt sans que le mode de rupture correspondant ne soit déterminant (figure.5). La distinction entre éboulement et écroulement n'est pas toujours claire. Il peut se baser soit :

- Sur le volume : on parlera ainsi d'éboulement pour la chute d'une masse rocheuse à partir de 100 m³ jusqu'à 100'000 m³ au-delà, on parle d'écroulement.
- Sur la distance d'épandage peut également permettre de trancher entre éboulement et écroulement. Si cette distance d'épandage est importante par rapport à la hauteur de chute, on privilégiera la notion d'écroulement.

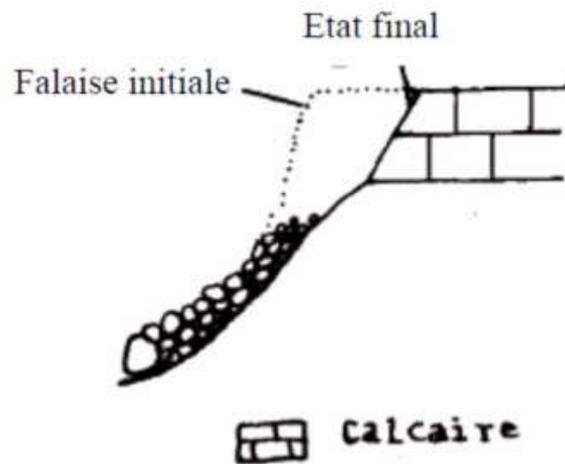


Figure.5. Modèle représentatif d'un écroulement (Kabou et Merad, 2013).

I.5. Les causes d'instabilités des talus rocheux

L'instabilité des talus rocheux, est reliée principalement à certains facteurs conditionnant et ceux déclenchants.

I.5.1. Les facteurs conditionnant

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

I.5.1.1. La lithologie

Elle représente un facteur conditionnant majeur dans la stabilité du versant aussi bien par, la nature des matériaux (qualité géotechnique des roches) que par la structure (direction et pendage des couches, plans de schistosité, etc..) ;

I.5.1.2. La pente

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

I.5.1.3. Le relief

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

I.5.1.4. La proximité du réseau de drainage

Elle est généralement liée au phénomène d'érosion hydrique parmi lesquels on trouve les sapements de berges. Ce phénomène se développe généralement dans les portions des cours d'eau où la vitesse d'écoulement est suffisamment puissante pour éroder la partie basale d'un versant.

I.5.1.5. L'activité tectonique récente à actuelle

Elle peut conditionner ou déclencher un mouvement de masse au niveau de la zone de broyage des failles (cisaillements et/ou décrochements) formée de matériaux fragilisés.

I.5.2 Les facteurs déclenchants

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

I.5.2.1. Les précipitations

Elles tiennent un rôle direct dans le déclenchement des mouvements de masse, par la diminution de la résistance au cisaillement et en rendant les terrains gorgés d'eau plus plastiques ; ce qui a pour conséquence directe le déplacement de la masse sous son propre poids.

I.5.2.2. La sismicité

Elle ne peut déclencher un mouvement de masse qu'à partir d'une magnitude critique d'activation de l'ordre de $M = 4$ (Guzzetti et al. 1999).

I.5.2.3. Les cours d'eaux et les résurgences :

Ils sont souvent responsables indirectement dans le déclenchement des mouvements de masse. En effet, leur action érosive (ravinement, érosion régressive, etc...) engendre souvent déstabilisation de versants. L'action de l'eau peut être aussi de nature chimique lorsqu'elle entraîne une altération des matériaux par différentes actions comme l'oxydoréduction, l'hydrolyse, l'hydratation, la dissolution, etc...

I.5.2.4. Le couvert végétal

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

I.6. Modes de ruptures des talus rocheux

Sur le plan géotechnique, une grande diversité de mécanismes de rupture des talus rocheux, qui sont identifiées selon :

- La nature de la matrice rocheuse et ses caractéristiques pétrographiques et mécaniques.
- Les discontinuités à toutes les échelles et de tous types affectant le massif.
- La variabilité dans l'espace du couple matrice rocheuse/discontinuités.

Généralement il existe trois mécanismes de ruptures :

I.6.1. Rupture plane

Cette rupture se produit suivant un plan le long d'une discontinuité géologique majeure, qui peut être une faille, : zone entre deux matériaux de nature différente, un plan de stratification ou une famille de fissures parallèle au talus et présentant une inclinaison défavorable dans le sens du talus (figure.6)

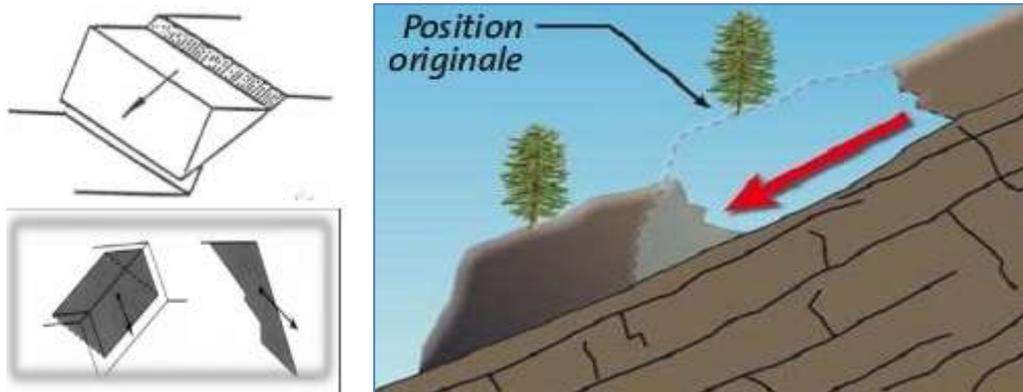


Figure.6. Rupture plane (Wylie,2018),

Parfois, la ligne de rupture suit une couche mince ayant de mauvaise caractéristique mécanique et sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée couche savon (Figure.6).

C'est l'un des modes de rupture le plus dangereux surtout lorsqu'il se produit le long d'une faille principale, dont des volumes de roche importants peuvent être déplacés dans ce cas.

I.6.2. Rupture circulaire ou rotationnelle

Cette rupture se produit dans un terrain homogène de faible résistance mécanique (faible cohésion). La masse rocheuse ne présentant pas de directions préférentielles de glissement, dont la rupture se fait par cisaillement du terrain le long d'une loupe de glissement (ligne circulaire).

Il existe deux types :

I.6.2.1. Ruptures rotationnelle simple

C'est le type de glissement le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple et être assimilée à une portion de cylindre ou à un cercle. Dans une telle rupture, on distingue : au sommet des fissures de traction et un escarpement, correspondant au départ de la surface de rupture, et à la base un bourrelet formé par des matières glissées (figure.7)

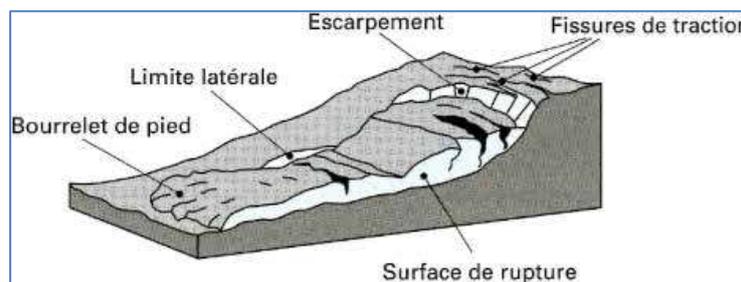


Figure.7. Rupture rotationnelle simple (Kabou et Merad, 2013).

Ce mode de rupture est également très dangereux. Lorsque les conditions de stabilité ne sont pas satisfaites, des volumes de roche très élevés peuvent être déplacés. Les roches favorables à ce mode de rupture sont celles homogènes peu compétentes ainsi que les roches résistantes mais dont le niveau de fracturation leur confère des caractéristiques mécaniques en masse très faibles

I.6.2.2. Rupture rotationnelle complexe

Ce type de rupture est rare. Il s'agit de glissements multiples emboîtés les uns dans les autres, dus souvent à la suppression de la butée provoquée par le glissement précédent, conduit à une perte de la butée pour les terres situées au-dessus, ce qui entraîne des glissements successifs remontant vers l'amont (figure.8)

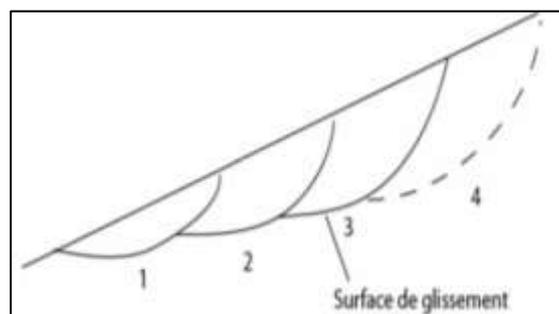


Figure.8. Glissement rotationnel complexe (Senade et Khelil, 2014),

I.6.3. Rupture en dièdres (wedge)

Cette rupture se produit lorsque le terrain est découpé par une fracturation principale caractérisée par plusieurs orientations. Conjuguées avec l'orientation du talus, les fissures forment des blocs qui se trouvent dégagés par les surfaces libres du talus (gradins, banquettes) et qui sous l'effet des forces mises en jeu se détachent et chutent (figure.9)

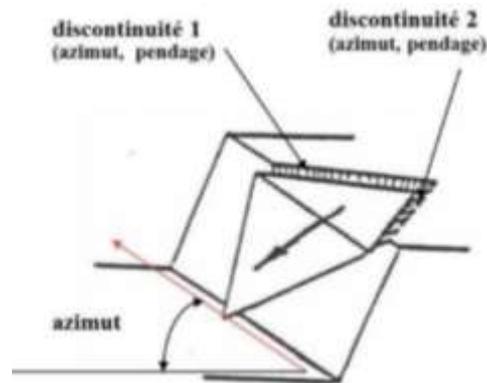


Figure.9. Rupture en dièdre (Wedge) (Wylie,2018),

I.6.4. Rupture par Toppling (basculement)

Ce mode de rupture est beaucoup plus rare que les 3 autres précédents. C'est une rupture bien marquée des bancs rocheux provoquant une sorte de fauchage de tête de bancs. Il ne se produit que dans des conditions spécifiques :

- De pendage des bancs : ils doivent être assez redressés),
- De pente du talus rocheux (assez raide)
- D'orientation relative : la stratification et le talus doivent avoir des directions voisines).

La rupture se produit par décollement des plaques et leur basculement. Une dégradation progressive des gradins pourrait conduire à l'instabilité du talus (figure.10)

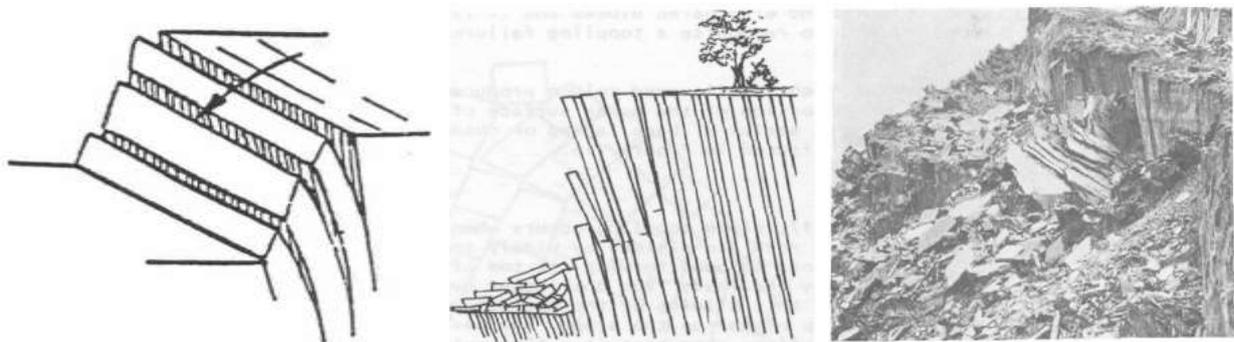


Figure.10. Rupture par Toppling (basculement) (Wylie,2018),

I.7. Approches utilisées dans les études de la stabilité des talus rocheux

Une masse rocheuse peut être représentée comme un agencement de blocs, de tailles et de géométrie variables, qui restent solidaires grâce aux ponts de matières qui existent entre ces différents éléments.

L'étude de stabilité des massifs rocheux nécessite d'avoir des connaissances relatives à la géologie structurale et à la mécanique des roches. Dans la littérature scientifique, il existe de nombreuses approches de calcul de stabilité des talus rocheux :

- Approche géométrique : analyse cinématique
- Approche empirique : basé sur les systèmes empiriques de classification
- Approche d'équilibre limite : méthode des tranches ou globales
- Approche numérique : méthodes des éléments finis

I.7.1. Approche d'état de limite d'équilibre

L'analyse courante de la stabilité, par cette approche, consiste à étudier les conditions d'équilibre de la masse de sol, délimitée par une surface de rupture et soumises aux efforts suivants : poids propre du massif, réactions du sol en place le long de la surface de rupture, pressions interstitielles, chargements extérieurs éventuels.

Le calcul de la stabilité des talus, en utilisant les conditions d'équilibre limite, est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé coefficient de sécurité F_s .

I.7.1.1. Notions de coefficient de sécurité : F_s

Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au cisaillement (glissement) aux forces de cisaillement provoquant le glissement (Delage, 1999).

$$F_s = \frac{\sum \text{moments des forces résistant au mouvement}}{\sum \text{moments des forces provoquant mouvement}}$$

En se référant aux valeurs du coefficient de sécurité on peut évaluer l'état de stabilité du talus comme le montre le tableau ci-après (Masekanya, 2008)

Tableau.5. Equilibre des talus en fonction des valeurs théoriques du F_s .

Coefficient de sécurité F_s	État de l'ouvrage
< 1	Danger
$F_s = 1$	Stabilité limite, douteuse
$1 < F_s < 1.4$	Sécurité contestable
$1.25 < F_s < 1.40$	Sécurité satisfaisante pour les ouvrages peu importants mais c'est une sécurité contestable pour les talus des carrières à ciel ouvert
$F_s > 1.4$	Sécurité satisfaisante

A l'issue des expériences une classification a été proposée par la société internationale de la mécanique des roches qui est la suivante :

- $F_s < 1$ talus instable
- $1 < F_s < 1.5$ glissement possible
- $F_s > 1.5$ généralement stable

I.7.1.2. Méthodes d'équilibre limite

Dans la littérature scientifique, il existe de nombreuses méthodes de calcul de stabilité des talus rocheux, basées sur l'approche d'équilibre limite, pour déterminer la surface critique d'une pente et le facteur de sécurité qui lui est associé. Toutes ces méthodes dites d'équilibre limite ont en commun la même difficulté qui est trouvée à la fois :

- La surface critique,
- Les contraintes normales et tangentielles le long de cette surface,
- Le facteur de sécurité (sur le critère de rupture) en partant des équations d'équilibre.

Les méthodes d'équilibre limite peuvent être classées en deux groupes :

- **Les méthodes des tranches** : dans lesquelles le massif de terrain est décomposé en tranches, surtout utilisée pour les terrains hétérogènes
- **Les méthodes globales** : dans lesquelles on considère de façon globale les équations d'équilibre au lieu de les vérifier au niveau de chaque tranche, surtout utilisées pour les terrains homogènes

I.7.1.2.1. Méthodes des tranches

Cette méthode consiste à découper le volume de terrain en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux. Elle considère que les forces qui tendent à retenir un certain volume de terrain, délimité par les forces libres du talus et une surface de rupture potentielle, et celles qui tendent à la mettre en mouvement. (figure.11)

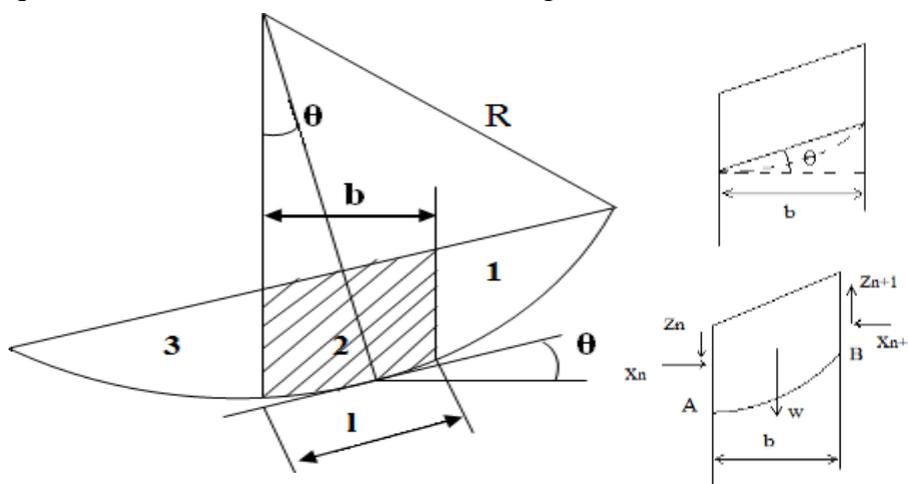


Figure.11. Méthode des tranches. (Bendadouche et lazizi, 2013).

Il existe plusieurs méthodes de tranches

- 1) **Méthode de Fellenius ou méthode ordinaire des tranches (Fellenius, 1927)** : méthode des tranches basée sur une rupture circulaire. Cette méthode ne satisfait que l'équilibre des moments. Par ailleurs les forces inter-tranches sont supposées égales ou opposées.
- 2) **Méthode de Bishop (Bishop, 1955)** : Méthode des tranches basée comme la précédente sur une rupture circulaire. Dans sa version simplifiée, elle ne satisfait que l'équilibre des moments, la composante verticale des forces inter-tranche est négligée. La version modifiée ne tient compte que des forces intertranches horizontales.
- 3) **Méthode de Janbu (1965)** : méthode des tranches permettant de traiter une ligne de rupture de forme quelconque. Elle ne satisfait cependant que l'équilibre des forces.
- d) **Méthode de Morgenstern et Price (Morgenstern – Price 1965)** : Aussi satisfaisante à la fois les forces et les moments et suppose une fonction des forces inter-tranches

I.7.1.2.2. Méthode globale

Cette méthode suppose le milieu homogène et isotrope défini par γ , ϕ , c et u si il y'a présence d'une nappe aquifère, en admettant dans ce calcul que le massif est en équilibre limite et il est considéré comme un solide indéformable. L'hypothèse consiste à assimiler la ligne de glissement MA à un arc de cercle de centre O (figure.12)

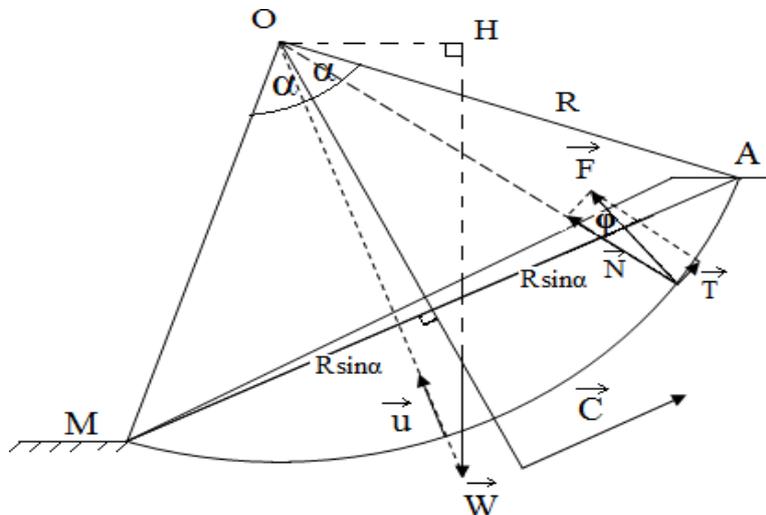


Figure.12. Méthode globale. (Zeghar et Smahi, 2015).

Parmi les méthodes de stabilité globale, on cite :

- 1) **Méthode des perturbations (Raulin et al. (1974))** : est une méthode de vérification de la stabilité des talus en rupture circulaire ou non. Il s'agit de la seule méthode permettant de vérifier la stabilité par l'utilisation des trois équations de base des statistiques permettant de résoudre complètement l'équilibre (équilibre horizontal, vertical et celui des moments).

2) Méthodes graphiques : le principe de ces méthodes consiste en l'estimation de facteur de sécurité en fonction de plusieurs paramètres : la hauteur de gradin (H_g) et l'angle d'inclinaison (α) qui représentent les paramètres de talus ; le poids volumique (γ), la cohésion (C) et l'angle de frottement interne (ϕ) qui représentent les paramètres de matériau à étudier. Plusieurs auteurs ont proposé leurs propres abaques, on distingue : l'abaque de Hoek, de Fellinius, de Bishop-Morgenstern (1960) et de Morgenstern (1963) (M'zoughem ; Chenafa, 2006)

3) Taylor (1937), puis Caquot (1954) ont développé une méthode graphique permettant le calcul de ruptures circulaires dans un talus homogène cohérent et frottant, appelée méthode du cercle de frottement.

4) Méthode de Bell (1969) : Bell propose de prendre une fonction de répartition de la contrainte normale le long de la courbe de rupture.

I.7.2. Approche géométrique : analyse cinématique

L'analyse cinématique c'est méthode géométrique basée sur la relation entre la direction et la pente du talus et la direction et le pendage des familles des discontinuités. Elle effectuée par l'utilisation les principes de la projection sténographique des orientations des discontinuités (Wylie, 2018).

Une fois que les données de mesures d'orientation des joints et du talus ont été projetées sur le stéréogramme, il est facile d'identifier les conditions de stabilité du talus (figure.13) :

- La direction de glissement du bloc de la roche
- Le type de la rupture active du talus : Plane, wedge et Toppling
- La potentialité de la rupture du talus

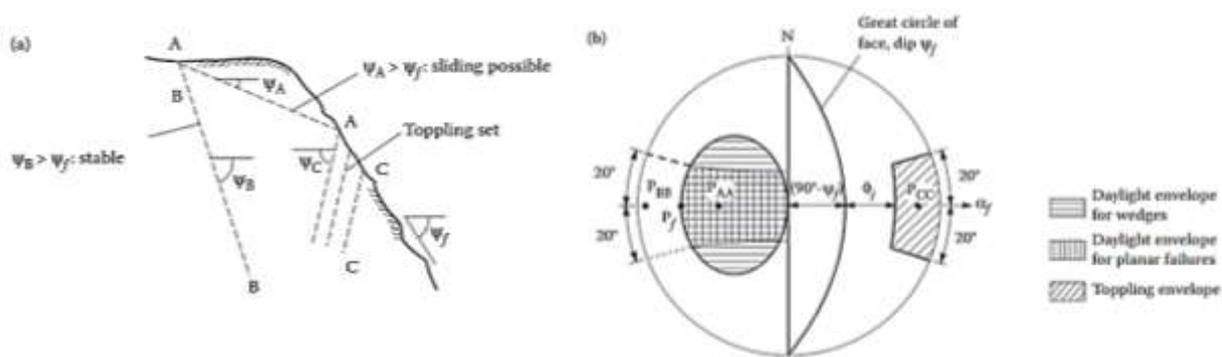


Figure.13. Analyse cinématique des blocs rocheux dans un talus (Wylie, 2018).

(a) familles des discontinuités dans un talus, (b) l'enveloppes de daylight sur le stéréogramme de Schmidt (equal area)

L'identification des modes de ruptures des blocs dans les talus rocheux sont données dans la figure suivant :

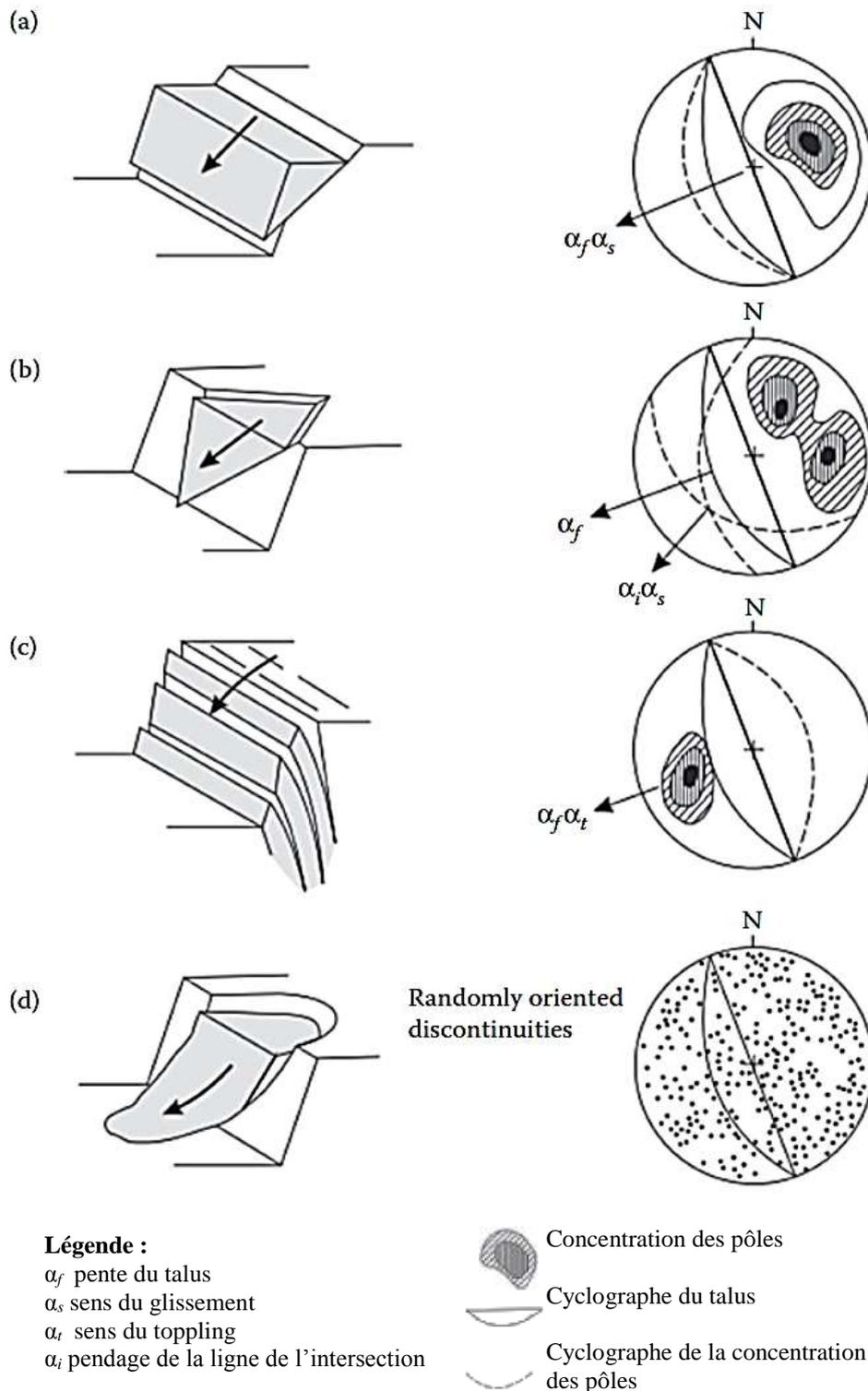


Figure.14. Les principaux types de ruptures des blocs dans les talus et le stéréogramme correspondant (Wylie, 2018).

(a) : rupture plane, (b) rupture wedge (dièdre), (c) rupture par toppling, (d) rupture circulaire.

I.7.3. Approche empirique

Dans les projets de génie civil, il est pratiquement difficile d'évaluer la stabilité des talus rocheux en utilisant des approches analytiques telles que la cinématique, l'équilibre limite ou la modélisation FEM / DEM, car les excavations sont trop rapides et la stabilité des talus rocheux est contrôlée principalement par les discontinuités, les caractéristiques de la roche intacte et la qualité de la masse rocheuse formant le talus.

Pour cela des systèmes de classification géomécanique, ont été créés et conçus pour les études de la stabilité des talus rocheux, dont certains d'eux sont proposés à l'origine pour évaluer la qualité de la masse rocheuse, puis ils ont adopté ultérieurement pour les études de stabilité Parmi les systèmes utilisés pour les études de stabilités, il y a :

- Le système SMR (Slope Mass Rating) (Romana, 1985 ; Romana, 1993)
- Modifie Slope Mass Rating (MSMR) (Anbalagan et al., 1992),
- Slope Stabilité Probabilité Classification (SSPC)

Les principaux buts de l'utilisation de ces systèmes sont :

- Estimation indirectement les propriétés mécaniques à l'échelle de de la masse rocheuse tels que : le module de déformation, la résistance à la compression simple, C , ϕ
- Estimation du temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand-up time). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation.
- Donner des recommandations de soutènement des ouvrages

I.7.4. Approche numérique

L'utilisation de l'approche numérique dans les calculs de stabilité est indispensable pour obtenir des résultats applicables dans le réel. Cependant, les mécanismes et les équations mis en jeu sont relativement simples et font appel à des lois élémentaires de la mécanique des sols.

Le développement des méthodes de calcul numérique (méthode des différences finies et méthode des éléments finies) a permis de chercher des solutions beaucoup plus réalistes et générales, fondées sur un certain nombre de modèles rhéologiques et d'algorithmes de résolution des divers aspects du comportement des sols (Espie, 1996).

La méthode numérique la plus utilisée est celle des éléments finis qui consiste à remplacer la structure physique à étudier par un nombre fini de composants discrets ou d'éléments, lié entre eux par des nœuds, qui représente un maillage. Cette dernière permet d'accrocher le problème de mieux en mieux mais même quand celles-ci sont utilisées, le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture est encore déterminé le plus souvent par une méthode d'équilibre limite qui permet de tenir compte de l'hétérogénéité et de la variabilité de la résistance au cisaillement (Espie, 1996).

I.7.5. Calcul automatique à l'aide d'ordinateur

Le calcul de stabilité qui a pour but d'évaluer la valeur minimale du coefficient de sécurité FS et de repérer la surface de glissement la plus probable ne peut s'effectuer manuellement en testant plusieurs centaines de cercles de rupture. À cet effet, des logiciels ont été conçus pour effectuer cet énorme travail avec une grande précision, en un temps record et à moindre coût. De nombreux logiciels de calcul de stabilité des pentes sont existés sur le marché, tels que : Talren – Plaxis – Geostudio – Geoslope – Slide – Clara – Flac – Petal, Geo5 ...

I.8. Méthodes de confortement des talus rocheux

Différentes techniques sont utilisées pour augmenter la stabilité des talus rocheux, parmi lesquelles il existe :

I.8.1. Tirants d'ancrage

Cette technique a pour but de réduire les forces actives du glissement et augmenter les contraintes normales à la surface de rupture, pour cela on utilise des câbles d'acier (Multitorons) dans le terrain stable situé sous la surface de rupture, puis on applique on tête un effort de traction. Ce dernier peut être réparti sur la surface de terrain par l'intermédiaire de plaques ou de petits massifs en béton armé. Généralement les tirants sont combinés à un mur ou à des longrines (Sève et Pouget, 1998)

I.8.2. Clous

La stabilisation par clouage consiste à transférer les efforts stabilisateurs vers la partie stable du sol par un mécanisme d'accrochage. Une masse solidaire est importante du sol est créée assurant ainsi la stabilité du massif. Deux types de clouage existent, le clouage passif où la présence seule du clou assure le transfert des efforts, et le clouage actif où le clou est préalablement mis en tension. La mise en place des inclusions est en général préalable au creusement. (RPA 99).

I.8.3. Les micropieux

Les pieux forés sont réalisés par le creusement d'un trou dans lequel on introduit une cage d'armature que l'on remplit de béton, et s'il existe un risque d'éboulement on utilise les pieux forés tubés, ou on utilise la bentonite pour maintenir la paroi du forage. On augmente ainsi la cohésion du sol en place. (Sève et Pouget, 1998)

I.8.4. Le boulonnage

Cette technique a pour objet de retenir en place des blocs rocheux. L'influence de celle-ci ne s'étend que sur quelques mètres en profondeur.

I.8.5. L'aplatissement des talus

Cette technique consiste à diminuer le poids du massif rocheux qui a tendance à se glisser par le reprofilage du talus.

I.8.6. L'injection

Elle consiste à augmenter les caractéristiques de cisaillement par introduction dans les joints d'un coulis d'injection.

I.8.7. Le drainage

Les pressions peuvent être responsables de la diminution de F_s , le drainage peut dans ce cas être utilisé, surtout si la perméabilité des discontinuités est suffisante. Les drains peuvent être mis en place à partir du talus ou à partir d'une galerie de drainage.

I.9. Conclusion

La spécificité du risque, que représentent les glissements des talus rocheux est liée directement, à la diversité des paramètres qui le définissent : la géologie, la matrice rocheuse, les discontinuités, la géométrie et l'hydrogéologie. Le risque pourra être de divers ordres : écroulement, glissement plan...etc.

L'étude de stabilité des talus rocheux est une opération complexe et délicate, et peut se faire par plusieurs approches : analytiques (équilibre limite), géométriques et empiriques, dont plusieurs méthodes ont été proposées par différents auteurs, afin de définir un facteur de sécurité pour apprécier la marge de sécurité du versant rocheux vis-à-vis de la rupture et d'identifier le mode de rupture et la zone instable

De nombreuses techniques de confortements des talus rocheux ont été développées, mais elles doivent être optées selon les modes des ruptures et adaptées aux conditions du site.

II.1. Introduction

En Algérie la chaîne Alpine s'étend linéairement d'Ouest en Est le long du littoral méditerranéen. Cette dernière, constitue l'un des segments de la grande chaîne des Maghrébides qui s'étale sur plus de deux mille kilomètres (2000 Km), allant de Gibraltar à la Calabre (Villa, 1971).

II.2. Les grands ensembles géologiques de la marge Nord Algérienne

En Algérie, le massif de la petite Kabylie dont fait partie la région étudiée occupe une position septentrionale dans le domaine interne de la chaîne Alpine (Wildi, 1983). Il s'étend sur plus de 150 Km, le long du littoral Algérien. Il est limité à l'Ouest par la chaîne des Babors, et l'Est par le massif de l'Edough, avec une extension Nord-Sud sur plus de 50Km. Du point de vue structural, la marge Nord Algérienne est constituée par un empilement de nappes charriées sur la marge Africaine (Raoult, 1972 ; Bouillin 1977 ; Vila, 1980). Transversalement on y distingue de l'intérieur vers l'extérieur de la chaîne (figure.15).

- Le domaine Kabyle ; domaine interne
- Le domaine des flyschs.
- Le domaine tellien et de l'avant pays

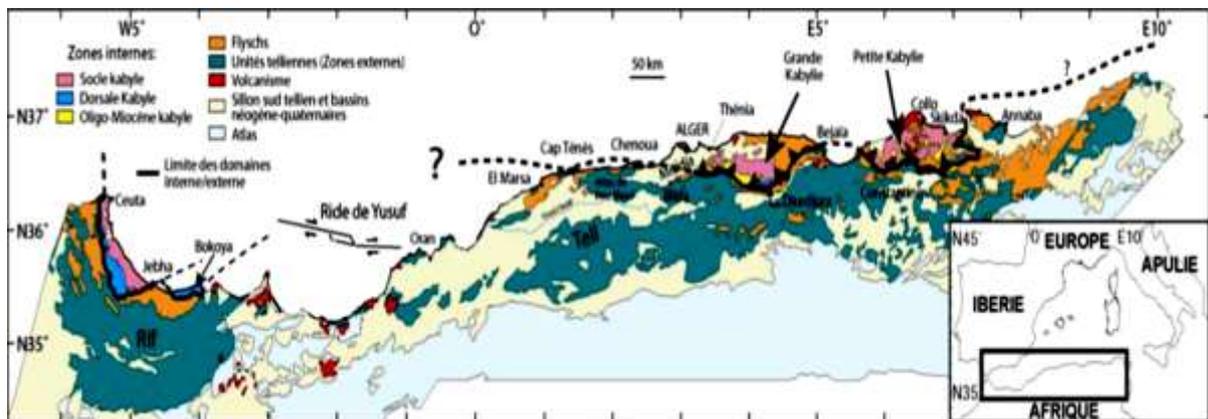


Figure.15. Position des différentes unités géologiques des Maghrébides (Domzig et al., 2006)

II.2.1. Le domaine interne

Il comporte le socle kabyle et sa couverture sédimentaire

II.2.1.1. Socle Kabyle

Les unités du domaine interne affleurent en Grande et en Petite Kabylie et dans les pointements côtiers des massifs d'Alger, du Chenoua et de Ténès

Le socle kabyle est constitué par des formations cristallophylliennes Anté-triasiques charriées vers le sud sur les terrains Mésozoïques et Paléogènes (Durand Delga, 1955 ; Bouillin, 1977).

Les formations cristallophylliennes du socle Kabyle comportent deux grands ensembles :

- Un ensemble supérieur formé essentiellement de schistes, de micaschistes et de phyllades surmontés en discordance par des formations Siluriennes (Durand Delga, 1955).
- Un ensemble inférieur constitué de gneiss à intercalation de marbres et d'amphibolites (Bouillin, 1977).

II.2.1.1. Les formations de la couverture sédimentaire du socle

Elle est représentée par la dorsale kabyle, les formations de L'OMK et les oligostromes

II.2.1.1.1. La dorsale kabyle (chaîne calcaire)

La dorsale Kabyle marque la limite entre le socle Kabyle au Nord et les zones telliennes plus externes au Sud. Elle occupe les extrémités méridionales du socle Kabyle, et montre des termes allant du Permo-Trias à l'Eocène. Les séries qu'elle présente permettent de la subdiviser en trois sous unités qui sont du Nord au Sud (Durand Delga, 1969, Raoult, 1974, Villa, 1980 et Lahondère, 1987) :

a- La dorsale interne

Elle comporte des séries allant du Permo-Trias au Néocomien. Ces séries sont représentées par des calcaires néritiques massifs riches en microfaune benthiques (Algues et Foraminifères) qui atteignent le sommet du lutétien (Raoult 1969, 1974).

b- La dorsale médiane

Elle est caractérisée surtout par la constance des dépôts marneux à microfaunes pélagiques du Turonien au Lutétien inférieur, et par une lacune des termes du Crétacé moyen.

c- La dorsale externe

Elle est caractérisée par des séries détritiques peu épaisses et lacuneuses. Elle comporte des calcaires silicatés, surmontés par des conglomérats du Campanien qui les recouvrent en discordance. Ces derniers soulignent une intense érosion Sénonienne. Les dépôts de la dorsale externe s'étalent jusqu'au Lutétien. La dorsale externe repose en contact anormal sur les flyschs (Bouillin 1970).

II.2.1.1.2. Les formations de l'Oligo-Miocène Kabyle

L'O.M. K c'est une formation détritique, constitue la couverture sédimentaire, transgressive et discordante du socle Kabyle (Raoult, 1974 ; Bouillin, 1977). Elle comporte trois termes (Bouillin, 1977) :

- Un terme de base formé de conglomérats reposant en discordance sur le socle kabyle
- Un terme médian comporte des grés micacés à débris de socle associés à des pelites micacés
- Un terme de sommital formé de silixites

II.2.1.1.3. Olistostromes

Ce sont des formations tectono-sédimentaires synchro nappes de blocs et klippes de flysch dans des passées de grés-micacées. L'âge de ces formations est supposé Aquitanien à Burdigalien inférieur probable (Bouillin et Raoult, 1971 ; Bouillin et Al, 1973 et Bouillin, 1977).

II.2.1.1.4. Nummulitique

Formations grés-micacées d'âge Priabonien (Eocène supérieur) à Oligocène supérieur, qui constitue la couverture de la chaîne calcaire (dorsale Kabyle) et du flysch maurétanien. (Bouillin, 1977 ; Raoult 1979).

II.2.2. Le domaine des flyschs

Le domaine paléogéographique des flyschs est un large sillon qui a reçu des sédiments flyschoides principalement au Crétacé inférieur. Sur la base de leurs faciès, ils ont divisé transversalement ce sillon en deux zones, une zone septentrionale relativement interne ayant reçu un flysch de type Maurétanien (Gélard, 1969) et une zone méridionale, relativement externe ayant reçu un flysch de type Massylien (Raoult, 1969).

Un troisième type de flysch, le "flysch Numidien", est généralement distingué. Il s'agit de sédiments gréseux et argileux d'âge Oligo-Miocène qui se sont déposés dans une gouttière, qui est considérée, en général, comme plus externe que le sillon des flyschs (Wildi, 1983).

II.2.2.1. Le flysch Maurétanien

Le flysch maurétanien montre dans ses séries médianes les plus typiques, de bas en haut :

- Un complexe de base flyschoides à petits bancs de micrites du Néocomien ;
- Un puissant ensemble (300 m) à grés fins homométrique, à cassure verdâtre (flysch de Guerrouch) attribué à l'Albo-Aptien (Bouillin, 1970).
- Des phtanites rouges et blanches du Cénomaniens supérieur (Djellit, 1989).
- Des micros brèches à ciment spathique du Sénonien.
- Au sommet des conglomérats et des grés micacés Tertiaires (Eocène à Oligocène).

II.2.2. 2. Le flysch Massylien

Il a été défini par Raoult (1969) au Kef Sidi Driss, dans le nord constantinois pour caractériser les formations détritiques schisto-quartzitiques.

II.2.2.3. Le flysch Numidien

Dans l'édifice structural de la Petite Kabylie, le flysch numidien occupe la position la plus haute de l'édifice Alpin.

II.2.3. Domaine externe : « Le sillon Tellien »

Le domaine externe représenté dans le Nord Est de l'Algérie par les séries telliennes, les séries de l'avant pays allochtone et séries de l'avant pays atlasique autochtone (Chadi M .2004).

II.2.3.1. Les séries Telliennes

Les séries telliennes sont constituées par un empilement de trois grandes séries qui sont d'après Villa, 1980 du Nord au Sud :

a) Une série ultra-tellienne ou un domaine septentrional

C'est le domaine où se déposent des marno-calcaires de teintes claires renferment de riches microfaunes.

b) Une série méso-tellienne ou Domaine central

Ce domaine centralo-tellien est situé entre la zone ultra-tellienne et les régions telliennes externes (zone pénitellienne et néritique

Cette série correspond aux formations carbonatées du Jurassique, elle est considérée comme la couverture de la plate-forme constantinoise (Vila, 1980).

c) Domaine méridional

Il regroupe les formations pénitelliennes et le domaine néritique et sa couverture.

II.2.3. 2. Les séries de l'Avant pays

On peut considérer, successivement d'Est en Ouest les unités et domaines suivants :

a) Unité néritique Constantinoise

Les séries néritiques Constantinoises forment des massifs isolés, de tailles variables. Elles sont caractérisées principalement par des formations carbonatées, du Mésozoïque

b) Unités Sud sétifiennes

Ces unités considérées ont été décrites par Vila (1980) sous l'appellation « ensemble allochtone sud-sétifien ».

c) Unités des Sellaoua

Elles affleurent au Sud-est des massifs composant l'unité néritique constantinoise et comprennent essentiellement des terrains marno-calcaires créacés avec un léger apport détritiques dans le Crétacé supérieur ;

II.2.3.3. Les séries de l'avant pays autochtone

Elles sont caractérisées par les séries sédimentaires mésozoïques épaisses, très plissées, localisées au niveau de l'Atlas tunisien, l'Atlas saharien, les monts du Hodna, les monts de Batna et les monts des Aurès (Guiraud ; 1973).

II.2.4. Les formations post-nappes

Elles sont constituées par les dépôts marins et continentaux. Dans la partie nord de la petite kabyle, ces formations comportent deux cycles sédimentaires (Bouillin, 1977,) :

- Un premier cycle est constitué par des marnes grises ou bleues, du Miocène supérieur, à rare passées calcareuses discontinues et plus ou moins arrondies transgressives. La série marneuse repose en discordance à la fois sur le socle Kabyle et à l'OMK (Djellit, 1987).
- Un deuxième cycle, constituées essentiellement par des conglomérats d'une épaisseur d'environ 30 à 50 mètres reposent directement sur les marnes du Miocène supérieur. Ces conglomérats comportent des blocs anguleux, de galet, de gravier, et de sable de taille variable et mal classés dans une matrice argileuse, empruntées en totalité soit au socle kabyle, soit aux unités à matériel flysch. (Djellit, 1987). Ces formations à éléments polygéniques et hétérométriques. C'est la limite normale entre les dépôts continentaux (Pliocène), et les dépôts marins (les marnes du Miocène supérieur).

II.2.5. Les roches magmatiques

Les roches magmatiques de la Petite Kabylie sont principalement représentées par :

- Des roches basiques et ultrabasiques (péridotites, gabbros, diorites, microdiorites et dolorites) de Texenna et du Cap Bougaroun.
- Des roches volcaniques (rhyolites, trachytes, andésites, dacites, rhyodacites, pyroclastites) dans la région de Cavallo, Cap de fer, et Collo.
- Des roches granitiques (granites, microgranites, et grano-diorites) dans la région d'El-Milia, et Collo. Ces roches granitiques résultant d'un épisode magmatique miocène sont une particularité de la partie orientale de la Petite Kabylie (Roubaut, 1934 ; Robin, 1970 ; Semroud, 1971 ; Fougnot, 1990 ; Ouabadi, 1994).

II.2.6. Les formations du quaternaire

Elles sont représentées par des alluvions récentes et des alluvions actuelles (Djellit, 1987) :

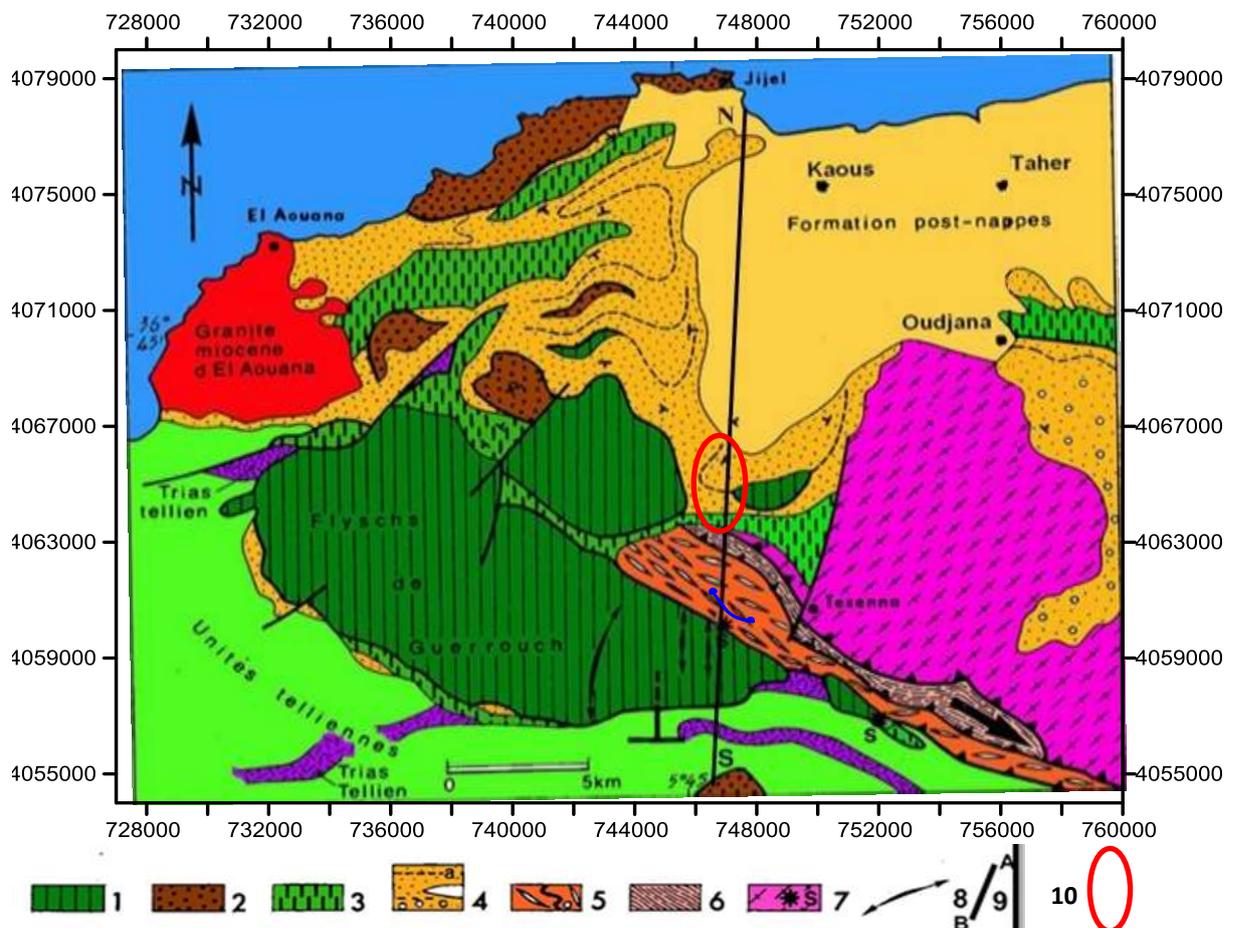
- Les alluvions récentes sont grossières et constituent les terrasses anciennes des vallées
- Les alluvions actuelles sont composées d'éboulis et de brèches non consolidées

II.3. Géologie locale

Les talus rocheux, objet de notre étude, sont situés sur le tracé de la pénétrante Djendjen-El-Eulma qui compris entre le PK 18 et le PK 24, selon les conditions de l'accessibilité et la disponibilité des données six sites ont été choisis.

L'étude bibliographique et nos sorties sur terrain nous a permis de trouver que le tronçon du tracé de la pénétrante, Dejen-Djen El-Eulma (Fig.16)

- Au nord (TR 01 et TR 02), tronçon compris entre du PK 18 jusqu'à le PK 22 est occupé par le flysch Numidien
- Au Sud (TR03, TR04, TR05 et TR06), tronçon compris entre le Pk 22 et le Pk 24 est occupé par les formations du flysch Massylien, plus précisément par le terme schisteux gréseux d'albo-Aptien, qui est composés par des alternances argilites avec des bancs fins de grès quartzitiques.



Légende :

- Unité supra-kabyle :** 1-nappe de Guerrouch ; 2-numidien ; 3-unité du flysch dissocié ; 4-Oligo-miocène kabyle (a, stratification ; b, olistolite majeur).
- Unités infra-kabyle :** 5-unité du Flysch schisto-gréseux (a, Cénomano-Turonien) ; 6-unité volcano-sédimentaire (la flèche dans cette unité indique la direction de cisaillement) ; 7-socle kabyle (S, copeaux de socle à la base des unités supra-kabyles) ; 8-plis N-S dans la nappe de Guerrouch ; 9-coupe géologique AB. 10 : zone d'étude

Figure.16. Esquisse géologique de l'extrémité de la Petite Kabylie

(Djellit et Anderieux, 1987)

Le flysch Massylien comporte une série allant du Néocomien au Lutétien terminal et regroupe trois ensembles qui sont du bas en haut (Djellit, 1987) (figure.17)

- Des calcaires sableux et des argiles du Néocomien sur 10 m environ ;
- Un flysch pélito-quartzitique où dominent les couleurs vertes : c'est un flysch "albo –Aptien "pouvant atteindre 300 m d'épaisseur. Il est surmonté par des calcaires fins jaunâtres
- Des marnes et calcaires fins du Vraconien épais de quelques mètres ;
- Des microbrèches et des conglomérats du Sénonien inférieur et moyen auxquels sont associées des phanites noires et blanches d'âge Cénomaniens (Raoult, 1974)
- Un ensemble flyscholite marno- microbréchique du Sénonien qui peut dépasser 200 m d'épaisseur.

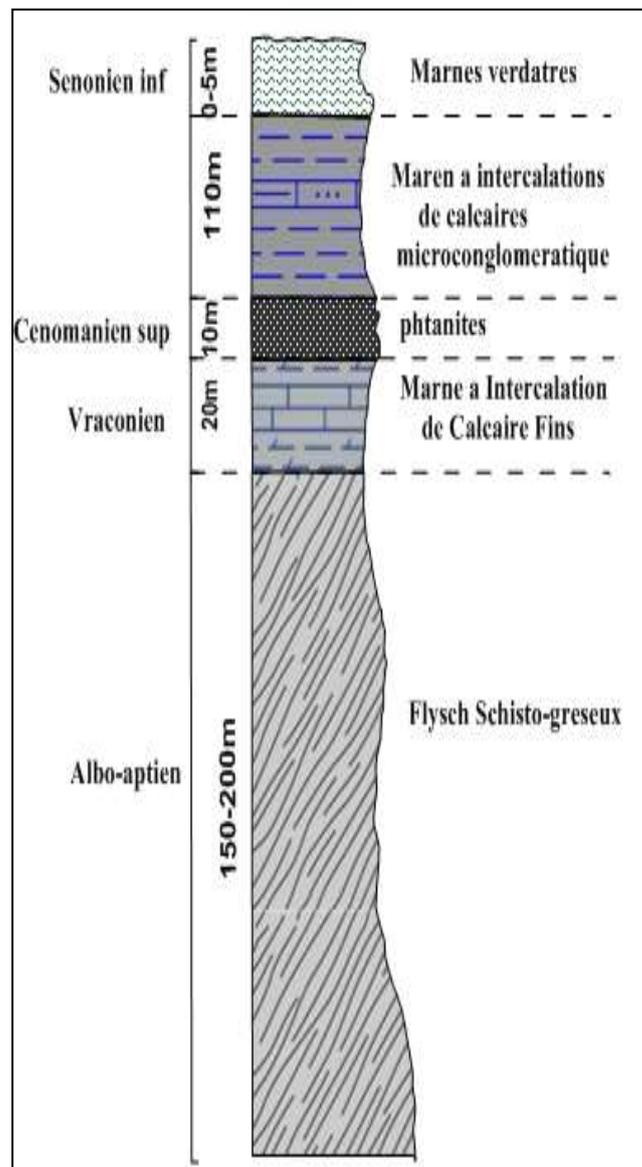


Figure.17. Colonne lithostratigraphique flysch massylien (Djellit, 1987)

Le flysch Numidien composé de trois termes qui sont en continuité stratigraphique (Djellit,1987) (fig.18) :

- Un terme de base comporte des argiles sous numidiennes Des argiles varicolores à "Tubotomaculum dits "sous- numidiennes " d'âge Oligocène moyen à supérieur.
- Un terme médian comporte des bancs épais de grès numidiens (jusqu'à 200 m), caractérisés par des à grains hétérométriques (jusqu'à 3 cm) à dragées de quartz datés Aquitanien à Burdigalien inférieur.
- Un terme supérieur comporte les argiles, les marnes claires et silexites dites supra-numidiennes d'âge Burdigalie inférieur (Lahondère et al. ; 1979).

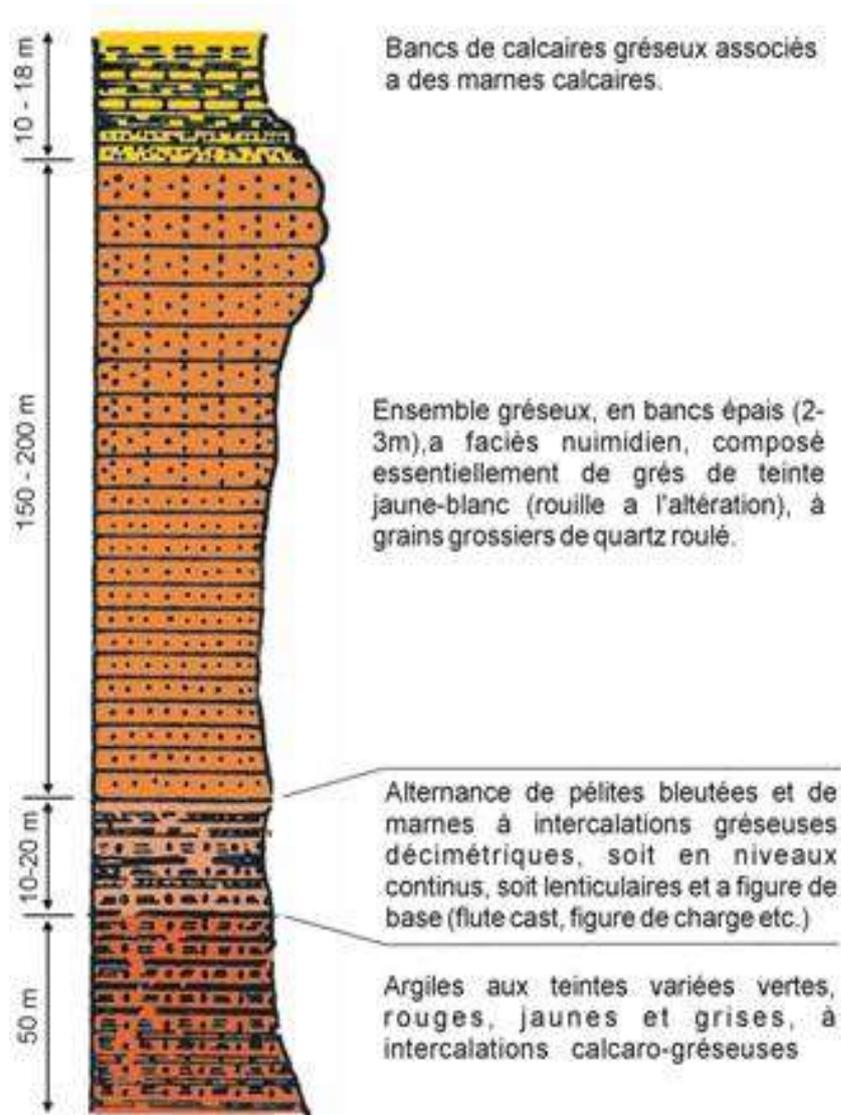


Figure.18. Colonne lithologique du flysch Numidien (Djellit, 1987)

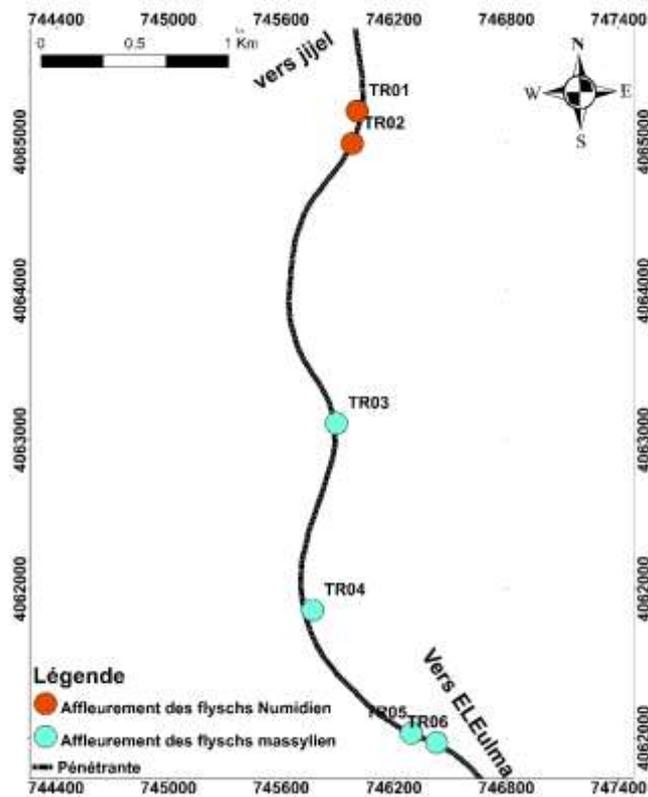


Figure.19. Nature géologique des talus rocheux étudiés

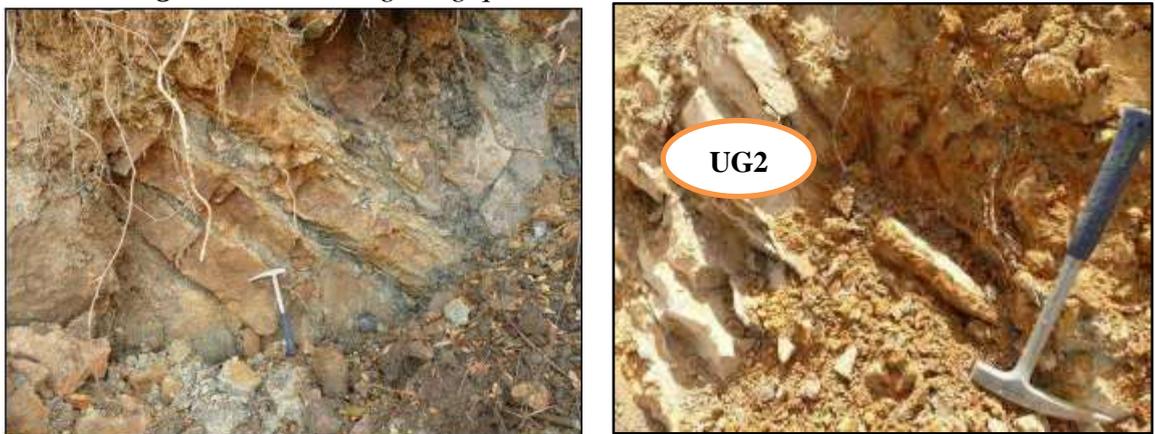


Figure.20. Photos de grés Numidien, prises au niveau des deux sites TR01 et TR02

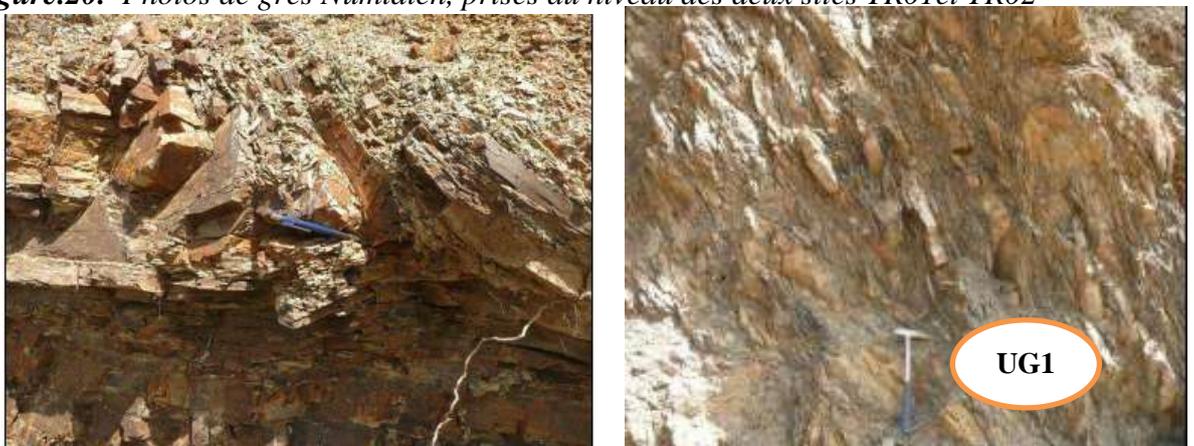


Figure.21. Photos de flysch massyllen, prises au niveau du tronçon du tracé de la pénétrante compris entre le PK 22 et le PK 24

II.4. Aspect structural et sismique

La structuration géologique du massif de la Petite Kabylie est le résultat de plusieurs phases tectoniques :

II.4.1. Tectonique anté-Oligocène

La tectonique anté-Oligocène est particulièrement caractérisée par de grands accidents cassants d'ampleur régionale et de direction variée : Nord-Sud, Est-Ouest, Nord-Est/Sud-Ouest, et Nord-Ouest/Sud-Est.

II.4.2. Tectonique Miocène

Cette phase tectonique s'est manifestée par des plissements, des charriages, et une reprise des rejeux de failles qui ont surtout rejouées en failles décrochantes.

Au Néogène, la tectonique est marquée par le retrait de la mer de la plus grande partie des terres émergées. Les invasions marines ne vont atteindre que des aires limitées, notamment les dépressions côtières (bassin de Jijel, bassin d'Oued Zhor, El-Milia, et le bassin de Collo) où vont se déposer les marnes blues du Miocène terminal.

Les zones montagneuses immergées ont subi une intense érosion et modelage qui leur ont donnée l'aspect actuel.

II.4.3. Analyse sismo-tectonique

La région de Jijel est située dans une zone sismique classée comme région pouvant subir des secousses supérieures à l'intensité 8 (figure.21)

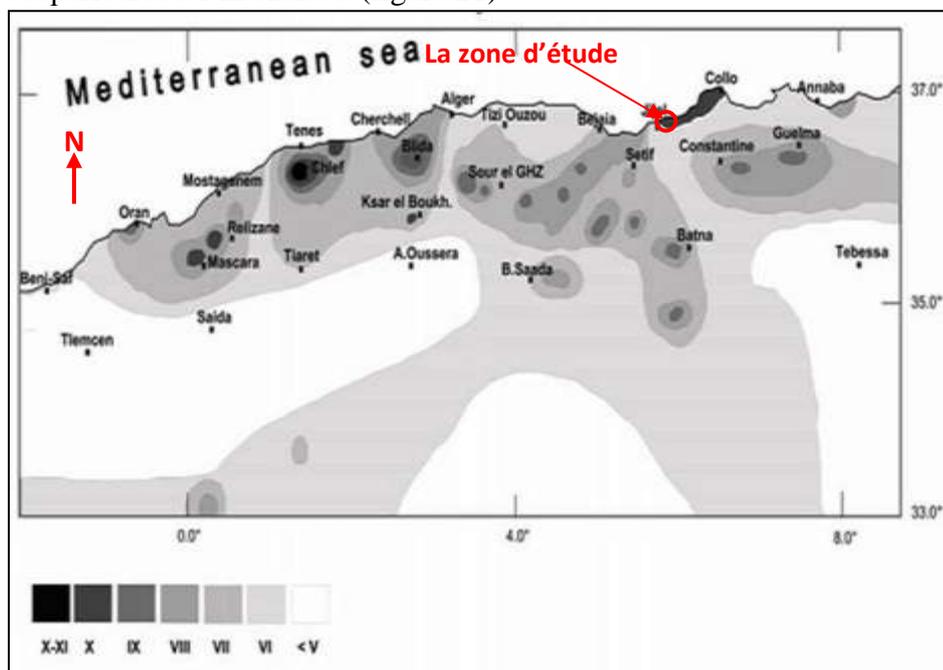


Figure.22. Carte d'intensités sismiques maximales observées dans le nord de l'Algérie
Bougie (CRAAG ; 1971)

La carte sismique au 1/5.000.000 (figure.22) de la région de Jijel réalisée par le CRAAG¹ en 1971 montre les différents fronts des nappes de charriage, les alignements des failles majeures, et les épicentres de la région.

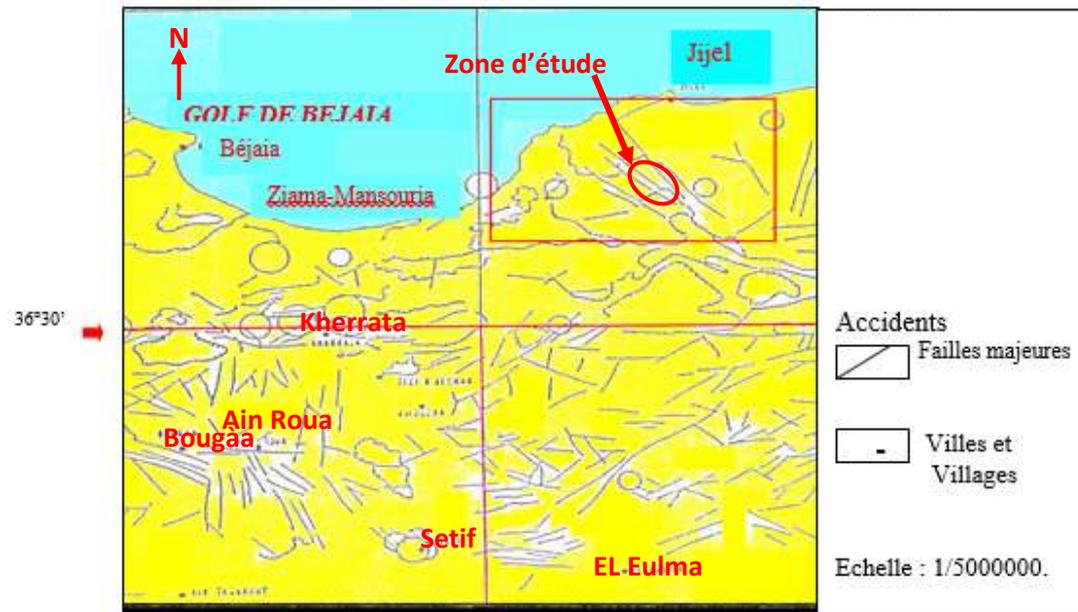


Figure.23. Contexte sismo-tectonique de la région Jijel – Bougie (CRAAG ; 1971)

La carte sismo-tectonique du (CRAAG ; 1971), (figure.21) permet de distinguer quatre grandes familles de failles qui sont :

- 1) **Failles Nord Est - Sud-Ouest** : La région de Jijel, au Nord comme au Sud présente cet alignement de failles :
 - L'alignement Nord, part de Jijel, traverse Kherrata et va jusqu'à l'Ouest de Bougâa (Bibans). On peut compter 8 foyers de séismes.
 - L'alignement Sud quant à lui part du Sud de Jijel pour disparaître à l'Est de Bougâa, ce dernier comptabilise 03 foyers.
- 2) **Failles Nord-Ouest- Sud Est** : Le Nord - Ouest de la carte de la (fig.15) est par excellence, la région où l'on remarque un réseau très développé de failles. Cette direction privilégiée réapparaît du côté Sud-Ouest aux environs de Bougâa et Ain Roua. Ailleurs, dans la carte, cette même famille des failles existe, elle est moins dense et présente des failles de moindre importance que celles des environs de Jijel et de Bougâa.

¹ CRAAG : centre de recherche en astronomie, astrophysique, et géophysique

3) Failles Est- Ouest : Un axe passant par le Nord de Ziamma Mansouriah (mer) et s'étalant jusqu'au Sud de Jijel semble s'aligner sur l'axe très net Est - Ouest qui passe par Kherrata et où les foyers longent le tracé des fronts de charriages de la région. Au Sud de Kherrata, l'axe Bougâa/Ain Roua présente ce même alignement (Est- Ouest).

- **Failles Nord -Sud :** La zone des Bibans (Ain Roua et Amoucha) est la seule à présenter discrètement cet alignement. Kherrata et Ziamma Mansouriah situées au Nord sont dans le prolongement immédiat de ce réseau de failles

II.5. Conclusion

Les six talus rocheux TR01, TR02, TR03, TR04, TR05 et TR06, objet de notre étude, sont situés sur le tracé de la pénétrante Djendjen-El-Eulma compris entre le PK 18 et le PK 24, dont :

- Les sites TR01 et TR02 sont formées par la masse rocheuse du grés Numidien
- Les autres sites, sont formés par le flysch Massylien

Tous les talus rocheux sont situés dans une zone sismique moyenne.

III.1. Introduction

Une masse rocheuse fracturée est composée par une matrice rocheuse séparés par des discontinuités. Sa caractérisation géomécanique permet d'appréhender les problèmes qui peuvent se poser lors les travaux de construction.

III.2. Campagne de la reconnaissance géotechnique des talus rocheux

À fin de déterminer les caractéristiques géotechniques des talus rocheux, objet de notre étude, une campagne de reconnaissance de géotechnique a été effectuée par le bureau d'étude Rizzani de eccher selon le programme suivant (ANA¹, 2015, 2016) :

- Quatre sondages carottés de 40.00m de profondeur
- Deux essais Lugeons cinq essais de Lefranc.
- Quatre essais de pénétrations standard « S. P. T ».
- Pose cinq piézomètres à l'endroit des sondages (S01. S02)
- Trois Essais pressiométriques
- Levés structuraux au niveau des talus rocheux
- Caractérisation des discontinuités selon les recommandations d'ISRM

Les coordonnées des emplacements des essais et des talus rocheux sont données dans le tableau suivant :

Tableau.6. Les coordonnées des emplacements des essais réalisés (WGS 84)

Essais	X	Y
SC2	745651.251	4063826.428
SC3	745749.704	4062701.97
SC4	745723.191	4062608.601
SC5	745828.09	4062034.543
SC1	745747.764	4064459.808
TR01	746006	4064965
TR02	745979	4064791
TR03	745895	4063289
TR05	746294	4061627
TR06	746428	4061576
TR04	745768	4062287

La localisation des emplacements des essais réalisés sont illustrés sur la carte de la figure 6

¹ ANA : Agence nationale des autoroutes

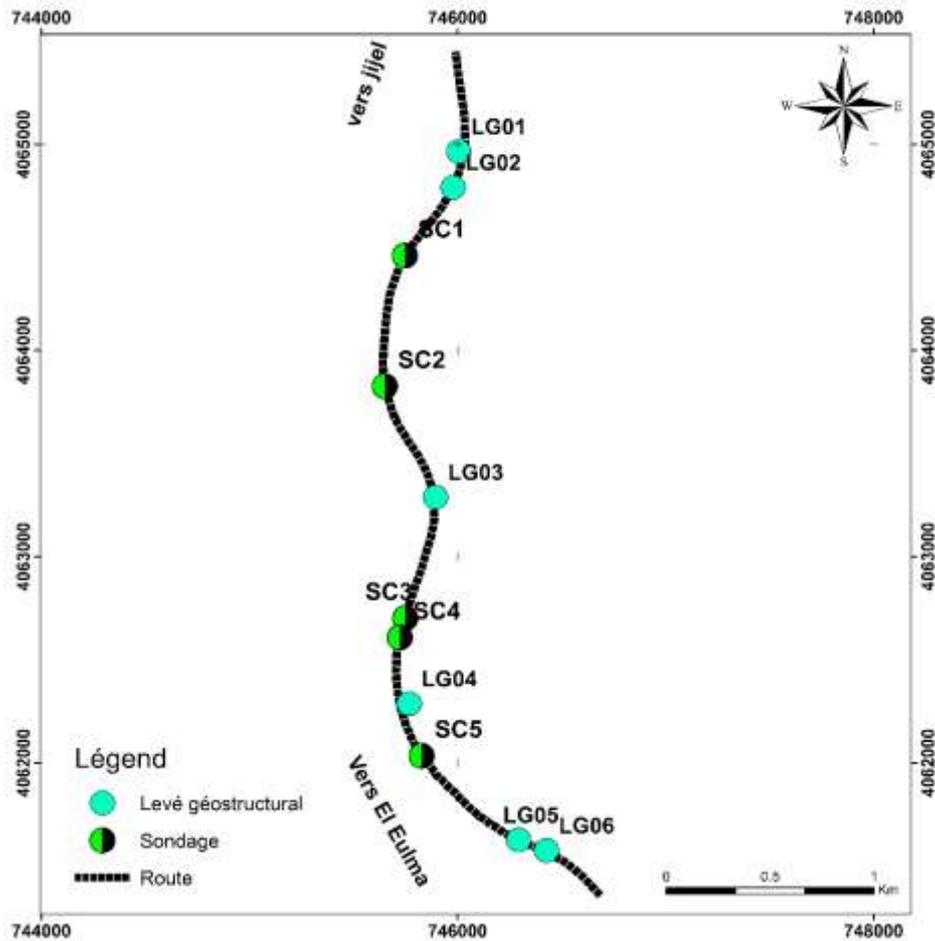


Figure.23. Carte d'implantation des essais (ANA, 2016)

L'examen des logs des sondages, nous a permis de voir que les sites des talus rocheux sont formés par les formations suivantes (tableau 6) :

- TR01 et TR02 : flysch numidien
- TR03, TR04, TR05 et TR06) : flysch massylien

En résumé, la lithologie des talus rocheux a été divisé en des unités géotechniques Ug1, Ug2a, Ug2b, Ug3 et Uf (voir tableau 8)

Tableau.7. Lithologie des talus rocheux selon les logs des sondages réalisés (ANA, 2016)

Sondage	Profondeur (m)	Lithologie
SC01	0.00-4.00	Dépôt alluvionnaire constitué de sable argileux, galets, gravier et des blocs centimétriques de grès
	4.00-5.00	Grès blanchâtres fragmente
	5.00-20.00	Argile très compacte parfois fissurée grisâtre
SC2	0-0.7	Terre Végétale
	0.70-5.10	Argile Marneuse graveleuse de divers couleurs avec présence des blocs centimétriques de grès.
	5.10-32.00	Grès blanchâtre parfois fissuré et fragmenté
	32.00-40.00	Marne très Compacte parfois fissurée grisâtre.
SC3	0-0.50	Terre végétale.
	0.50-1.80	Argile Marneuse avec Présence des blocs centimétriques de grès.
	1.80-7.00	Grès à ciment calcaire blanchâtre.
	7.00-12.00	Argile marneuse graveleuse verdâtre a grisâtre
	12.00-22.00	Grès a ciment calcaire parfois fragmente blanchâtre.
	22.00-29.10	Marne fracturée grisâtre avec présence des blocs centimétriques de calcaire.
	29.10-39.00	Marno-Calcaire fragmente grisâtre à blanchâtre.
	39.00-40.00	Grès à ciment de calcaire fragmentée blanchâtre.
SC4	0.00-2.00	Remblai
	2.00-10.80	Dépôt alluvionnaire constitué de sable grossie, galet, gravier, argile et des blocs centimétriques de grès blanchâtre
	10.80-20.00	Argile grisâtre parfois fracturée
SC5	0.00-8.20	Dépôt alluvionnaire constitué de sable argileux, galets, gravier et des blocs centimétriques de grès avec des passage de grès blanchâtre
	8.50-25.00	Argile grisâtre parfois fracturée

Tableau.8. Les unités géotechniques formant les talus rocheux

Unité géotechnique	Lithologie		
Uf	Dépôts hétérogènes		
Ug1	Flysch Massylien	Ug1ab	Grès quartzitique fine
		Ug1b	Argilites feuilletées
Ug2	Flysch Numidien	Ug2a	Grès blanchâtre
		Ug2b	Argilites et marnes
Ug3	Alluvions grossiers, dépôts colluviaux et rocheuses		

III.2.1. Essais in situ

Les essais in-situ réalisés sont : les essais SPT et les essais de perméabilité Lefranc et Lugeons

III.2.1.1. Essai SPT

Les résultats des essais SPT réalisées sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau.9. Résultats des essais SPT.

Sondage	Pr(m)	Ug	N _{SPT}
SC2	2	Ug2	51
	4	Ug2	52
SC4	12	Ug1b	51
	15	Ug1b	52
	18	Ug1b	52
SC5	2.50	Ug3	47
	6	Ug1	48
	11	Ug1b	50
	18	Ug1b	50
	21	Ug1b	50
SC1	3	Ug3	50

D'après les résultats obtenus par les essais de SPT, le grès correspond à un nombre de coups très élevé (47 à 52), par contre le nombre de coups nécessaire pour enfoncer le carottier de l'essai dans les argiles et les marnes est relativement faible (30 à 40).

III.2.1.2. Essais de perméabilité (Lefranc NF 94-132)

Les valeurs du coefficient de perméabilité obtenus par l'essai Lefranc et Lugeon sont regroupées dans le tableau, 10

Les masses rocheuses du flysch massylien sont peu perméable d'après les valeurs obtenues, par l'essai Lefranc qui sont variées entre $1.25 \cdot 10^{-5}$ et $9.35 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Les valeurs obtenues, par l'essai Lugeon, varient entre 1.42 à $2.65 \cdot 10^{-7}$, donc le grès numidien est caractérisé par une perméabilité très faible

Tableau.10. Les valeurs du coefficient de perméabilité

Perméabilité				
Essai Lefranc NF 94-132				
Forage	Profondeur essai (m)	Lithologie		K(m/s)
SC2	1.00	Ug2	Argile marneuse graveleuse	$9.35 \cdot 10^{-5}$
	4.00			$9.34 \cdot 10^{-5}$
SC3	1.50	Uf(E7)	Argile marneuse limoneuse	$5.86 \cdot 10^{-5}$
SC4	3.75	Ug3	Sable grossier, galets, gravier, argile	$1.54 \cdot 10^{-5}$
	5.00			$7.62 \cdot 10^{-5}$
	6.75			$4.60 \cdot 10^{-5}$
	11.00	Ug1b	Argilite grisâtre parfois fracturée	$3.91 \cdot 10^{-5}$
	13.00			$7.05 \cdot 10^{-5}$
15.00			$1.43 \cdot 10^{-5}$	
SC5	3.00	Ug3	Sable argileux, galets, gravier	$1.54 \cdot 10^{-5}$
	7.50			$1.25 \cdot 10^{-5}$
	9.00	Ug1b	Argilite grisâtre parfois fracturée	$7.47 \cdot 10^{-5}$
	12.00			$4.99 \cdot 10^{-5}$
SC1	2.00	Ug3	Sable grossier, galets, gravier	$1.28 \cdot 10^{-5}$
Essai Lugeon				
Forage	Profondeur essai (m)	Lithologie		K(m/s)
SC2	20.50	Ug2a	Grès blanchâtres	$2.65 \cdot 10^{-7}$
	27.50			$2.38 \cdot 10^{-7}$
SC3	37.50	Ug2a		$1.42 \cdot 10^{-7}$

III.2.1.3. Essai Pressiométrique

Trois essais de pressiomètre ont été effectués au niveau des sondages SC04, SC05 et SC01. Les résultats obtenus (PL, Em et Em/PL) par les essais sont regroupés dans le tableau 11

La consultation des résultats obtenus par l'essai pressiométrique, notamment EM/PL, nous a permis de voir une variation aléatoire des résistances entre 1.95 et 128.11 MPa. Cette variation vient de confirmer l'hétérogène de la lithologie des talus.

Tableau.11. Résultats des essais pressiométriques

Sondage	Prof. de forage(m)	Prof. Essai(m)	Ug	PL [MPa]	Em [MPa]	EM/PL
SC4	20	2	Ug3	1.91	10.98	5.75
		4		1.37	11.88	8.69
		6		1.40	16.17	11.58
SC5	25	2	Ug3	2.29	9.70	4.23
		4		0.74	8.05	10.89
		6		0.15	0.28	1.95
		8		8.49	316.30	37.25
		10	Ug1b	0.74	14.33	19.49
		13		1.77	20.22	11.44
		16		8.58	285.57	33.30
		19		8.61	294.70	34.22
		22		8.64	681.69	78.91
		25		8.68	334.06	38.49
SC1	20	2	Ug3	0.33	1.19	3.57
		4		8.46	382.11	45.16
		6	Ug1a	8.49	804.96	94.81
		8		8.52	303.98	35.68
		10		8.55	316.27	37.00
		13		8.57	318.68	37.17
		16		8.61	680.19	79.04
		19		8.64	1107.01	128.11

III.2.1.3. Suivre des piézomètres

Les lectures enregistrées lors de la surveillance des trois piézomètres installés sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau.12. Les lectures piézométriques.

Sondages	Profondeur m	Date de Mesure	Profondeur de la Nappe (m)
SC2	-	23/11/2014	7.6
SC3	-	19/11/2014	18.40
		20/11/2014	18.00
		01/12/2014	19.70
SC4	20	20/11/2014	6.50
		14/12/2014	5.80
		23/12/2014	5.70
		24/12/2014	5.65
		25/12/2014	5.80
		26/12/2014	5.80
		27/12/2014	5.80
		28/12/2014	5.80
SC5	25	01/12/2014	3.50
		23/12/2014	1.50
		24/12/2014	1.60
		25/12/2014	0.70
		26/12/2014	0.70
		27/12/2014	0.70
		28/12/2014	0.70
SC1	20	28/12/2014	4.80

IV.2.2. Essai de laboratoire

Des essais de la résistance à la compression simple ont été effectués sur des échantillons selon la norme NFP94-077

Tableau.13. Résultats de l'essai de la résistance à la compression

Unité géotechnique		RC (MPa)
Ug2	Ug2a	50-80
	Ug2b	10 - 20
Ug1	Uga1	5-20
	Ugb2	10-30

Tableau.14. Classification de la résistance à la compression des roches (ISRM, 1978)

Catégorie	RC en MPa	Résistance
RC1	>250	Extrêmement élevée
RC2	100- 250	Très élevés
RC3	50-100	Élevée
RC4	25-50	Moyenne
RC5	5-25	Faible
RC6	1-5	Très faible
RC7	<1	Extrêmement

Selon le tableau 14, le grès est caractérisé par une résistance élevée par contre les argilites sont caractérisées par des résistances faibles

III.3. Études des discontinuités

L'étude des discontinuités au niveau des talus rocheux a été réalisée en deux phases :

- **Phase 01** : étude structurale pour identifier les familles dominantes des discontinuités
- **Phase 02** : Caractérisation géométrique des discontinuités

III.3.1. Etude structurale

L'objectif de cette étude est de dégager les familles dominantes existés dans les masses rocheuses. Des mesures des orientation des joints ont été réalisées au niveau des talus rocheux : TR01, TR02, TR03, TR04, TR05, et TR06.

Afin de déterminer les principales familles au niveau de chaque site, le traitement statistique des données structurales a été effectué par le logiciel Dips (Rocsciences, 2016).

Tableau.15. Les orientations des familles dominantes au niveau de chaque site

Familles	LG 01		LG2		LG03	
	Dip (pendage)	Dip Direction	Dip (angle °)	Dip Direction	Dip (pendage)	Dip Direction
Jn1st	50	210	40	170	25	65
Jn2	70	160	50	20	30	130
Jn3	88	250	40	50	85	320
Jn4			90	110	62	190
Familles	LG04		LG05		LG06	
	Dip (pendage)	Dip Direction	Dip (pendage)	Dip Direction	Dip (angle °)	Dip Direction
Jn1	56	25	70	20	48	300
Jn2	50	280	38	220	10	340
Jn3	45	25	80	280	15	180
Jn4			30	165	70	120
Jn5					89	340

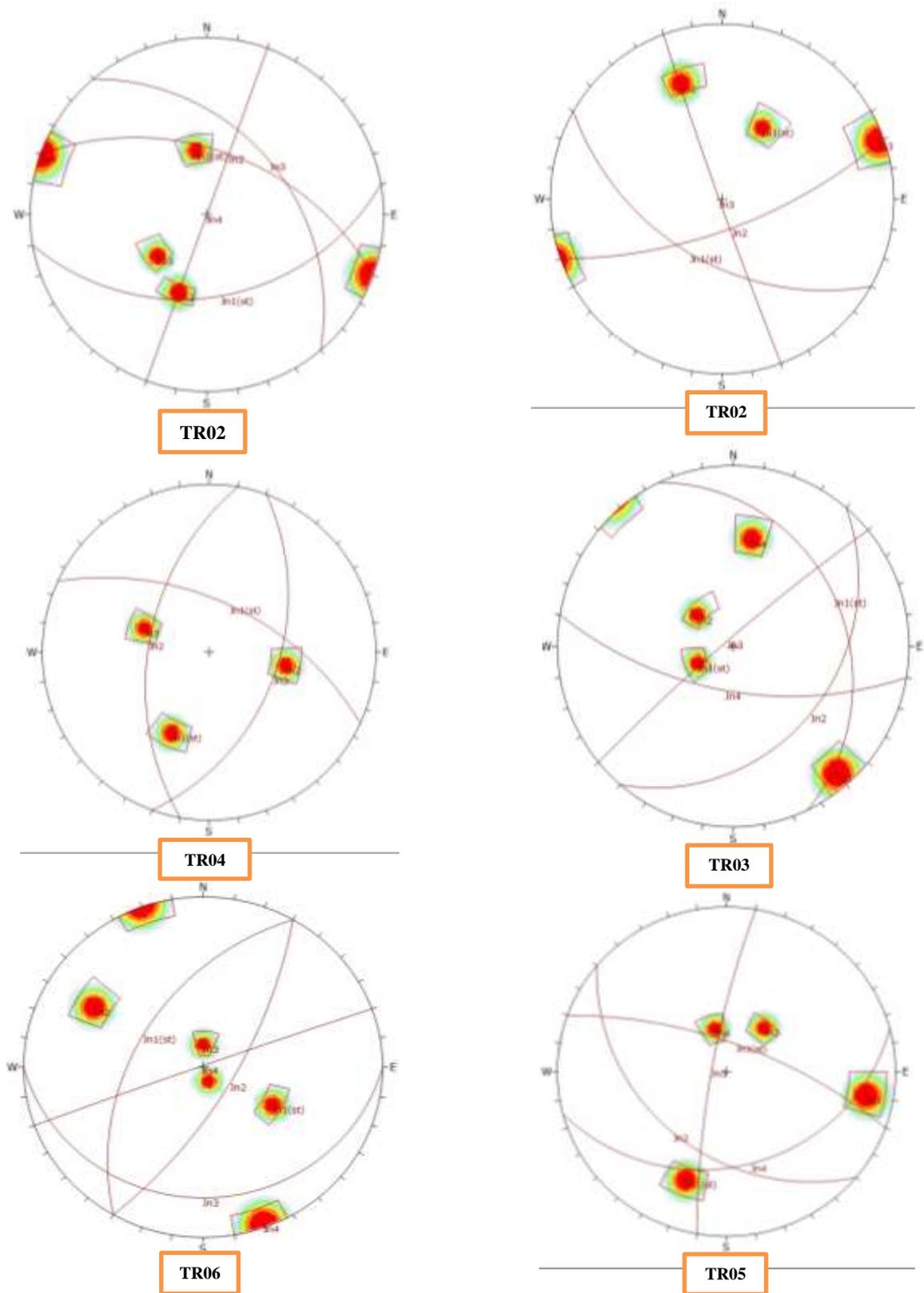


Figure.24. Traitement statistique des données de mesure par le logiciel DIPS (Rocsciences, 2016).

L'étude structurale des talus rocheux, nous a permis de voir que le flysch numidien est recoupé par trois familles de joints et le flysch massylien par quatre à cinq familles

III.3.2. Caractérisation des discontinuités

Les propriétés géométriques des discontinuités sont déterminées selon les recommandations d'ISRM² 1981 (tableau 16)

Tableau.16. Recommandations d'ISRM (1981) pour caractériser les discontinuités

Spacing (Espacement)								
S1	S2	S3	S4	S5				
Very close	Close	Moderate	Wide	Very wide				
< 6 cm	6 – 20 cm	20 – 60 cm	60 – 200 cm	> 200 cm				
Persistence (Persistance)								
P1	P2	P3	P4	P5				
Very low	Low	Medium	High	Very high				
< 1m	1 – 3 m	3 – 10 m	10 – 20 m	> 20 m				
Roughness (Rugosité)								
R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9
Stepped			Undulating			Planar		
Rough	Smooth	Slickenside	Rough	Smooth	Slickenside	Rough	Smooth	Slickenside
discontinuity conditions								
C1	C2	C3	C4	C5	C6			
Fresh	Slightly weathered	Moderate weathered	Highly weathered	Completely weathered	Residual soil			
Rougness* (Bieniawski, 1989)								
R1	R2	R3	R4	R5				
Slickensided	Smooth	Rough	Slightly rough	Very rough				
Aperture* (ouverture) Rougness* (Bieniawski, 1989)								
A1	A2	A3	A4	A5				
Closed	Very tight - Tight	Partly open - Open	Open moderately wide	Moderately wide - Wide				
0.0 mm	< 0.1 mm	0.1 mm – 1 mm	1 mm – 5 mm	>5mm				
Filling								
F1	F2	F3	F4	F5	F6			
Very soft clay	Soft clay	Firm clay	Stiff clay	Very stiff clay	Hard clay			
<0.025 MPa	0.025 – 0.05 MPa	0.05 – 0.10 MPa	0.10 – 0.25 MPa	0.25 – 0.50 MPa	> 0.50 MPa			
F7	F8	F9	F10	F11	F12			
Extremely weak rock	Weak rock	Medium strong rock	Strong rock	Very Strong rock	Extremely Strong rock			
0.25 – 5 MPa	5 – 25 MPa	25 – 50 MPa	50 – 100 MPa	100 – 250 MPa	> 250 MPa			
Seepage								
V1	V2	V3	V4	V5				
Dry wall and roof, not detectable seepage	Minor seepage, specify dripping discontinuities	Medium inflow, specify discontinuities with continuous flow (estimate l/min/10m length excavation)	Major inflow, specify discontinuities with strong flow (estimate l/min/10m length excavation)	Exceptionally high inflow, specify source of exceptional flow (estimate l/min/10m length excavation)				
(Bieniawski, 1989)								
Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing				
Weathering* (Bieniawski, 1989)								
W1	W2	W3	W4	W5				
Decomposed	Highly weathered	Moderately weathered	Slightly weathered	Unweathered				

(*) caractéristiques sont extraites depuis les recommandations de Bieniawski, 1989

² ISRM : International Society for Rock Mechanics.

La rugosité des épontes des discontinuités a été évaluée par le paramètre JRC de Barton et Choubey (1977) et les deux paramètres : jR pour une petite échelle et jC pour une grande échelle Palmstrom (2000, 2005)

Tableau.17. Estimation de la rugosité des discontinuités par jR et jC
Palmstrom (200, 2005)

"RATINGS" EVALUATION USING PALISTROM (2000 - 2005)						
Joint condition factor jC		jC (Palmstrom)=jR x jL / jA				
Joint roughness factor (JR)		Large scale waviness of joint plane				
		planar	Slightly Undulating	Undulating	Strongly Undulating	Stepped or interlocking
Small scale smoothness of joint surface	very rough	2	3	4	6	6
	rough	1,5	2	3	4,5	6
	smooth	1	1,5	2	3	4
	polished or slickenside*	0,5	1	1,5	2	3
<i>For filled joint jR=1 For irregular joint a rating of jR=5 is suggested</i>						
<i>*) For slickenside the rating apply to possible movement along the lineation</i>						
Joint alteration factor (jA)						
Contact between joint walls	Joint wall character		Conditions		Wall contact	
	CLEAN JOINTS	healed or welded joints	Filling of quartz,epidote,ect		0,75	
		Fresh joint walls	no coating or filling,except from staining (rust) one grzde higher alteration than the rock		1	
		Altered joint walls	Two grades higher alteration than the rock		2	
	COATING or THIN FILLING	Friction materials	Sand ,silt calsite ,etc ,without content of clay		4	
		Cohesive materials	Clay, chlorite ,talc ,etc		3	
	Partly or no wall contact	Filling		Type		Party wall contact
				thin filling (<5mm)	thick filling or gouge	
Friction materials		Send,silt calcite ,etc. (non softening)		4	8	
Hard,cohesive materials		Compacted filing of clay chlorite talc,etc.		6	6-10	
Soft,cohesive materials		Medium to low ever consolidated clay, chlorite ,tac etc.		8	12	
Swelling clay materials		Filling material exhibits swelling properties		8-12	13-20	
Joint size factor (jL)						
Type	Length	Size		Continuous joints	Discontin.joints*	
Bedding or foliation parting	<0,5m	Very short		3	6	
Joint	0,1-1m	Short or Small		2	4	
	1-10m	Medium		1	2	
	10-30m	Long or large		0,75	1,5	
(Filled) joint,seam or shear**	>30m	very long or large		0,5	1	
*) Discontinuous joints end in massive rock						
**) often a singularity and should in these cases be teated separ						

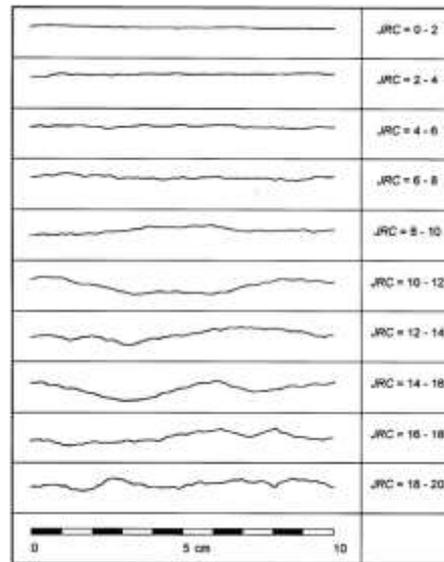


Figure.25. Les profils de rugosités et leurs valeurs de JRC correspondant
(Barton et Choubey, 1977)

Tableau.18. Evaluation de la rugosité des épontes des discontinuités des talus rocheux étudiés

Talus rocheux 01							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	1	1	2	Rough	2	Slightly Undulating	4 - 6
Jn 2	1	1	1.5	smooth	1.5	Slightly Undulating	2 - 4
Jn3	1	1	2	Rough	1	planar	4 - 6
Talus rocheux 02							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	2	2	3	Very rough	3	Slightly Undulating	6 - 8
Jn 2	1	2	3	Smooth	6	Slightly Undulating	6 - 8
Jn3	1	2	3	Smooth	6	Slightly Undulating	6 - 8
Jn4	2	2	3	Very Rough	3	Slightly Undulating	8 - 10
Talus rocheux 03							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	1	2	1	Rough	3	Undulating	2 - 4
Jn 2	2	2	1.5	Rough	3	Undulating	4 - 6
Jn3	1	2	1.5	Rough	3	Undulating	2-4
Jn4	2	2	1.5	Rough	2	Undulating	2-4
Talus rocheux 04							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	4	2	1	Smooth	0.5	Planar	0 - 2
Jn 2	2	2	4	Very Rough	3	Undulating	10 - 12
Jn3	4	2	4	Very Rough	1.5	Slightly Undulating	10 - 12
Talus rocheux 05							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	2	2	1	Smooth	2	Slightly Undulating	2 - 4
Jn 2	1	2	1.5	Rough	1.5	Planar	4 - 6
Jn3	1	2	1.5	Rough	3	Slightly Undulating	4 - 6
Jn4	1	2	1.5	Rough	1.5	Planar	4 - 6
Talus rocheux 06							
	jA	jL	jR		jC		JRC
Jn1	2	1	1	Smooth	0.5	Planar	2 - 4
Jn 2	4	2	2	Very Rough	1	Planar	6-8
Jn3	2	2	1.5	Rough	1.5	Planar	6 - 8
Jn4	2	2	1.5	Rough	1.5	Planar	6 - 8
Jn5	2	2	2	Rough	2	Undulating	6 - 8

Tableau.19. Caractérisation des discontinuités de talus rocheux étudiés

Talus rocheux 01						
Familles	Spacing	Persistence	Roughness	Joint conditions	Aperture	Seepage
Jn1	S2	P2	R5	C2	A4	V1
Jn2	S2	P2	R5	C2	A4	V1
Jn3	S2	P1	R4	C3	A4	V1
Taille du bloc	Min	Max	Moy.	Note	Commentaire	
	0.00048	0.042	0.006	small	moderately wide discontinuity spacings	
Talus rocheux 02						
Jn1	S2	P2	R4	C3	A3	V1
Jn2	S3	P1	R4	C2	A2	V1
Jn3	S3	P1	R4	C2	A2	V1
Jn4	S3	P2	R4	C3	A3	V1
Taille du bloc	Min	Max	Moy	Note	Commentaires	
	0.00048	0.00945	0.024	Large	very wide discontinuity spacings	
Talus rocheux 03						
	Spacing	Persistence	Roughness	Joint conditions	Aperture	Seepage
Jn1	S1	P1	R5	C2	A1	V1
Jn2	S1	P2	R5	C2	A2	V1
Jn3	S1	P2	R5	C2	A2	V1
Jn4	S1	P2	R5	C3	A3	V1
Taille du bloc	Min	Max	Moy.	Note	Commentaire	
	0.00032	0.02625	0.003	small	moderately wide discontinuity spacings	
Talus rocheux 04						
Jn1	S1	P2	R2	C4	A3	V1
Jn2	S3	P1	R2	C3	A4	V1
Jn3	S2	P1	R2	C4	A5	V1
Taille du bloc	Min	Max	Moyen	Note	Commentaire	
	0.00003	0.00	0.00144	small	moderately wide discontinuity spacings	
Talus rocheux 05						
Jn1	S1	P1	R8	C3	A3	V1
Jn2	S2	P1	R7	C2	A2	V1
Jn3	S2	P1	R7	C2	A2	V1
Jn4	S2	P1	R7	C2	A2	V1
Taille du bloc	Min	Max	moy	Note	Commentaire	
	0.00003	0.0075	0.00144	small	moderately wide discontinuity spacings	
Talus rocheux 06						
Jn1	S1	P2	R8	C3	A3	V2
Jn2	S4	P1	R4	C4	A5	V1
Jn3	S4	P1	R7	C3	A4	V1
Jn4	S2	P1	R7	C3	A3	V1
Jn5	S2	P1	R4	C3	A4	V1
Taille du bloc	Min	Max	Moy.	Note	Comentaire	
	0.00003	0.003	0.009	Medium	wide discontinuity spacings	

L'analyse des données du tableau.19, nous permis de voir que :

- Les discontinuités existées dans le flysch numidien sont caractérisées par un espacement faible à moyen, une persistance faible à moyenne. Leurs épontes sont rapprochées (ouverture <1mm), légèrement à moyennement altérés et rugueuses. La taille des blocs est petite
- Les discontinuités du flysch massylien sont caractérisées par un très faible espacement, une persistance très faible. Leurs des épontes sont lisses et partiellement ouvertes (ouverture <1mm) et légèrement à moyennement altérés. La taille des blocs est petite.

III.3. Classification géomécanique des talus rocheux

Les masses rocheuses des talus rocheux (TR01, TR02, TR03, TR04, TR05 et TR06) sont classé par les systèmes empiriques suivantes : RQD, RMR₈₉ et GSI

III.3.1. Rock Quality Designation (RQD)

La classification des masses rocheuses des sites étudiés est donnée dans le tableau suivant :

Tableau.20. Qualité de la masse rocheuse selon RQD

	RQD	Classe	Description	Lithologie
Talus rocheux 01	40 %	IV	Mauvaise	Flysch Numidienne
Talus rocheux 02	65 %	III	Moyenne	
Talus rocheux 03	20 %	V	Très mauvaise	Flysch Massylien
Talus rocheux 04	16%	V	Très mauvaise	
Talus rocheux 05	12%	V	Très mauvaise	
Talus rocheux 06	18%	V	Très mauvaise	

D'après le système RQD le flysch Massylien est de très mauvaise qualité et le flysch Numidien est de moyenne à mauvaise qualité

III.3.2. Rock Mass Rating (RMR)

Les six paramètres utilisés dans le calcul du RMR₈₉ sont :

- (1) Uniaxial compressive de la roche intacte, (2) Rock Quality Designation (RQD),
- (3) Espacement des joints, (4) Conditions des joints, (5) Régime hydraulique,
- (6) ajustement des orientation des joints par rapport à l'ouvrage

La somme des cinq premiers paramètres représentela note du système RMR_{basic} :

$$RMR_{\text{basic}} = \sum \text{paramètres}(1 + 2 + 3 + 4 + 5)$$

Le détail de la classification géomécanique du RMR₈₉ est donnée dans le tableau 21

D'après les résultats de RMR, la qualité des talus rocheux est comme suit

- TR01 : bonne qualité
- TR02 : moyenne qualité
- TR03, TR04, TR05 et TR06 sont de maivaise qualité

Tableau.21. Détail de classification géomécanique du système RMR₈₉

Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load Strength index	> 10MPa	4 -10 MPa	2 -4 Mpa	1 -2 Mpa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. Strength	> 250 Mpa	100-250 Mpa	50-100 Mpa	25 - 50 Mpa	5 -25 MPA	1 - 5 Mpa	< 1 Mpa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality RQD		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of		S5 >2 m	S4 0,6-2m	S3 200-600mm	S2 60-200mm	S1 < 60m		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (see E)		Very rough surfaces continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surface Separation < 1mm Slightly weathered walls	Slightly rough surface Separation <1mm Slightly weathered walls	Slightly rough surface Separation < 1mm Slightly weathered walls	soft gouge >5mm thick or separation >5mm continuos		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Groundwater	Inflow per 10m tunnel length (l/m)	V1 None	V2 < 10	V3 10 - 25	V4 25 - 125	V5 > 125		
		(joint water press)/(Major panicipalσ)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 05	> 0,5		
		General conditions	Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		
B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATION (seeF)									
Strecke and dip orientation			Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very Unfavourable		
Ratings	Tunnel & mines		0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations		0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes		0	-5	-25	-50	-60		
C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RAIYTING									
Ratings			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 21		
Class number			I	II	III	IV	V		
Description			Very good rock	Good rock	Fair rock	poor rock	Very poor rock		
D. MEAINING OF ROCK CLASSES									
Class number			I	II	III	IV	V		
Average stand-up time			20 yrs for 15 m span	1 year for 10 m span	1 week for 5 m span	10 hrs for 2,5 m span	30 min for 1 m span		
Cohesion of rock mass (KPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Friction angele of rock mass (deg)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		
E. GUIDLINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY Conditions									
Parsistence			P1	P2	P3	P4	P5		
Discontinuity length (parsistence)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Rating			6	4	2	1	0		
Separation (Aperture)			None	< 01 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Rating			6	5	4	1	0		
Roughness			R5	R4	R3	R2	R1		
Rating			Very rough 6	Rough 5	Slightly rough 3	Smooth 1	Slickensided 0		
Infilling (Gouge) (mm)			None	Hard Filling <5	Soft filling > 5	Soft filling < 5	Soft filling > 5 mm		
Rating			6	2	2	2	0		
class Weathering			W5	W4	W3	W2	W1		
Rating			Unweathered 6	Silightly weathered 5	Moderately weathered 3	Highly weathered 1	Decomposed 0		
F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION TUNNELLING**									
strecke perpondcular to tunnel axis					Stricke parallel to tunnel axis				
Drive with dip-Dip 45 - 90°			Drive with dip-Dip 20 - 45°		Dip 45 - 90°		Dip 20 - 45°		
Very favourable			Favourable		Very unfavourable		Fair		
Drive against dip-Dip 45 - 90°			Drive against dip-Dip 20 - 45°		Dip 0 - 20 - Irrespective of strike				
Fair			Unfavourable		Fair				

La classification des talus rocheux selon RMR est donnée dans le tableau 22

Tableau.22. Evaluations de la masse rocheuse des talus rocheux selon RMR₈₉

Talus rocheux 01								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
50- 100	25 – 50 %	S2	V5 ou V4	P2	A4	R4	None	W3
7	8	8	15 ou 7	4	1	5	6	3
19								
RMR		Sec	57 %	Classe	III	Description	Moyenne	
		Wet	49 %		III		Moyenne	
Talus rocheux 02								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
50 -100	50 – 75 %	S2	V5 ou V4	P2	A3	R4	None	W3
7	13	15	15 ou 7	4	4	5	6	3
22								
RMR		Sec	64 %	Classe	III	Description	Moyenne	
		Wet	66 %		III		Moyenne	
Talus rocheux 03								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
25 -50	< 25%	S1	V5 ou V4	P2	A2	R2	None	W3
2	3	5	15 ou 7	4	1	1	6	3
13								
RMR		Sec	38 %	Classe	IV	Description	Mauvaise	
		Wet	30 %		IV		Mauvaise	
Talus rocheux 04								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
25 – 50	< 25%	S1	V5 ou V4	P2	A2	R2	Soft clay	W2
2	3	5	15 ou 7	4	1	1	2	1
9								
RMR		Sec	34 %	Classe	IV	Description	Mauvaise	
		Wet	26%		IV		Mauvaise	
Talus rocheux 05								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
25 – 50	< 25%	S1	V5 ou V4	P2	A2	R2	Soft clay	W3
2	3	5	15 ou 7	4	1	1	2	3
11								
RMR		Sec	36 %	Classe	IV	Description	Mauvaise	
		Wet	28%		IV		Mauvaise	
Talus rocheux 06								
RC (MPa)	RQD	Spacing	Groundwater	Condition of discontinuities				
				Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
25 – 50	< 25%	S1	V5 ou V4	P3	A2	R2	Soft clay	W3
2	3	5	15 ou 7	2	1	1	2	3
9								
RMR		Sec	34 %	Classe	IV	Description	Mauvaise	
		Wet	26%		IV		Mauvaise	

IV.3.3. Geological strength index GSI

La classification géomécaniques des talus rocheux étudiés par le système GSI a été effectuée par trois méthodes à savoir (tableau 23)

- 1) **Méthode 01** : à **partir** le canevas établis par Marinis en 2011, dont il est conçu spécialement pour les masses rocheuses hétérogènes type flysch (figure.26).
- 2) **Méthode 02** : le GSI est déterminé à partir du RMR_{89} selon l'équation suivant :

$$\text{Si } RMR_{89} > 23 : \quad GSI = RMR_{89} - 5$$

- 3) **Méthode 03** : à partir de la relation établie par Hoek et Al., 2013 :

$$GSI = 1.5 JCond_{RMR89} + RQD/2$$

JCond_{RMR89} : évaluation des conditions de joints selon les recommandations établies par Bieniawski en 1989) (voir tableau 21)

Les classes utilisées dans la classification des talus rocheux étudiés sont celle de Marinis, 2011

Tableau.23. La qualité de la masse rocheuse selon GSI

GSI		95 – 76		75 – 56				55 – 41		40 – 21		< 20
Classe	Hoek et al., 1995	I		II				III		IV		V
	Marinos 2011 (flysch)	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Qualité de la masse rocheuse		Très bonne		Bonne				Moyenne		Mauvaise		Très mauvaise

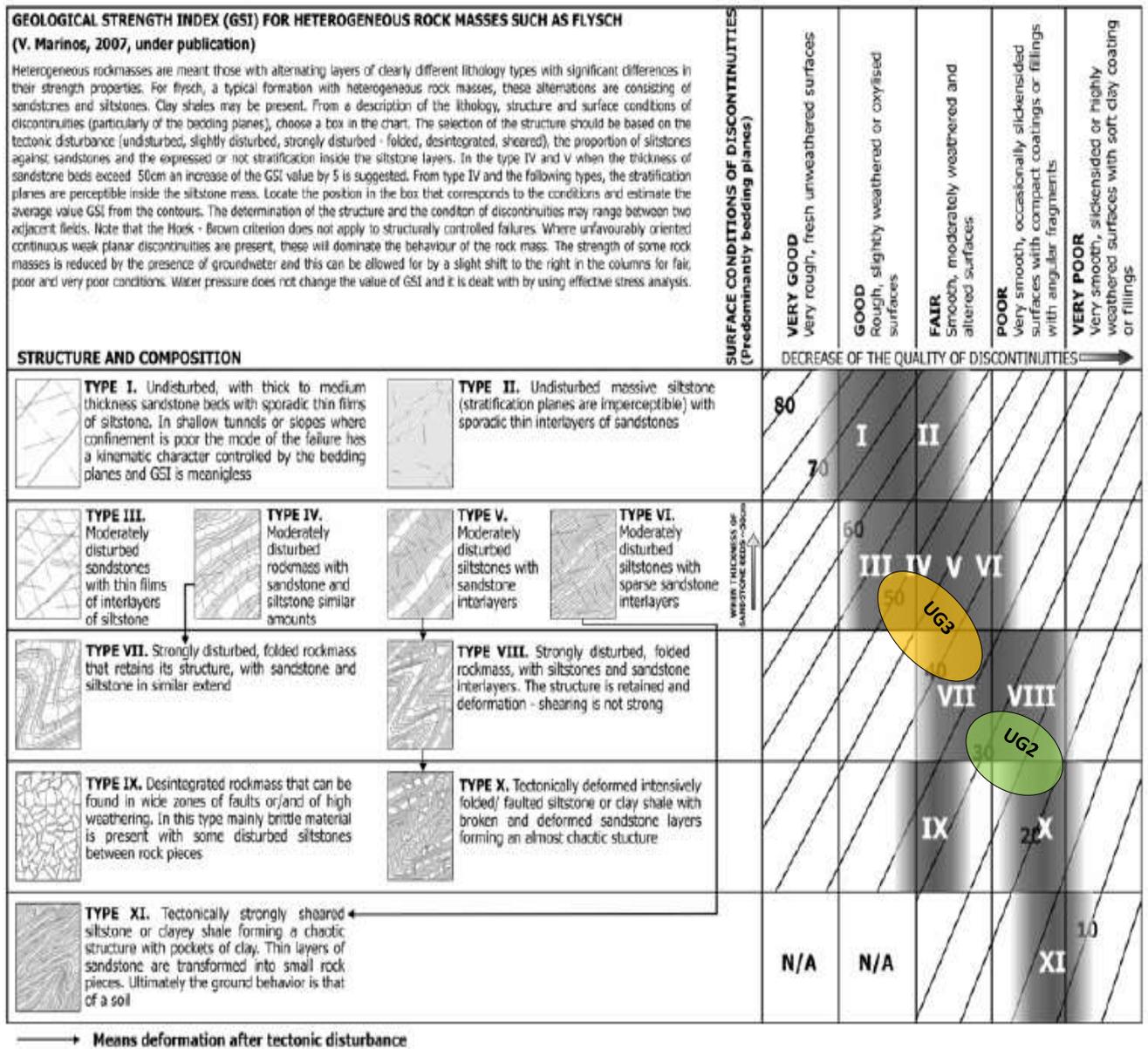


Figure.26. Exemple d'estimation du GSI à partir du canevas de Marinos, 2011

Tableau.24. Evaluations de la masse rocheuse des talus rocheux selon GSI

Talus rocheux 01						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
57 %	40 %	P2	A4	R4	None	W3
		4	1	5	6	3
19						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Notes		55	52	48.5		
Classe		VII - VIII	VII - VIII	VII - VIII		
Description		Moyen	Moyen	Moyen	Moyenne	
Talus rocheux 02						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
64 %	65 %	P2	A3	R4	None	W3
		4	4	5	6	3
22						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Note		65	59	65.5		
Classe		III -IV	III-IV	III-IV		
Description		Bon	Bon	Bon		
Talus rocheux 03						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
38 %	20%	P2	A2	R2	None	W3
		4	1	1	6	3
13						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Note		30	33	28.5		
Classe		IX – X	IX – X	IX – X	IX – X	
Description		Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	
Talus rocheux 04						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
34 %	16 %	P2	A2	R2	Soft clay	W2
		4	1	1	2	1
9						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Note		25	29	21.5		
Classe		IX – X	IX – X	IX – X	IX – X	
Description		Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	
Talus rocheux 05						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
36 %	12 %	P2	A2	R2	Soft clay	W3
		4	1	1	2	3
11						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Note		24	31	22.5		
Classe		IX – X	IX – X	IX – X	IX – X	
Description		Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	
Talus rocheux 06						
RMR	RQD	Condition of discontinuities				
		Persistence	Aperture	Roughness	Infilling	Weathering
34 %	18%	P3	A2	R2	Soft clay	W3
		2	1	1	2	3
9						
GSI		Méthode 01	Méthode 02	Méthode 03	Moyen	
Note		35	29	25.5		
Classe		IX – X	IX – X	IX – X	IX – X	
Description		Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	Mauvaise	

III.4. Conclusion

La reconnaissance géotechnique effectuée au niveau des talus rocheux étudiés a montré que :

- Les talus rocheux sont formés par des masses rocheuses hétérogène type flysch :
 - **Ug1** : Flysch Massylien : TR03, TR04, TR05 et TR 06
 - **Ug2** : Flysch Numidien : TR 01 et TR 02
- La variation aléatoire des résistances obtenus par l'essai SPT, caractérisant les masses rocheuses hétérogène.
- La perméabilité des masses rocheuse est faible à très faible

La caractérisation des discontinuités a été effectuée selon les recommandations d'ISRM, dont nous a donnée les caractéristiques suivantes :

- **Flysch massylien (Ug1)** : il est recoupé par trois familles principales des discontinuités qui sont caractérisées par un très faible espacement, une persistance très faible. Leurs épontes sont lisses et partiellement ouvertes, et moyennement altérées.
- **Flysch numidien (Ug2)** : il est recoupé par trois à quatre familles principales des discontinuités qui sont caractérisées par un espacement faible à moyen, une persistance faible à moyenne. Leurs épontes sont rapprochées légèrement altérés et rugueuses.

La qualité des talus rocheux a été évaluée par deux systèmes RMR₈₉ et GSI, qui sont aboutis aux mêmes résultats :

- **Flysch Massylien (Ug1)** : mauvaise qualité
- **Flysch numidien : Ug2a** (grès) bonne qualité
Ug2b : moyenne qualité (alternance entre grès et argilite).

IV.1. Introduction

L'étude d'un talus rocheux comporte, outre la connaissance du site (la géométrie, les surcharges au sommet et au pied, et les effets dynamiques ou sismiques) et la détermination et choix des caractéristiques géomécaniques de la masse rocheuses, le calcul de stabilité.

Le calcul de la stabilité des talus rocheux est l'une des importants problèmes en géotechnique, parce que les masses rocheuses sont considérées comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse, dont la présence des discontinuités a une grande influence sur le comportement et la structure du massif, donc la stabilité d'un talus rocheux est contrôlée principalement par les caractéristiques géométriques et mécaniques des discontinuités. Pour cela, l'estimation de la sécurité réelle des talus rocheux vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues. Cette estimation nécessite une bonne caractérisation géomécanique de la masse rocheuse

En vue de l'hétérogénéité de la masse rocheuse marqués par la présence des discontinuités la stabilité des talus rocheux (TR01, TR02, TR03, TR04, TR05 et TR06) a été effectués selon trois approches à savoir :

- 1) Approche géométrique qui se base sur l'analyse cinématique des blocs rocheux en utilisant les données structurales
- 2) Approche empirique qui se base sur les systèmes de classification géomécanique SMR
- 3) Approche analytique : qui se base sur le principe de coefficient de sécurité qui est déterminé en utilisant les méthodes d'équilibre limite

IV.2. Étude de stabilité par l'approche géométrique : analyse cinématique

La masse rocheuse présente en général un caractère typiquement discontinu, lié à la présence d'un réseau de deux ou trois familles de discontinuités. Ce caractère discontinu des masses rocheuses est décrit directement par des mécanismes de rupture simples (rupture plane, rupture Wedge (en dièdre), rupture en Toppling (par basculement) ...etc). Donc ces ruptures sont contrôlées directement par le système de discontinuités, et constituent une approche réaliste des mécanismes réels. La méthode d'analyse la plus employée est la projection stéréographique en représentation polaire sur canevas de Schmidt avec calcul de densité

En effet, l'identification cinématique des mécanismes de rupture est effectuée à l'aide de la projection stéréographique en fonction de l'orientation et de la pente des talus et des paramètres géométriques des discontinuités (Hoek et Bray, 1974)

L'analyse cinématique des talus rocheux étudié est effectuée à l'aide de l'ordinateur par l'utilisation du logiciel DIPS (2016). Ce dernier est conçu pour l'analyse interactive des données de mesures structurales. Il est capable d'effectuer de nombreuses opérations telles que : l'étude de la répartition d'une population de discontinuités en familles directionnelles, l'analyse cinématique, la visualisation des données structurales selon les mêmes techniques utilisées dans les stéréos manuels.

L'examen des stéréogrammes de l'analyse cinématique des talus rocheux présentés sur les figures.27,28,29,30,31 et 33, et le tableau.27, des résultats, nous a permis de constater :

- **TR 01** : la rupture de ce talus par les deux modes planar sliding et toppling peuvent produire pour des angles des pentes supérieures à 78° respectivement, et la famille significative est J_{n4} (90/110), par le mode de wedge peut survenir à des angles de pentes $\geq 78^\circ$, (intersection de la famille J_{n1} avec J_{n2}).
- **TR02** : la rupture de ce talus peut produire selon deux mécanismes planar et toppling peuvent produire pour des angles des pentes supérieures à 82° , et la famille qui peut déclencher les ruptures est J_{n1} (90/110), et l'intersection des deux familles J_{n2} et J_{n4} peut provoquer la rupture selon le mode de wedge à partir à des angles de pente $\geq 52^\circ$,
- **TR03** : ce talus est menacé seulement par un seul mode de rupture qui est le wedge pour des angles de pentes $\geq 30^\circ$, qui est matérialisé par intersection du J_{n1} avec J_{n2}
- **TR04** : la rupture en mode toppling peuvent produire dans ce talus pour une angle de pente supérieures à 30° , dont la famille qui peut déclencher la rupture est J_{n2} (50/280).
- **TR05** : ce talus est instable et l'instabilité a été déclenchée selon le mode toppling (l'angle de pente supérieures à 0°), à cause de la famille J_{n3} (80/280). En outre un risque de rupture en mode de wedge peut survenir à un angle de pente $\geq 80^\circ$, (l'intersection de J_{n1} avec J_{n4})
- **TR 06** : la rupture par les deux modes planar et toppling peuvent produire pour des angles des pentes supérieures à 78° , et la famille significative est J_{n3} (15/180). La rupture en mode wedge peut survenir pour des angles de pentes $\geq 40^\circ$ par l'intersection du J_{n1} * J_{n2}

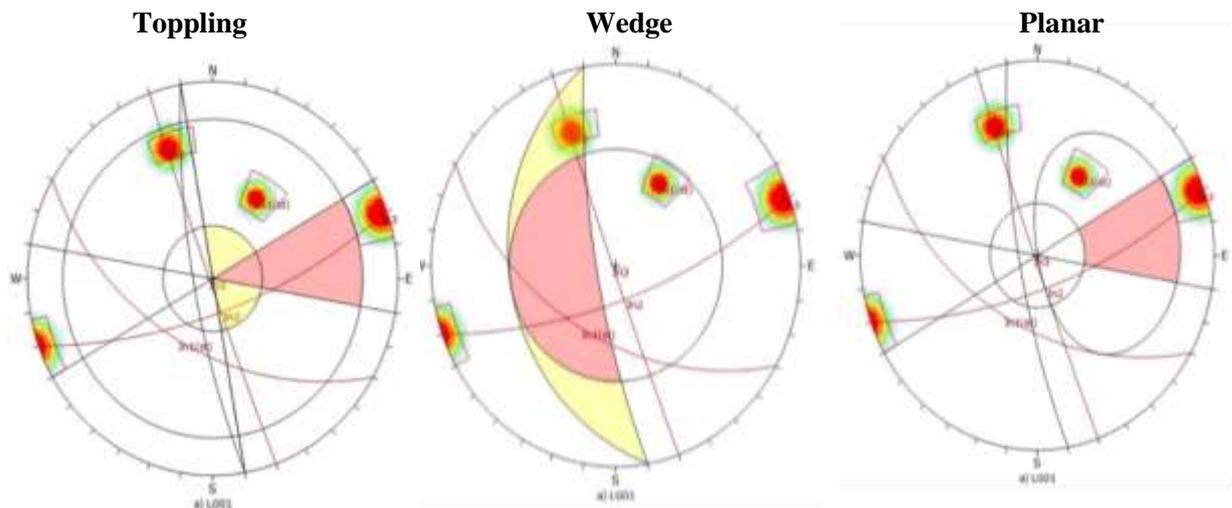


Figure.27. Analyse cinématique du talus rocheux TR01

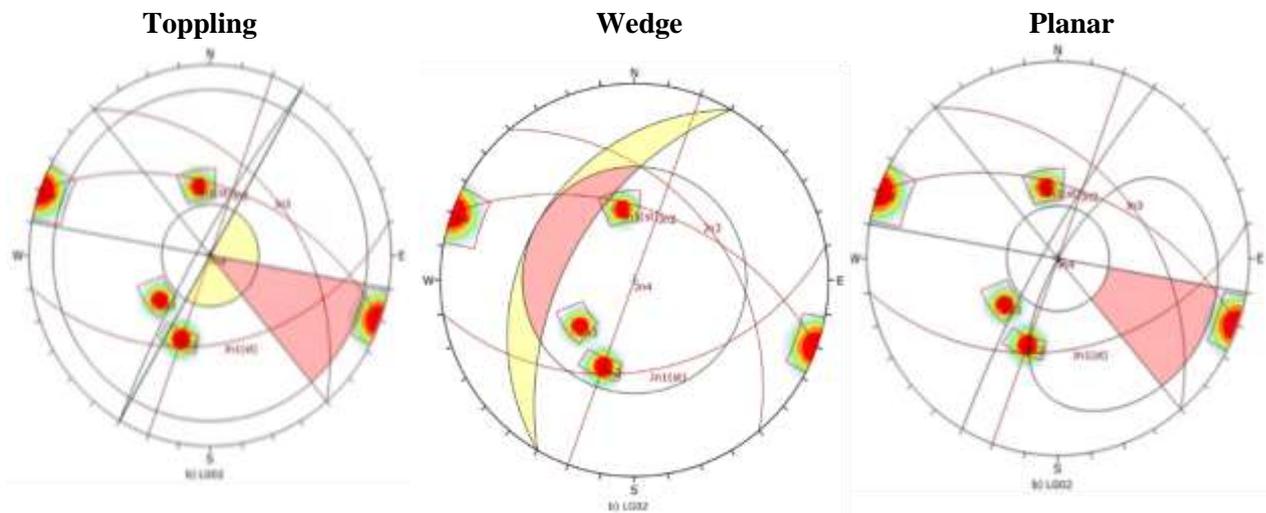


Figure.28. Analyse cinématique du talus rocheux TR02

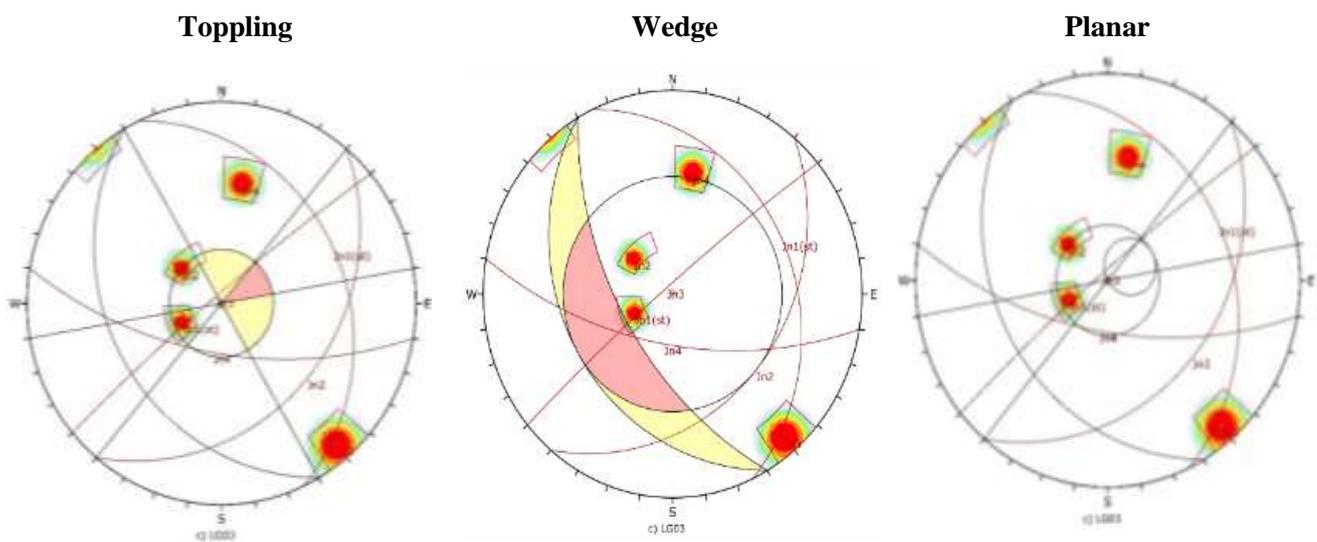


Figure.29. Analyse cinématique du talus rocheux TR03

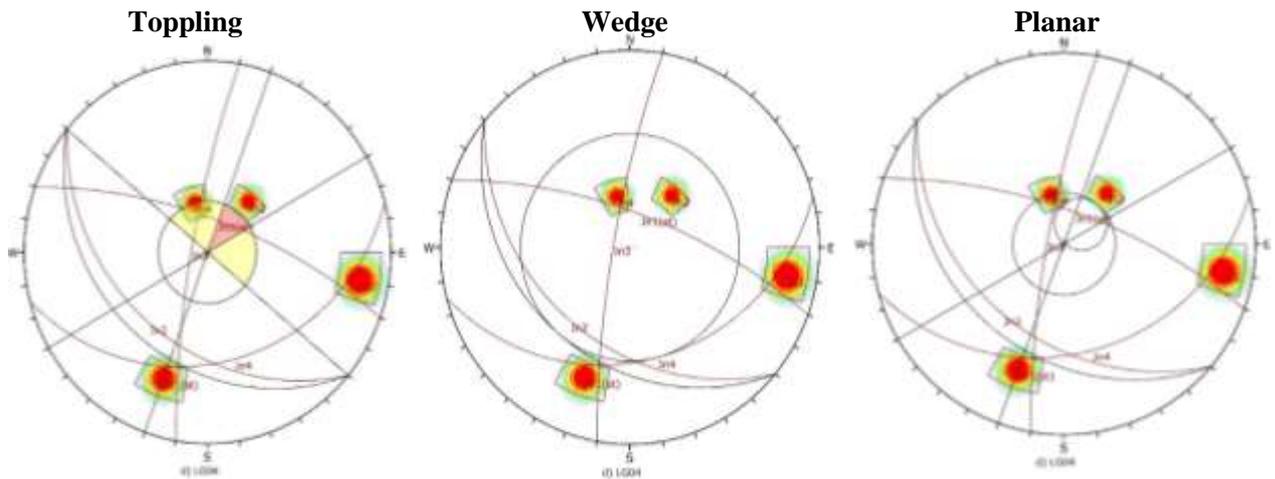


Figure.30. Analyse cinématique du talus rocheux TR04

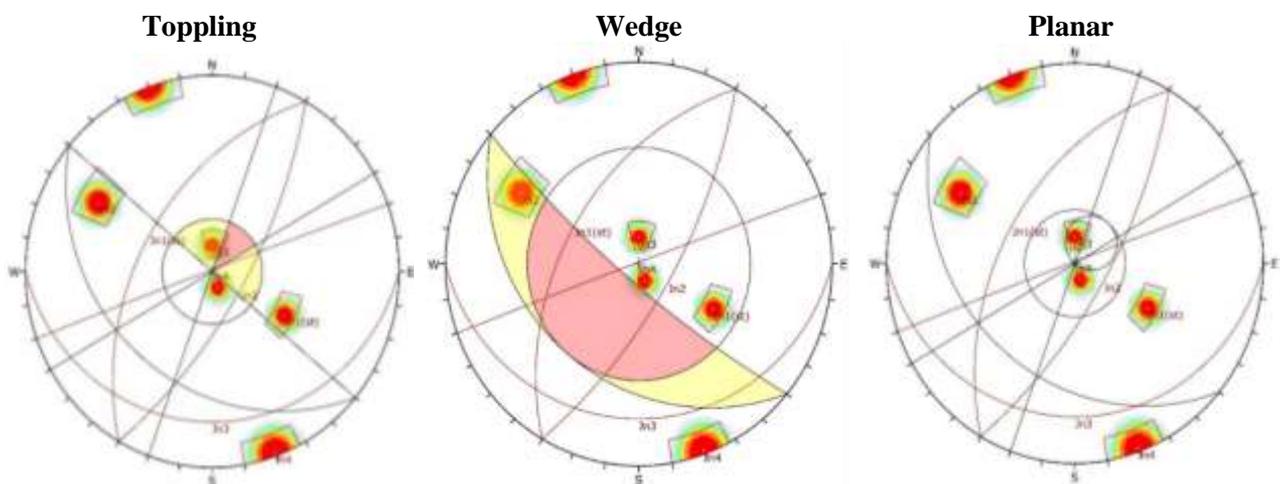


Figure.31. Analyse cinématique du talus rocheux TR05

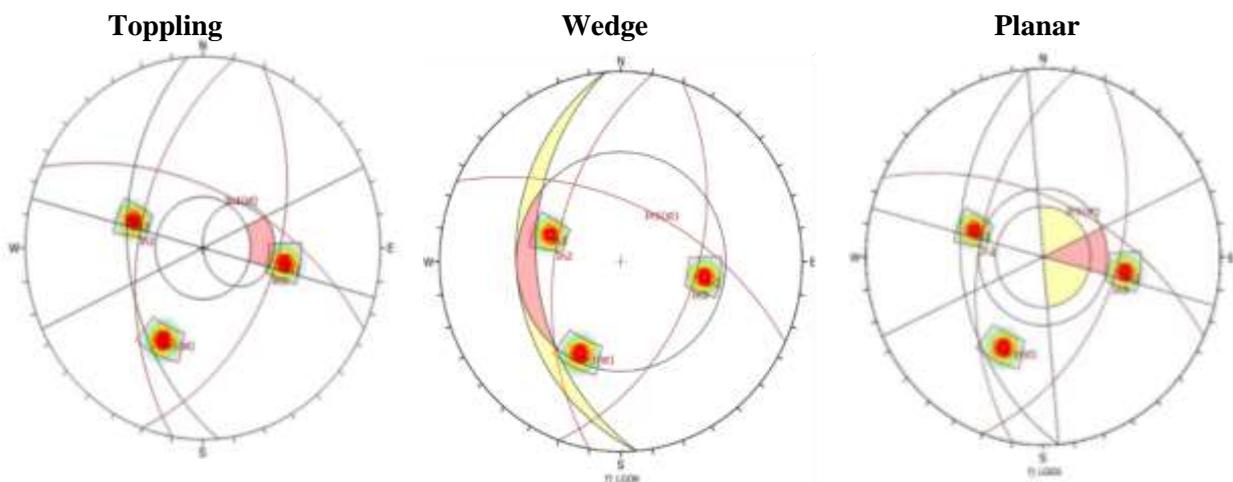


Figure.32. Analyse cinématique du talus rocheux TR06

Tableau.25. Résultats de l'analyse cinématiques des talus rocheux étudié

TR01 (x = 746006 ; y= 4064965)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	260	Pla	Top	Wedge
Jn1	50	210	-	-	Jn1*jn2
Jn2	70	160	-	-	
Jn3	88	250	+	+	
Alpha critique			78°	78°	78°
TR02 (x = 745979, y = 4064791)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	300	Planar	Toppling	Wedge
Jn _{st} 1	40	170	-	-	Jn2*jn4
Jn2	50	20	-	-	
Jn3	40	50	-	-	
Jn4	90	110	+	+	
Alpha critique de rupture			82°	82°	52°
TR03 (x = 745895, y= 4063289)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	260	Planar	Toppling	Wedge
Jn _{st} 1	25	65	-	-	Jn4*Jn3
Jn2	30	130	-	-	
Jn3	85	320	-	-	
Jn4	62	190	-	-	
Alpha critique de rupture			-	-	30°
TR04 (x=746294, y= 4061627)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	220	Planar	Toppling	Wedge
Jn _{st} 1	56	25	-	-	-
Jn2	50	280	-	+	
Jn3	45	110	-	-	
Alpha critique de rupture			-	30°	-
TR05 (x=746428, y=4061576)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	225	Planar	Toppling	Wedge
Jn _{st} 1	70	20	-	-	Jn1*jn4
Jn2	38	220	-	-	
Jn3	80	280	-	+	
Jn4	30	165	-	-	
Alpha critique de rupture			Stable	0°	80°
TR06(x =745768, y=4062287)					
	Dip	Dip Dir	Mécanismes de rupture		
Slope	30	265	Planar	Toppling	Wedge
Jn _{st} 1	48	300	-	-	Jn1*jn2
Jn2	10	340	-	-	
Jn3	15	180	+	+	
Jn4	70	120	-	-	
Jn5	89	340	-	-	
Alpha critique de rupture			44°	44°	40°

(Jn_{st}) : plan de stratification, (+) : rupture probable, (-) aucune rupture

IV.3. Etude de stabilité par l'approche empirique : Système SMR

Le problème de stabilité des talus rocheux peut être résolu seulement à condition de connaître de façon approfondie et détaillée la structure de la masse. Cette connaissance doit avoir deux aspects également importants :

- La matrice rocheuse avec ses caractéristiques spécifiques (le type de la roche, la composition minéralogique, ses propriétés physico-mécaniques...etc.) et de l'a
- Les discontinuités composant cette masse rocheuse et leurs caractéristiques géomécaniques.

Pour cela plusieurs systèmes empiriques de la classification géomécaniques sont proposés et utilisées dans les études de stabilité des talus rocheux pour assigner une valeur numérique afin de définir les caractéristiques et les propriétés de la masse rocheuse pour estimer le comportement de l'excavation et de permettre également de designer un soutènement adéquat et sécuritaire.

Il existe plusieurs systèmes utilisés dans les études de stabilités des talus rocheux, dont le plus répondu est le SMR (Slope Masse Rating), (Romana,1985).

IV.3.1. Système SMR

Romana (1985) a proposé un système appelée le système « Slope Mass Rating » (SMR) pour évaluer la stabilité des pentes rocheuses, Il est obtenu à partir de Bieniawski (RMR) en lui ajoutant un produit de facteurs d'ajustement dépendant de la relation joints – talus et en lui additionnant un facteur dépendant de la méthode d'excavation

$$SMR = RMR_b + (F1 * F2 * F3) + F4 \quad (1) \quad \text{Où : } RMR_b \text{ est le RMR}_{89}$$

F1, F2, F3 sont des facteurs d'ajustement et F4 est le facteur de correction.

Une valeur de SMR est calculée pour chaque système de discontinuités dont la plus petite est retenue pour quantifier la globalité du talus.

IV.3.1.1. Définition des paramètres du SMR

Les facteurs F1, F2, F3 sont des facteurs d'ajustement liés à l'orientation des joints par rapport à l'orientation des pentes. Ils sont définis comme suit :

- **F1** : ce facteur est établi empiriquement. Il dépend du parallélisme entre la direction de la discontinuité et la direction du talus. Ce facteur peut varier de 1 (quand les deux sont presque parallèles) à 0,15 (quand l'angle entre les deux est plus grand que 30° et que la probabilité de rupture est très faible) (voir tableau). Il peut calculer également par la relation suivante :

$$F1 = (1 - \sin A)^2$$

A est l'angle entre la direction de la discontinuité et direction talus.

- **F2** : il dépend du pendage des joints pour le mode de rupture plan. Les valeurs varient de 1 (pour les joints de plus de 45° de pendage) à 0,15 (pour les joints de moins de 20° de pendage). Dans le cas du toppling, le facteur reste égal à 1. Il a également été établi empiriquement par l'équation suivante :

$$F2 = \tan^2 \beta$$

β_j est le pendage des joints

- **F3** est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints. Pour ce paramètre, il y a également lieu de faire la différence entre une rupture plane et une rupture par toppling.
- **F4** : il se rapporte à l'adaptation la méthode d'excavation. Il comprend la pente naturelle, ou la pente de coupe creusée par pré-fendage, grenailage lisse, grenailage normal, pauvre on mécanique, grenailage lisse, grenailage normal, pauvre dynamique et excavation mécanique. Il est fixé empiriquement sur les bases suivantes (voir tableau.26) :
 - Les talus naturels sont plus stables à cause de l'érosion à long terme et des protections naturelles telle la végétation ;
 - La roche prédécoupée augmente également la stabilité ;
 - L'abattage à l'explosif augmente, ne change pas ou diminue la stabilité du talus selon qu'il est léger, normal ou déficient (trop d'explosifs par exemple).
 - L'excavation mécanique par arrachage dans les roches très fracturée n'augmente, ni ne diminue la stabilité du talus.

Tableau.26. Paramètres d'ajustement du SMR (Romana ,1985).

Paramètres		Very favourable	Favourable	Normal	Unfavourable	Very infavourable
F1	P= $ \alpha_j - \alpha_s $ A = P ou T T= $ \alpha_j - \alpha_s - 180 $	>30°	30-20°	20-10°	10-5°	<5°
	P/T	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
F2	B = β_j	<20°	20-30°	30-35°	35-45°	>45°
	P	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
	T	1,00				
F3	P = $\beta_j - \beta_s$	>10°	10-0°	0°	0-(-10°)	<(-10°)
	T = $\beta_j + \beta_s$	<110°	110-120°	>120°	-	-
	P/T	0	-6	-25	-50-	-60
F4	Excavation method (F4)					
	Naturel slope	Presplitting	Smooth blasting	Blasting or Mechanical	Deficient blasting	
	+15	+10	+8	0	-8	
P planar ; T toppling ; α_j Dip Direction discontinuity ; α_s : Slope DIP direction, β_j : Dip discontinuity ; β_s : Dip Slope.						

En 2007, Tomas et al., ont proposée des nouvelles fonctions continues pour calculer les facteurs d’ajustement F1, F2 et F3. Ces fonctions montrent des différences absolues maximales avec des fonctions discrètes inférieures à 7 points et réduisent considérablement les interprétations subjectives. De plus, les fonctions proposées pour le calcul des facteurs de correction SMR permettent de réduire les doutes quant au score à attribuer aux valeurs proches de la limite de la classification discrète. Les fonctions de calculs des trois paramètres sont :

$$F1 = \frac{16}{25} - \frac{3}{500} \arctan\left(\frac{1}{10}(|A| - 17)\right)$$

Avec A est l’angle entre la direction de la discontinuité et direction talus.

$$F2 = \begin{cases} \frac{9}{16} - \frac{1}{195} \arctan\left(\frac{17}{100}B - 5\right) & \text{for planar and wedge failure} \\ 1, & \text{for toppling failure} \end{cases}$$

B est le pendage des joints

$$F3 = \begin{cases} -30 + \frac{1}{3} \arctan C & \text{for planar and wedge failure} \\ -13 - \frac{1}{7} \arctan(C - 120) & \text{for toppling failure} \end{cases}$$

C : est lié à la relation entre la pente du talus et le pendage des joints

IV.3.1.2. Stabilité et soutènement des talus selon SMR

Selon les valeurs SMR, Romana (1985) a défini cinq classes de stabilité, dans le tableau.27 Ceux-ci sont décrits dans le tableau.27, Il a déduit du tableau que les pentes avec une valeur inférieure à 20 SMR peuvent échouer très rapidement. Aucune pente n’a été enregistrée avec une valeur de SMR en dessous de 10, parce que cette pente ne pourrait exister physiquement A partir du SMR, il est alors possible d’estimer la stabilité du talus et de préconiser les méthodes de confortement (ancrages, boulons, béton projeté, etc.).

Tableau.27. Les différentes classes de stabilité en fonction du SMR (Romana,1985).

Classes	V	IV	III	II	I
SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
Description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
Stability	Completely unstable	Unstable	Partially Stable	Stable	Completely stable
Failures	Big planar soil-like	Planar Wedges	Big some joints or many wedges	Some blocks	None
Failures probability	0,9	0,6	0,4	0,2	0
Support	Re-excavation	Importante/ corrective	Systematic	Occasional	None

De nombreuses mesures correctives peuvent être prises pour soutenir une pente ont été proposées par Romana (1985) selon la valeur du SMR (voir tableau 28 et 29). Le système de classification SMR peut nous donner les différentes techniques supports pour chaque classe.

Tableau.28. Les suggestions de soutènement selon les classes de SMR

SMR classes	SMR values	Suggested supports
Ia	91-100	None
Ib	81-90	None, scaling is required
IIa	71-80	spot bolting (None, toe ditch or fence),
IIb	61-70	(Toe ditch or fence nets), spot or systematic bolting
IIIa	51-60	(Toe ditch and/or nets), spot systematic bolting, spot shotcrete,
IIIb	41-50	Toe ditch and/or nets), systematic bolting/anchors, systematic shotcrete, toe wall and/or dental concrete
IVa	31-40	anchors, systematic shotcrete, toe wall and/or concrete (or re excavation), drainage
IVb	21-30	systematic reinforced shotcrete, toe wall and/or concrete, re-excavation, deep drainage
Va	11-20	gravity or anchored wall, re-excavation

Les groupes de soutènement selon les classes de SMR sont donnés dans la figure suivante :

Tableau.29. Slope support guidelines based on SMR (Romana,1985).

SMR	8	10	20	25	30	40	45	50	55	60	65	70	75	80	90	100	
Reexcavation			Reexcavation walls														
Drainage			Surface drainage Deep drainage														
Concrete			shotcrete Dental concrete Ribs and/or heacs Tee walls														
Reinforcement			Bolts Anchors														
Protection							Toe ditch Toe or slope Fences Nets										
No Support														Sealing None			

IV.3.2. Étude de stabilité des talus rocheux par SMR

L'étude de stabilité des talus rocheux étudiés par SMR a été effectués selon deux approches :

- 1) Approche de Romana (1985)**, dont il prend directement la direction et le pendage des familles des discontinuités identifiées par l'étude structurale dans le calcul des paramètres d'ajustement F1, F2 et F3 et la valeur finale de SMR
- 2) Approche de Anbalagna et al., (1992)**, dont il prend en considération la direction et le pendage des familles des droites d'intersections des familles des discontinuités entre elles, qui sont identifiées par l'étude structurale, dans le calcul des paramètres d'ajustement F1,

F2 et F3 et la valeur finale de SMR. Exemple si on a 3 familles J1, J2 et J3, dans le calcul des paramètres F1, F2 et F3, Anbalagna et al., utilise la direction et le pendage de l'intersection de J1 avec J2, J1 avec J3 et J2 avec J3 au lieu de prendre les directions et le pendage de J1, J2 et J3

Pour les paramètres F1, F2 et F3 sont calculés selon la méthode de Romana (valeurs discrètes) et celle de Tomas et al., (2007) (valeurs continues)

Les deux tableaux 30 et 31 présentent le détail de calcul du SMR d'un talus selon les deux l'approche de Romana (1985) et de Anbalagna et al., (1992).

Tableau.30. *Détail du calcul de SMR du Talus TR 02 selon l'approche de Romana (1985).*

TR02 : Slope 300/30 - RMR = 65				
Paramètres	Jn1 : DIP direction/DIP : 70/40		Jn2 : DIP-Direction :20/DIP :50	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.20	0.15	0.15
F2	1.00	1.00	1.00	0.94
F3	-25.00	-23.22	-50	-45
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-4	-5	-8	-7
Angles	A	50°	A	80°
	B	40°	B	50°
	C	123°	C	-1°
SMR	61	60	57	58
Classe	II	III	III	III
Description	Good	Normal	Normal	Normal
Stabilité	Stable	Partially Stable	Partially Stable	Partially Stable
Rupture	Some blocks	Some joints many wedges	Some joints many wedges	Some joints many wedges
Support	Occasional	Systematic	Systematic	Systematic
Paramètres	Jn3 DIP-DIRECTION :50, DIP :40		Jn4 DIP-DIRECTION :110, DIP :90	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.16	0.70	0.85
F2	1.00	1.00	1.00	1.00
F3	00	-0.35	-25.00	-13.00
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	0.4	-18	-11
Angles	A	70°	A	10°
	B	40°	B	90°
	C	80°	C	120°
SMR	65	65	47	54
Classe	II	II	III	III
Description	Good	Good	Normal	Normal
Stabilité	Stable	Stable	Partially Stable	Partially Stable
Rupture	Some blocks	Some blocks	Some joints many wedges	Some joints many wedges
Support	Occasional	Occasional	Systematic	Systematic

Le détail du calcul de SMR des autres talus rocheux selon les deux approches est jointé dans l'annexe A.

Tableau.31. Détail du calcul de SMR du TR 01 selon l'approche de Anbalagna et al., (1992).

TR01 : Slope (260/40) – RMR = 50												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Direction :125 DIP :50						Jn2 avec Jn3 – DIP Direction :161 DIP :38					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.22			0.15			0.15		
F2	1.00			1.00			1.00			1.00		
F3	0.00			-0.42			0.00			-0.34		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.09			0			-0.05		
Angles	A	45°	B	50°	C	90°	A	81°	B	38°	C	78°
SMR	50			50			50			50		
Classe	III			III			III			III		
Description	Normale			Normale			Normale			Normale		
Stabilité	Partially stable			Partially stable			Partially stable			Partially stable		
Rupture	Some joints or many wedges			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges		
Support	systematic			systematic			systematic			systematic		
Jn1 avec Jn3 – DIP Direction :165.5 DIP :70												
Paramètres	Romana (1993)						Tomas (2007)					
	Angles			Angles			Angles			Angles		
F1	0.15			0.15			A	86°	B	70°	C	110°
F2	1.00			1.00			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F3	-6.00			-0.96			Stabilité			Stabilité		
F4	0			0			Partially stable			Partially stable		
F1*F2*F3	-1			-0.14			Rupture			Rupture		
SMR	49			50			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges		
Classe	III			III			Support			Support		
Description	Normale			Normale			Systematic			Systematic		

Les valeurs de SMR de chaque Talus et pour chaque famille de joints selon les deux approches sont regroupées dans les deux tableaux.32 Et 33.

Tableau.32. Les valeurs de SMR selon l'approche de Romana (1985).

Romana (1985)					Tomas (2007)				
	SMR	Classe	Description	Support		SMR	Classe	Description	Support
TR01									
Jn1	42	III	Normal	Systematic	Jn1	40	IV	Bad	Important /corrective
Jn2	49	III	Normal	Systematic	Jn2	50	III	Normal	Systematic
Jn3	32	IV	Bad	Important /corrective	Jn3	25	IV	Bad	Important /corrective
TR02									
Jn1	61	II	Good	Occasional	Jn1	60	III	Normal	Systematic
Jn2	57	III	Normal	Systematic	Jn2	58	III	Normal	Systematic
Jn3	65	II	Good	Occasional	Jn3	65	II	Good	Occasional
Jn4	47	III	Normal	Systematic	Jn4	54	III	Normal	Systematic
TR03									
Jn1	35	IV	Bad	Important /corrective	Jn1	35	IV	Bad	Important /corrective
Jn2	34	IV	Bad	Important/ corrective	Jn2	34	IV	Bad	Important/ corrective
Jn3	35	IV	Bad	Important/ corrective	Jn3	35	IV	Bad	Important/ corrective
Jn4	35	IV	Bad	Important/ corrective	Jn4	35	IV	Bad	Important/ corrective
TR04									
Jn1	33	IV	Bad	Important/ corrective	Jn1	33	IV	Bad	Important/ corrective
Jn2	14	V	Very bad	Reexcavation	Jn2	10	V	Very bad	Reexcavation
Jn3	35	IV	Bad	Important/ corrective	Jn3	35	IV	Bad	Important/ corrective
Jn4	31	IV	Bad	Important/ corrective	Jn4	28	IV	Bad	Important/ corrective
TR05									
Jn1	32	IV	Bad	Important/ corrective	Jn1	32	IV	Bad	Important/ corrective
Jn2	33	IV	Bad	Important/ corrective	Jn2	33	IV	Bad	Important/ corrective
Jn3	32	IV	Bad	Important/ corrective	Jn3	30	IV	Bad	Important/ corrective
Jn4	29	IV	Bad	Important/ corrective	Jn4	31	IV	Bad	Important/ corrective
Jn5	29	IV	Bad	Important/ corrective	Jn5	29	IV	Bad	Important/ corrective
TR06									
Jn1	33	IV	Bad	Important/ corrective	Jn1	33	IV	Bad	Important/ corrective
Jn2	15	V	Very Bad	Reexcavation	Jn2	15	V	Very Bad	Reexcavation
Jn3	33	IV	Bad	Important/ corrective	Jn3	33	IV	Bad	Important/ corrective

Tableau.33. Les valeurs de SMR selon l'approche Anbalagna et al., (1992),

Romana (1985)					Tomas (2007)			
Wedge	SMR	Classe	Description	Support	SMR	Classe	Description	Support
TR01								
Jn1 avec Jn2	50	II	Normale	Systematic	50	II	Normale	Systematic
Jn2 avec Jn3	50	III	Normale	Systematic	50	II	Normale	Systematic
Jn1 avec Jn3	49	III	Normale	Systematic	50	III	Normale	Systematic
TR02								
Jn1 avec Jn2	65	II	Good	Occasional	65	II	Good	Occasional
Jn1 avec Jn3	65	II	Good	Occasional	65	II	Good	Occasional
Jn1 avec Jn4	62	II	Good	Occasional	61	II	Good	Occasional
Jn2 avec Jn3	65	II	Good	Occasional	65	II	Good	Occasional
Jn2 avec Jn4	65	II	Good	Occasional	65	II	Good	Occasional
Jn3 avec Jn4	64	II	Good	Occasional	64	II	Good	Occasional
TR03								
Jn1 avec J2	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec Jn3	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec J4	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn3	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn4	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn3 avec Jn4	33	IV	Bad	Importante/corrective	32	IV	Bad	Importante/corrective
TR04								
Jn1 avec Jn2	34	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec Jn3	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec J4	35	IV	Bad	Importante/corrective	35	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn3	18	V	Very Bad	Reexcavation	15	V	Very Bad	Reexcavation
Jn2 avec Jn4	31	IV	Bad	Importante/corrective	27	IV	Bad	Importante/corrective
Jn3 avec Jn4	25	IV	Bad	Importante/corrective	24	IV	Bad	Importante/corrective
TR05								
Jn1 avec Jn2	33	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec Jn3	25	IV	Bad	Importante/corrective	22	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec Jn4	30	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec J5	16	V	Very Bad	Reexcavation	14	V	Very Bad	Reexcavation
Jn2 avec Jn3	32	IV	Bad	Importante/corrective	30	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn4	33	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn5	29	IV	Bad	Importante/corrective	29	IV	Bad	Importante/corrective
Jn3 avec Jn4	29	IV	Bad	Importante/corrective	26	IV	Bad	Importante/corrective
Jn3 avec Jn5	29	IV	Bad	Importante/corrective	29	IV	Bad	Importante/corrective
Jn4 avec Jn5	33	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
TR06								
Jn1 avec Jn2	32	IV	Bad	Importante/corrective	30	IV	Bad	Importante/corrective
Jn2 avec Jn3	33	IV	Bad	Importante/corrective	33	IV	Bad	Importante/corrective
Jn1 avec Jn3	29	IV	Bad	Importante/corrective	29	IV	Bad	Importante/corrective

D'après les résultats de SMR obtenus par l'approche de Romana (1985) (tableau.32) le talus TR01 est partiellement stable et la famille de joint Jn2 a provoqué leur instabilité, par contre le talus TR02 est stable. Le reste des talus TR03, TR04, TR05 et TR06 sont instables

En revanche les valeurs de SMR obtenues par l'utilisation de l'approche de Anbalagna et al., (1992) ont montré que les deux talus TR01 et TR02 sont stable et le restes des talus sont instables, donc pour les deux talus TR01 et TR02 aucun risque de rupture en mode wedge.

En vue de l'instabilité des talus TR03 et TR04, TR05 et TR06, selon SMR, les soutènements recommandés sont le béton projeté renforcé, mur de soutènement ou excavation et drainage profond

IV.4. Étude de stabilité par l'approche analytique : équilibre limite

En vue de valider les résultats trouvés par l'approche cinématique et empirique ; l'étude de stabilité en utilisant la méthode d'équilibre limite c'est avéré l'un des meilleurs moyens permettant d'atteindre cet objectif.

Le calcul de stabilité a été effectué par le logiciel SILDE du Rocsciences, qui est conçu pour l'analyse de la stabilité des pentes naturelles, les remblais, les barrages en terre et les talus et bord de mines. Ce programme a la capacité d'analyser à la fois une surface de rupture non circulaire définie par l'utilisateur et la recherche de la surface de rupture minimale non circulaire. Slide a une interface graphique qui fournit un large éventail de modélisation et d'interprétation de données de fonctionnalités (slide, 2016).

Slide comporte plusieurs méthodes d'analyse d'équilibre, d'où l'utilisateur peut sélectionner une ou toutes les méthodes d'analyse qui seront exécutées lors de la phase de calcul.

Les résultats affichés par silde sont graphiques telles que : une surface de glissement avec le facteur de sécurité le plus bas ; Toutes les surfaces de glissement sont codées par couleur en fonction du facteur de sécurité qui varie en fonction de la méthode d'analyse choisie.

Le calcul de stabilité par la méthode d'équilibre est effectué pour deux talus, à savoir :

- TR01 : flysch Numidien, stable selon l'analyse cinématique et SMR
- TR05 : Flysch Massylien : instable selon l'analyse cinématique et SMR

IV.4.1. Données d'entrés

Généralement les paramètres considérés lors les calculs de stabilité par la méthode d'équilibre sont : la géométrie des talus, caractéristiques géotechniques de terrain et les charges

Les valeurs de résistance de la roche intacte (σ_{ci}) ont été pondérées selon l'approche (Marinos, 2011) comme suit :

Tableau.34. Estimation de la résistance à compression de la roche intact (σ_{ci}) des masses rocheuses en fonction de la typologie du Flysch (Marinos, 2011).

Unité Géotechnique (UG)	Flysch type (Marinos,2011) GSI	Proportions des valeurs pour les propriétés de la roche intacte	σ_{ci} [MPa]
Ug1	X-IX	Réduire du 20% les valeurs des grés + toutes les valeurs de marnes/argiles.	8-30
Ug2	VII-VIII	Réduire du 20% les valeurs des grés + toutes les valeurs de marnes/argiles.	40-70

Les caractéristiques géotechniques des différentes formations des deux talus et les lois de comportements adoptés sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.35. Paramètres d'entrées

TR 01 : flysch Numidien						
GSI	Paramètres mécaniques				Remaniement	Loi de comportement
	Ug	C	Phi	σ_{ci} KPa	D	
55 - 65	Uf	10	29°	-	-	Mohr – Colomb
	Ug2b	-	-	14000	0.7	Hoek and Brown
Ug2	-	-	50000	0.7		
TR 05 : Flysch Massylien						
GSI	Paramètres mécaniques				Remaniement	Loi de comportement
	Ug	C	Phi	σ_{ci}	D	
-	Uf	10	29°	-	-	Mohr – Colomb
	Uf1	5	28°	-	-	
30	Ug1a	-	0.7	8000	0.7	Hoek and Brown
	Ug1b	-	0.7	15000	0.7	

La géométrie des deux talus est donnée sur les figures.33 Et 34

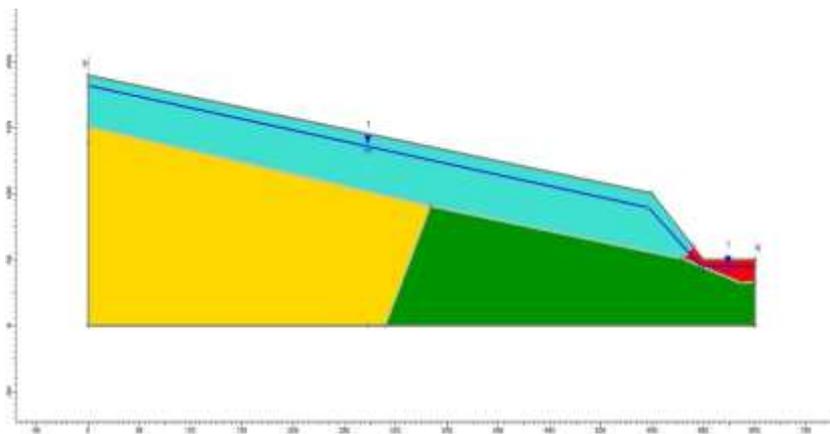


Figure.33. Géométrie du talus TR01

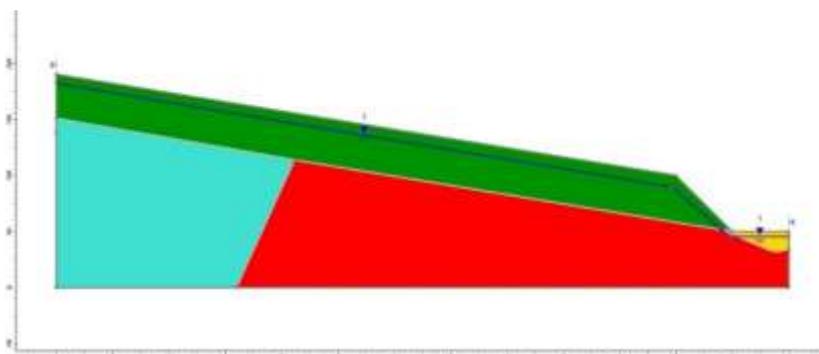


Figure.34. Géométrie du talus TR05

IV.4.2. Calculs de stabilité

Le calcul de stabilité a été effectué pour le cas naturel du talus selon les méthodes ordinary/fellenius, bishop simplified janbu simplified et spencer. Les FS obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.36. Coefficients de sécurité obtenus à l'état naturel

PK	Facteur de sécurité (Fs) État naturel				Commentaires
	Ordinary/ Fellenius	Bishop Simplified	Janbu Simplified	Spencer	
TR01	1.260	1.104	1.069	1.104	Stable à douteux
TR02	0.790	0.752	0.734	0.752	Instable

IV.4.3. Calculs de stabilité après confortement

En vue de la nature rocheuse des deux talus, et pour assurer leurs stabilités dans les conditions les plus défavorables, les techniques de confortements proposés sont : tirants d'ancrage sont optés comme technique de confortement placés dans la partie amont du talus, Reprofilage, drainage et et un soutènement type berlinoise, réalisé avec pieux $\varnothing 1200$ mm, tirants d'ancrage

Après l'installation des moyens de confortements proposés, un nouveau calcul de stabilité est lancé pour vérifier la fiabilité de ces techniques dans l'amélioration de la stabilité des talus

Les tirant d'ancrage choisis sont ceux disponibles sur le marché, dont leurs caractéristiques sont données dans le tableau suivant :

Tableau.37. Les caractéristiques des tirants d'ancrages

Force appliqué	Espacement en (m)	Capacité de traction (KN)	Capacité de la plaque (KN)	Capacité de cisaillement (KN)	Capacité de compression (KN)	Longueur de liaison en (m)	Pourcentage de longueur (%)	La force de liaison (KN/m)
Active (Méthode)	1.5	400	450	100	0	0	10	50

Le calcul de stabilité après la disposition des moyens de confortements est effectué selon deux variantes à savoir :

- **Variante 01** : Calcul de stabilité dans le cas statistique : sans effet sismique avec la charge du trafic routier
- **Variante 02** : Calcul de stabilité dans le cas dynamique : effet sismique avec la charge du trafic routier

Les résultats de calculs sont donnés sur les figures suivantes

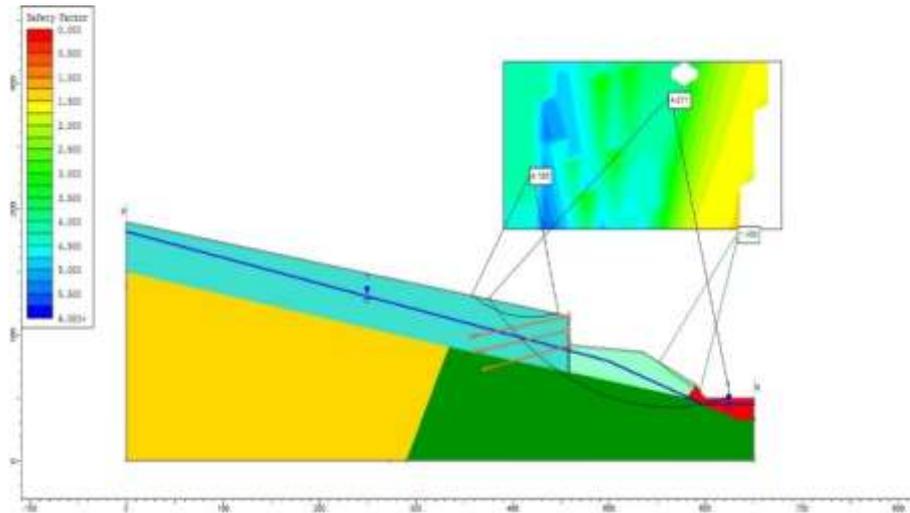


Figure.35. Résultats de calcul après confortements du talus TR01 – variante 01

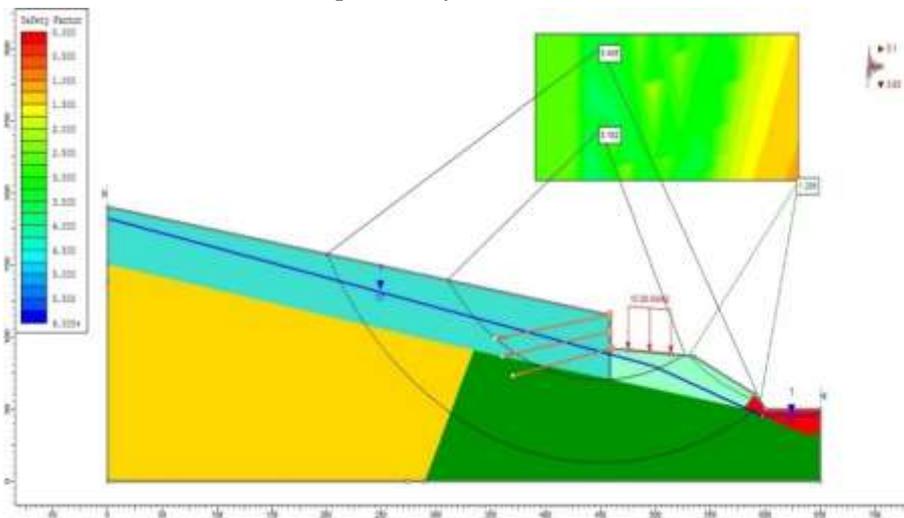


Figure.36. Résultats de calcul après confortements du talus TR01 – variante 01

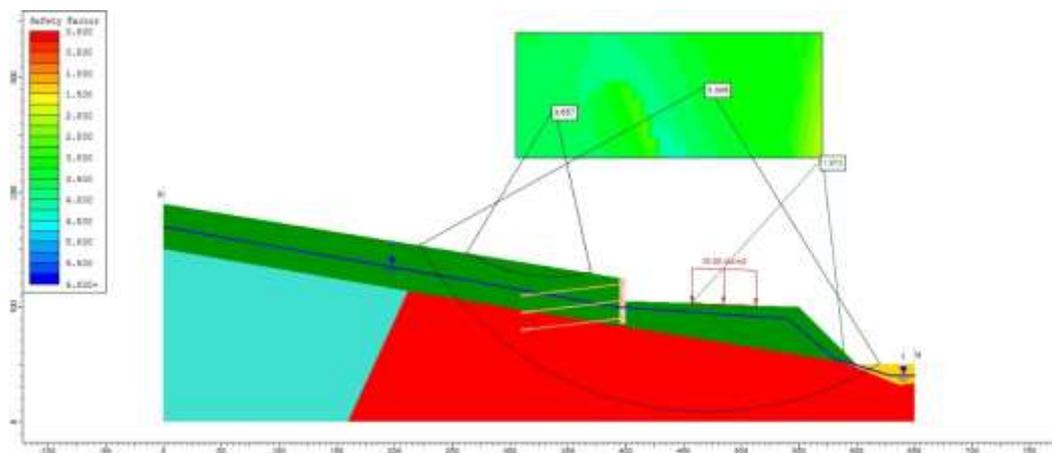


Figure.37. Résultats de calcul après confortements du talus TR05 – variante 02

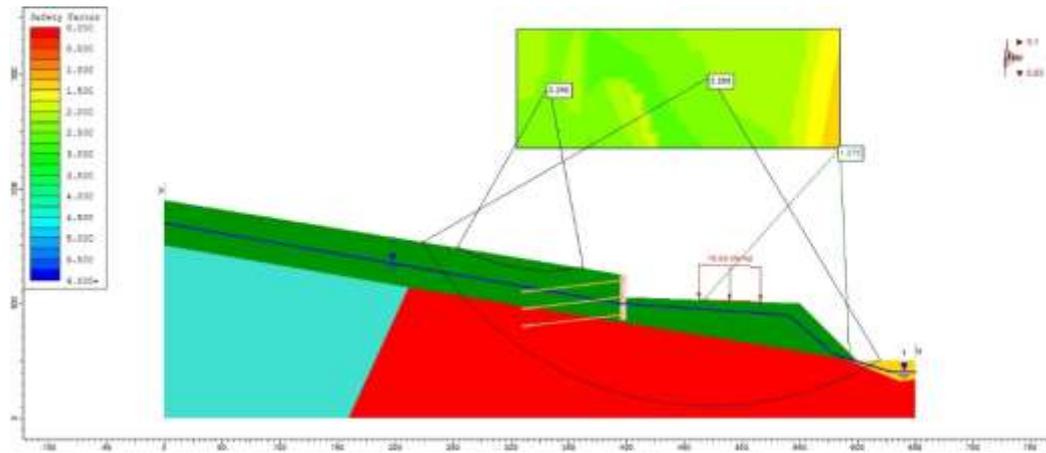


Figure.38. Résultats de calcul après confortements du talus TR05 – variante 02

Les valeurs de FS obtenus pour les deux variantes sont regroupées dans le tableau suivant

Tableau.38. Résultats de calcul de stabilité

	Facteur de sécurité (Fs) État final				
	Variante 01 : Sans l'effet sismique				
	Ordinary/ fellenius	Bishop simplified	Janbu simplified	Spencer	Commentaires
TR01	1.446	1.458	1.446	1.454	Stable
TR05	1.906	1.973	1.898	1.970	Stable
Variante 02 : Avec l'effet sismique					
TR01	1.185	1.206	1.183	1.203	Stable
TR05	1.235	1.275	1.216	1.279	Stable

D'après les résultats obtenus, les conclusions qui peuvent dégager sont :

- Sur l'ensemble des analyses de stabilité au glissement effectuées pour la détermination du cercle de glissement critique à l'état naturel, pour les deux talus TR01 et TR02, nous a permis de constater que les coefficients de sécurité obtenus sont nettement inférieurs ou égales à 1 ($FS \geq 1$), alors ils caractérisent des versant douteux voir instables.
- L'analyse de la stabilité à l'état statique après le confortement adopté est marquée par l'amélioration des coefficients de sécurité supérieurs aux spécifications des $FS > 1.4$ et caractérisant des versants stables
- Les valeurs de FS pour une analyse dynamique (effet de séisme) sont largement supérieures à 1.0 (versant stable),

IV.5. Conclusion

L'analyse de stabilité des talus rocheux par les deux approches, analyse cinématique et empirique, ont aboutis à des résultats similaires, alors on peut conclure que la stabilité des talus rocheux est contrôlée par les discontinuités.

L'étude de stabilité par l'approche analytique a validé résultats obtenus par les autres approches ce qui indique que ces approches sont efficaces dans l'analyse de stabilité des talus rocheux.

Les coefficients de sécurités obtenus après le confortement sont largement supérieurs à 1, donc les tirants d'ancrage sont des techniques de confortement très efficaces et fortement recommandés dans le cas des talus rocheux

Conclusion générale et recommandations

Le travail que nous avons réalisé dans ce mémoire concerne l'étude de stabilité de six talus rocheux localisés entre le PK 18 et PK 24 sur la pénétrante autoroutière Djendjen –El-Eulma, dont elle a été faite dans le cadre d'expliquer et de comprendre les paramètres déclenchant et contrôlant l'instabilité rocheuse en utilisant trois approches : géométrique et empirique, et analytique afin de proposer des solutions techniques adéquates

Les résultats trouvés par notre étude nous ont permis de ressortir les conclusions suivantes :

- De point de vue géologique les talus rocheux sont formés par des masses rocheuses hétérogène type flysch, dont les talus rocheux TR01 et TR02 localisés entre le PK 18 et pk 22 sont occupée principalement par les formations du flysch Numidien (Ug2), alternance de grès et argilites. Le reste des talus (TR03, TR04, TR05 et TR06) localisés entre le PK 22 et le PK 24 sont formés par les formations du flysch Massylien (Ug1), alternance de grès quartzitique et argilites,
- La perméabilité des masses rocheuse est faible à très faible
- Le traitement statistique des données structurales par logiciel dips nous a permis d'identifier les familles dominantes des discontinuités à savoir :
 - Le flysch Numidien est recoupé par trois familles des discontinuités et parfois quatre familles.
 - Le flysch Massylien est caractérisé très souvent par la présence de quatre à cinq familles de joints.
- La caractérisation des discontinuités qui est effectuée selon les recommandations d'ISRM, nous a permis de constater que :
 - Les discontinuités recoupant le flysch massylien sont caractérisées par un très faible espacement, une persistance très faible. Leurs épontes sont lisses, partiellement ouvertes et moyennement altérées,
 - Et celles traversant le flysch numidien sont caractérisées par un espacement faible à moyen, une persistance faible à moyenne. Leurs épontes sont rapprochées, légèrement altérées et rugueuses.
- La qualité des talus rocheux a été évaluée par deux systèmes RMR₈₉ et GSI, qui ont aboutis aux mêmes résultats :
 - **Flysch Massylien (Ug1) : mauvaise qualité**
 - **Flysch numidien : Ug2a (grès) bonne qualité**
Ug2b : moyenne qualité (alternance entre grès et argilite)

- L'analyse de stabilité par les deux approches géométrique (analyse cinématiques) et empirique (système SMR) ont aboutis à des résultats similaires, dont ils ont montré que la stabilité des talus rocheux est quasiment contrôlée par les discontinuités.
- L'étude de stabilité de quelques talus rocheux par les deux autres approches (géométrique et empirique) SILDE a validé les résultats obtenus par l'approches géométriques et l'approche empirique
- Les coefficients de sécurités obtenus par l'étude de stabilité effectué par SLIDE, à l'état statique et dynamique, sur les techniques de confortements optés (les tirants d'ancrage, modification géométrique du talus (reprofilage) et drainage des eaux), sont largement supérieurs aux spécifications.

À la lumière des résultats obtenus par notre travail, les recommandations proposées sont :

- L'installation des ouvrages de soutènement pour assurer la stabilité des talus rocheux est fortement recommandé, dont il faut les choisir et les opter sur la base sur des résultats obtenus par la campagne de reconnaissance et les analyses de stabilité selon différentes approches, dont les tirant d'ancrages sont considérés comme des techniques de confortement efficaces et fortement recommandé dans le cas des talus rocheux.
- Il n'existe pas de recettes standards ni de solutions de routine qui permettent d'obtenir systématiquement la bonne réponse aux problème posés dans les études de stabilité des talus rocheux. Alors, Il importe donc de mettre en place des méthodologies bien maîtrisées qui sont basées directement sur l'approche géologique, et donc structurale, et l'approche géomécanique (caractérisation rigoureuse des discontinuités)
- Il est fortement recommandé d'analyser la stabilité des talus rocheux par les approches géométriques et empiriques notamment dans les phases préliminaires, ou de construction des projets en vue de leurs rapidités, et la fiabilité de leurs résultats et moins couteux

Références bibliographiques

- Ahmed, A., 2012.** Étude numérique et confortement d'un glissement de terrain sur la RN 12. Mémoire d'ingénieur, école national polytechnique, El-harrach.
- Anbalagan, R., et Sharma, S., & Raghuvanshi, T K.,1992.** Rock mass stability evaluation using modified SMR approach. In *Proceedings 6th Natural Symposium on Rock Mechanics* (pp. 258-268).
- Bouillin, JP., 1977.** Géologie alpine de la petite Kabylie dans la region de "Collo" et "d'El Milia" (Algérie). Thèse Doctorat.
- Bouillin, JP., 1970.** Définition d'un flysch massylien et d'un flysch maurétanien au sein de flyschs allochtones de l'Algérie. C.R. Acad. Sci. Paris (D). T270, série D. P 2249-2252.
- Bouillin, JP et Raoult, JF., 1971.** Présence sur le socle Kabyle du constantinois.
- Bouillin, JP.,1979.** La transversale de Collo et d'El-Milia (Petite Kabylie): une région- clef pour l'interprétation de la tectonique Alpine de la chaîne littorale d'Algérie. Thèse. Paris. Mém. Soc. Géol. France. Nouv. Série. L VII, n°135, 84P.
- Blondeau, F., Mars 1976.** Les méthodes d'analyse de stabilité. Bull. Labo.
- Bieniawski, Z T.,1989.** "Engineering rock mass classifications a complete manual forengineers and geologists in mining, civil and petroleum engineering ", New-York, WileyInterscience.
- Bendadouche, H., et LAZIZI, S., 2013.** Glissement de terrain et confortement. Pages bleues.
- Barton, N., & Choubey, V.,1977.** The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, 10(1-2), 1-54.
- Barton, N., et Al., 1974.** "Engineering classification of Rock Masses for the Designe ", support. *Rock Mechanics*, Vol 6, p.189-206.
- Colas., et Pilot.,** Description et classification des glissements de terrain.
- CFMS.,1995.** Tirants d'ancrage : recommandations.
- Durville, JL., et Sève, G.,** glissement en terrain meuble, techniques de l'ingénieur, article C254.
- Durville, JL., et Sève, G.,** glissement en terrains meuble. Technique de l'ingénieur.
- Djellit, H., 1989.** Structure de la Petite Kabylie occidentale (Algérie) flyschs ultra et flyschs externes. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 309, Se, P1191-1196.
- Djellit, H., 1987.** Evolution tectono-métamorphique du socle Kabyle et polarité de mise en place des nappes de flyschs en Petite Kabylie occidentale (Algérie). Thèse Doct. Univ d'Orsay Paris, 206 P.

Références bibliographiques

- Delage, P., et CUI, Y.J.,** « Comportement mécaniques des sols non saturés » C302 ; Technique de l'ingénieur, traité construction ; 19 pages ; 1999.
- Espie, L., 1996.** Étude expérimentale et modélisation numérique », Thèse doctorat, Université de Liège.
- Filliat, G., 1981.** La pratique des sols et fondations, Ed. le moniteur, Paris
- Hoang, T T N.,2010.** « Etude du comportement d'un milieurocheux fracturé », Thèse doctorat de l'école des ponts Paris Tech.
- Hoek E., & Bray, J., (1974).** Rock slope engineering. London: Gresham.
- ISRM 1981.** International Society For Rock Mechanics. *Rock characterization testing & [and] monitoring: ISRM suggested methods.* Pergamon Press, 1981.
- Guzzetti., et al., 1999.** Inst.di Ricerca per la Protezione Idrogeologica nell'Italia Centrale, CNR, Via della Madonna Alta 126, 06128 Perugia, Italy Centro di studio per L'informativa edi sistemi de telecomunicazioni, CNR, Viale Risorgimento 2, 40136, Bologna, Italy.
- Khelil, N., et Senad, B., 2014.** Etude de stabilité, modélisation et confortement du glissement de terrain de la cité des 50 logements MEZGHITANE (JIJEL). Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 96 p
- Kentouri, Y., et Maafa, S.,2016.** Etude de stabilité et de confortement du glissement de terrain sur la rn 24 au pk 220+000, Memoire de fin d'études, Université Abderrahmane MIRA De Bejaia
- Kabou, Y., et. Merad, L.,2013.** Etude de stabilité et de confortement du glissement de terrain de targua ouzemour, Memoire de fin d'études, Université Abderrahmane mira de Bejaia.
- Masekanya, J P.,2008.** « Stabilité des pentes et saturation partielle.
- M'zoughem, K., et Chenafa, W.,2006.** Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kebira (Sétif). Mémoire d'Ingénieur , Univ. Ferhat Abbas Sétif.
- Palmstrom, A., 2005.** Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD). *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(4), 362-377.
- Palmström, A., 2000.** Récent développements in rock support estimâtes by the RMI. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, 6(1), 1-19.
- Romana, M., 1993.** SMR classification. In: *Proceedings of the 7th ISRM International Congress on Rock Mechanics.* Rotterdam : A Balkema, Aachen, p 955–960
- Romana, M., 1985.** New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In: *Mechanics IS of R (ed) Proceedings of the International Symposium on the*

Role of Rock Mechanics in Excavations for Mining and Civil Works. Zacatecas, p 49–53

Rat, M.,1975. Drainage. Rabattement. Techniques de l'Ingénieur, traité

Raoult, JF.,1974. Géologie du centre de la chaîne Numidique (nord du constantinois) Thèse Paris. Mém. Soc. Géol., France, Nouv. Série, LIII, n°21.

Raoult, JF.,1972. Précisions sur le flysch massylien : séries stratigraphiques, variations de faciès, nature du matériel remanié (Nord du Constantinois). Bull. Soc. Hist, nat, Afr, Nord, Alger, P73-9

Raoult, JF.,1969. Relation entre la dorsale Kabyle et les flyschs sur la transversale de Dj. Rhédir, phase tangentielle Eocène, paléogéographie (Nord Constantinois, Algérie). Bull. Soc. Géol. France (7), XI, Paris. P523-543.

Sanat, A., et Zidani, N., 2015. Etude géotechnique de la stabilité des talus dans la carrière de Ain El Kebira (Sétif). Université Abderrahmane Mira de Bejaia.

Schlosser, f., et Unterreiner, Ph., 1994. Renforcement des sols par inclusion, technique de l'ingénieur, article C245

Sève, G., & Pouget, P., 1998. Stabilisation des glissements de terrain. Guide technique. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris,16 p.

Smahi, A., et Zeghar, Z., (2015). Etude et confortement du glissement de terrain au niveau de l'évitement de la ville de Kherrata wilaya de Béjaia mémoire mastre deux universté de Béjaia Page (18 à 29)

Tomás, R., Cano, M., Cañaveras, JC., Cuenca, A., Delgado, J., Estévez, A., Pina, JA., Nuevas funciones continuas para el cálculo del Slope Mass Rating (SMR): aplicación mediante un sistema de información geográfica a los taludes rocosos de una cantera. Revista de la Sociedad Geológica de España, 19, 87-97, 2006, mémoire master

Vila, J M., 1980. La chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. Thèse Doctorat. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI) ,3 vol, Paris. 663 p.

Wildi, W.,1983. La chaîne Tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie, évolution du Trias au miocène REV. Géol. Dyn. Geographys ;2

Wylie, D C., 2018. *Rock slope engineering: civil applications 5th edition.* CRC Press.

Site web

Insti tut des Risques Majeurs, 2008 :

http://www.mementodumaire.net/01risques_naturels/RN4.htm

www.topographi.blogspot.com.

www.prim.net

Références bibliographiques

Annexes

Annexes A : Détail de calcul du SMR selon l'approche de Romana, 1985

Annexes B : Détail de calcul du SMR selon l'approche de

Annexes A

Détail de calcul du SMR selon l'approche de Romana, 1985

Tableau 01. Détail de calcul du SMR des deux talus TR01 et TR02

TR01 : Slope (260/40) – RMR = 50				
Paramètres	Jn1 (210/50)		Jn2 160 /70	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.20	0.15	0.15
F2	1.00	0.94	1.00	0.98
F3	-50	-51.14	-6.00	-0.96
0.1F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-8	-10	-1	-0.14
Angles	A	50°	A	80°
	B	50°	B	70°
	C	-2°	C	110°
SMR	42	40	49	50
Classe	III	IV	III	III
Description	Normal	Bad	Normal	Normal
Stabilité	Partially Stable	Unstable	Partially Stable	Partially Stable
Rupture	Some joints many wedges	Planar or big wedges	Some joints many wedges	Some joints many wedges
Support	systematic	Important /corrective	systematic	systematic
Jn3 (250/88)				
Paramètres	Romana (1993)	Tomas (2007)	Angles	
F1	0.70	0.85	A	10°
F2	1.00	0.95	B	88°
F3	-25.00	-30.00	C	0°
F4	0	0		
F1*F2*F3	-18	-25		
SMR	32	25		
Classe	IV	IV		
Description	Bad	Bad		
Stabilité	Unstable	Unstable		
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges		
Support	Important/corrective	Important/corrective		
TR02 : slope 300/30 - RMR = 65				
Paramètres	Jn1 : DIP direction/DIP : 70/40		Jn2 : DIP-Direction :20/DIP :50	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.20	0.15	0.15
F2	1.00	1.00	1.00	0.94
F3	-25.00	-23.22	-50	-45
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-4	-5	-8	-7
Angles	A	50°	A	80°
	B	40°	B	50°
	C	123°	C	-1°
SMR	61	60	57	58
Classe	II	III	III	III
Description	Good	Normal	Normal	Normal
Stabilité	Stable	Partially Stable	Partially Stable	Partially Stable
Rupture	Some blocks	Some joints many wedges	Some joints many wedges	Some joints many wedges
Support	Occasional	systematic	systematic	systematic
Paramètres	Jn3 DIP-DIRECTION :50, DIP :40		Jn4 DIP-DIRECTION :110, DIP :90	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.16	0.70	0.85
F2	1.00	1.00	1.00	1.00
F3	00	-0.35	-25.00	-13.00
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	0.4	-18	-11
Angles	A	70°	A	10°
	B	40°	B	90°
	C	80°	C	120°
SMR	65	65	47	54
Classe	II	II	III	III
Description	Good	Good	Normal	Normal
Stabilité	Stable	Stable	Partially Stable	Partially Stable
Rupture	Some blocks	Some blocks	Some joints many wedges	Some joints many wedges
Support	Occasional	Occasional	systematic	systematic

Tableau 02. Détail de calcul du SMR des deux talus TR03 et TR04

TR03 / slope :260/50 - RMR = 35				
Paramètres	Jn1/DIP-DIRECTION :65 DIP :25		Jn2/DIP-DIRECTION :130 DIP :30	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.70	0.71	0.15	0.20
F2	1.00	1.00	1	1
F3	0.00	-0.32	0.00	-0.35
0.1F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	-0.23	0	-0.07
Angles	A	15°	A	50°
	B	25°	B	30°
	C	75°	C	80°
SMR	35	35	34	34
Classe	IV	IV	IV	IV
Description	Bad	Bad	Bad	Bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Unstable	Unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or bigwedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective
Paramètres	Jn3/ DIP-DIRECTION :320 DIP :85		Jn4/ DIP-DIRECTION :190 DIP :62	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.18	0.15	0.16
F2	1	0.99	1	0.97
F3	0	-0.55	0	-1.59
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	-0.097	0	-0.25
Angles	A	60°	A	70°
	B	85°	B	62°
	C	35°	C	12°
SMR	35	35	35	35
Classe	IV	IV	IV	IV
Description	Bad	Bad	Bad	Bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Unstable	Unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective
TR04/ slope :220/40 RMR:35				
Paramètres	Jn1 /DIP-DIRECTION :20 DIP :70		Jn2 /DIP-DIRECTION :220 DIP:38	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.40	0.54	1	1
F2	1	1	0.85	0.85
F3	-6	-2.15	-50	-30
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-2	-1	-21	-25
Angles	A	20°	A	0°
	B	70°	B	38°
	C	116°	C	0°
SMR	33	34	14	10
Classe	IV	IV	V	V
Description	Bad	Bad	Very bad	Very bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Completely unstable	Completely unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Big planar or soil-like	Big planar or soil-like
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	reexcavation	reexcavation
Paramètres	Jn3/DIP-DIRECTION :280 DIP :80		Jn4/ DIP-DIRECTION :165 DIP :30	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.18	0.15	0.19
F2	1	0.99	0.40	0.59
F3	0	-0.55	-60	-59.05
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	-0.09	-4	-7
Angles	A	60°	A	55°
	B	80°	B	30°
	C	35°	C	-25°
SMR	35	35	31	28
Classe	IV	IV	IV	IV
Description	Bad	Bad	Bad	Bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Unstable	Unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective

Tableau 03. Détail de calcul du SMR des deux talus TR05 et TR06

TR05 / slope :225/45 /RMR=33				
Paramètres	Jn1 DIP-DIRECTION :300 DIP :48		Jn2 DIP-DIRECTION :340 DIP:10	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.16	0.15	0.17
F2	1	0.93	1.00	1.00
F3	-6	-6.14	0.00	-0.28
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-1	-1	0	-0.04
Angles	A	75°	A	65°
	B	48°	B	10°
	C	3°	C	60°
SMR	32	32	33	33
Classe	IV	IV	IV	IV
Description	Bad	Bad	Bad	Bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Unstable	Unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective
Paramètres	Jn3 /DIP-DIRECTION :180 DIP :15		Jn4/ DIP-DIRECTION :120 DIP :70	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.22	0.15	0.16
F2	0.15	0.21	1.00	1.00
F3	-60	-59.45	-25.00	-13.00
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	-1	-3	-4	-2
Angles	A	45°	A	25°
	B	15°	B	70°
	C	35°	C	125°
SMR	32	30	29	31
Classe	IV	IV	IV	IV
Description	Bad	Bad	Bad	Bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Unstable	Unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Planar or big wedges
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective	Important/ corrective
Jn5 / DIP-DIRECTION : 340 DIP:89				
Paramètres	Romana (1993)	Tomas (2007)	Angles	
F1	0.15	0.17	A	25°
F2	1.00	1.00	B	70°
F3	-25.00	-25.27	C	125°
F4	0	0		
F1*F2*F3	-4	-2		
SMR	29	31		
Classe	IV	IV		
Description	Bad	Bad		
Stabilité	Unstable	Unstable		
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges		
Support	Important/ corrective	Important/ corrective		
TR06 slope :265/10 RMR=34				
Paramètres	Jn1/DIP-DIRECTION :25 DIP :56		Jn2/DIP-DIRECTION :280 DIP :50	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	Romana (1993)	Tomas (2007)
F1	0.15	0.18	0.70	0.71
F2	1	1	1.00	0.94
F3	0.00	-0.57	-25.00	-30.00
F4	0	0	0	0
F1*F2*F3	0	0	-18	-20
Angles	A	60°	A	15°
	B	56°	B	50°
	C	101°	C	0°
SMR	33	33	15	13
Classe	IV	IV	V	V
Description	Bad	Bad	Very bad	Very bad
Stabilité	Unstable	Unstable	Completely unstable	Completely unstable
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges	Big planar or soil-like	Big planar or soil-like
Support	Important/ corrective	Important/ corrective	reexcavation	reexcavation
Paramètres	Jn3/ DIP-DIRECTION :110 DIP:45		Angles	
	Romana (1993)	Tomas (2007)	A	25°
F1	0.40	0.41	B	45°
F2	1.00	1.00	C	90°
F3	0.00	-0.42		
F4	0	0		
F1*F2*F3	0	-0.17		
SMR	33	33		
Classe	IV	IV		
Description	Bad	Bad		
Stabilité	Unstable	Unstable		
Rupture	Planar or big wedges	Planar or big wedges		
Support	Important/ corrective	Important/ corrective		

Annexes B

Détail de calcul du SMR selon l'approche de

Tableau 04. Détail de calcul du SMR des deux talus TR01 et TR02

TR01 : Slope (260/40) – RMR = 50												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Direction :125 DIP :50						Jn2 avec Jn3 – DIP Direction :161 DIP :38					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.22			0.15			0.15		
F2	1.00			1.00			1.00			1.00		
F3	0.00			-0.42			0.00			-0.34		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.09			0			-0.05		
Angles	A	45°	B	50°	C	90°	A	81°	B	38°	C	78°
SMR	50			50			50			50		
Classe	III			III			III			III		
Description	Normale			Normale			Normale			Normale		
Stabilité	Partially stable			Partially stable			Partially stable			Partially stable		
Rupture	Some joints or many wedges			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges		
Support	systematic			systematic			systematic			systematic		
Jn1 avec Jn3 – DIP Direction :165.5 DIP :70												
Paramètres	Romana (1993)			Tomas (2007)			Angles					
	F1	0.15			0.15			A	86°	B	70°	C
F2	1.00			1.00			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F3	-6.00			-0.96			Stabilité			Stabilité		
F4	0			0			Partially stable			Partially stable		
F1*F2*F3	-1			-0.14			Rupture			Rupture		
SMR	49			50			Some joints or many wedges			Some joints or many wedges		
Classe	III			III			Support			Support		
Description	Normale			Normale			systematic			systematic		
TR02 : slope 300/30 - RMR = 65												
Paramètres	Jn1 avec Jn2– DIP Direction :66 DIP :39.5						Jn1 avec Jn3 – DIP Direction :64 DIP :39					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.15			0.15			0.15		
F2	1			1			1.00			1.00		
F3	0			-0.30			0.00			-0.30		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.04			0			-0.04		
Angles	A	84°	B	40°	C	70°	A	86°	B	39°	C	69°
SMR	65			65			65			65		
Classe	II			II			II			II		
Description	Good			Good			Good			Good		
Stabilité	Stable			Stable			Stable			Stable		
Rupture	Some blocks			Some blocks			Some blocks			Some blocks		
Support	Occasional			Occasional			systematic			systematic		
Paramètres	Jn1 avec Jn4 – DIP Drection :20 DIP :34						Jn2 avec Jn3 – DIP Drection :68 DIP :38.6					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.20			0.15			0.15		
F2	0.40			0.34			1.00			1.00		
F3	50.00			-56.85			0.00			-0.30		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-3			-4			0			-0.04		
Angles	A	50°	B	24°	C	-6°	A	82°	B	39°	C	69°
SMR	62			61			65			65		
Classe	II			II			II			II		
Description	Good			Good			Good			Good		
Stabilité	Stable			Stable			Stable			Stable		
Rupture	Some blocks			Some blocks			Some blocks			Some blocks		
Support	Occasional			Occasional			Occasional			Occasional		
Paramètres	Jn3 avec Jn4 – DIP Direction :20 DIP :36						Jn2 avec Jn4 – DIP Drection :20 DIP :50					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.20			0.15			0.20		
F2	0.85			0.81			1.00			0.94		
F3	-6.00			-3.15			0.00			-0.95		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-1			-1			0			-0.17		
Angles	A	50°	B	36°	C	6°	A	20°	B	50°	C	20°
SMR	64			64			65			65		
Classe	II			II			II			II		
Description	Good			Good			Good			Good		
Stabilité	Stable			Stable			Stable			Stable		
Rupture	Some blocks			Some blocks			Some blocks			Some blocks		
Support	Occasional			Occasional			Occasional			Occasional		

Tableau 05. Détail de calcul du SMR des deux talus TR03 et TR04

TR03 slope :260/50 RMR =35												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Direction :88 DIP :23						Jn1 avec Jn3 – DIP Direction :48 DIP :24					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.85			0.89			0.15			0.30		
F2	1.00			1.00			1.00			1.00		
F3	0.00			-0.32			0.00			-0.32		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.28			0			-0.9		
Angles	A	8°	B	23°	C	73°	A	32°	B	24°	C	74°
SMR	35			35			35			35		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn2 avec Jn4 – DIP Direction :110 DIP :18						Jn2 avec Jn3 – DIP Direction :50 DIP :6					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.33			0.15			0.32		
F2	1.00			1.00			1.00			1.00		
F3	0.00			-0.30			0.00			-0.27		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.27			0			-0.08		
Angles	A	30°	B	18°	C	68°	A	31°	B	6°	C	56°
SMR	35			35			35			35		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn1 avec Jn4 – DIP Direction :118 DIP :29						Jn3 avec Jn4 – DIP Direction :237 DIP :52					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.26			0.40			0.44		
F2	1			1			1.00			0.95		
F3	0			-0.34			-6.00			-7.83		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.08			-2			-3		
Angles	A	38°	B	29°	C	79°	A	24°	B	52°	C	2°
SMR	35			35			33			32		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
TR04 slope :220/40 RMR=35												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Direction :294 DIP :12						Jn1 avec Jn3 – DIP Direction 346 DIP :66					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.16			0.15			0.19		
F2	0.15			0.20			1.00			1.00		
F3	-60			-50.32			0.00			-0.73		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-1			-2			0			-0.13		
Angles	A	74°	B	12°	C	-28°	A	54°	B	66°	C	106°
SMR	34			33			35			35		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	JN1 avec Jn4 – DIP Direction :104 DIP :16						Jn2 avec Jn3 – DIP direction :197 DIP :36					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.17			0.40			0.45		
F2	1.00			1.00			0.85			0.81		
F3	0.00			-0.27			-50.00			-55.32		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.04			-17			-0.20		
Angles	A	64°	B	16°	C	56°	A	23°	B	36°	C	-4°
SMR	35			35			18			15		
Classe	IV			IV			V			V		
Description	Bad			Bad			Very bad			Very bad		
Stabilité	Instable			Instable			Completely instable			Completely instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Big planar or soil- like			Big planar or soil- like		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Reexcavation			Reexcavation		
Paramètres	Jn2 avec Jn4 – DIP direction :177 DIP :36						Jn3 avec Jn4 – DIP direction :195 DIP :27					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.22			0.40			0.41		
F2	0.40			0.59			0.40			0.45		
F3	-60			-58.10			-60			-58.53		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-4			-8			-10			-11		
Angles	A	44°	B	30°	C	-10°	A	54°	B	66°	C	106°
SMR	31			27			25			24		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		

Tableau 06. Détail de calcul du SMR des deux talus TR05 et TR06

TR05 slope:225/45 RMR=33												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Direction :23 DIP :7						Jn1 avec Jn3 – DIP direction :220 DIP :11.5					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.40			0.48			0.85			0.94		
F2	1			1			0.15			0.19		
F3	0			-0.26			-60			-59.43		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.12			-8			-11		
Angles	A	22°	B	7°	C	52°	A	5°	B	12°	C	34°
SMR	33			33			25			22		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn1 avec Jn4 – DIP Drection :30 DIP :0						Jn1 avec Jn5 – DIP direction :250 DIP :36					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.70			0.71			V			V		
F2	1			1			Very bad			Very bad		
F3	0			-0.25			Completely instable			Completely instable		
F4	0			0			Big planar or soil- like			Big planar or soil- like		
F1*F2*F3	0			-0.27			Reexcavation			Reexcavation		
Angles	A	15°	B	0°	C	45°	A	25°	B	36°	C	-9°
SMR	33			33			16			14		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn2 avec Jn3 – DIP direction :262 DIP :2						Jn2 avec Jn4 – DIP Drection :32 DIP :6					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.26			0.70			0.77		
F2	0.15			0.16			1			1		
F3	-60			-59.56			0			-0.26		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-1			-3			0			-0.2		
Angles	A	37°	B	02°	C	-43°	A	13°	B	6°	C	51°
SMR	32			30			33			33		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn2 avec Jn5 – DIP direction :250 DIP :0						Jn3 avec Jn4 – DIP Drection :205 DIP :14					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.40			0.41			0.40			0.54		
F2	0.15			0.16			0.40			0.21		
F3	-60			-59.58			0.15			-59.38		
F4	0			0			-60			0		
F1*F2*F3	-4			-4			-4			-7		
Angles	A	25°	B	0°	C	-45°	A	20°	B	14°	C	-31°
SMR	29			29			26			26		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn3 avec Jn5 – DIP direction :250 DIP :0						Jn4 avec Jn5 – DIP direction :68 DIP :60					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.40			0.41			0.40			0.45		
F2	.15			0.17			1			1		
F3	-60			-59.52			0			-0.69		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	-4			-4			0			-0.31		
Angles	A	64°	B	5°	C	-40°	A	23°	B	60°	C	105°
SMR	29			29			18			15		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
TR06 slope :265/10 RMR=34												
Paramètres	Jn1 avec Jn2 – DIP Drection :328 DIP :38						Jn1 avec Jn3 – DIP direction :79.5 DIP :41					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.17			0.85			0.93		
F2	0.85			0.85			1			1		
F3	0			-0.68			0			-0.26		
F4	0			0			0			0		
F1*F2*F3	0			-0.09			0			0		
Angles	A	63°	B	38°	C	28°	A	6°	B	41°	C	51°
SMR	33			33			29			33		
Classe	IV			IV			IV			IV		
Description	Bad			Bad			Bad			Bad		
Stabilité	Instable			Instable			Instable			Instable		
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges			Planar or big wedges		
Support	Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective			Importante/corrective		
Paramètres	Jn2 avec Jn3 – DIP direction :194.5 DIP :5.5						Angles					
	Romana (1993)			Tomas (2007)			Romana (1993)			Tomas (2007)		
F1	0.15			0.16			A			71°		
F2	0.15			0.17			B			6°		
F3	-50			-55			C			-5°		
F4	0			0								
F1*F2*F3	-1			-2								
SMR	29			33								
Classe	IV			IV								
Description	Bad			Bad								
Stabilité	Instable			Instable								
Rupture	Planar or big wedges			Planar or big wedges								
Support	Importante/corrective			Importante/corrective								

Résumé

La stabilité des talus rocheux constitue un axe d'études et de recherches important dont les applications concernent des domaines très variés : mines et carrières à ciel ouvert, excavations de génie civil, risques naturels liés aux mouvements de versant. L'objectif de ce mémoire focalise sur l'étude de stabilité de six talus rocheux localisés sur la pénétrente autoroutière DjenDjen- El-Eulma entre le PK 18 et 24.

De point de vue géologique les talus sont formés par des masses rocheuses hétérogènes type flysch qui sont le Numidien au niveau des talus TR01 et TR02 et le Massylien au niveau du reste des talus. Le traitement statistique des données structurales par le code DIPS a montré que le flysch numidien est recoupé par trois à quatre familles de discontinuités et le flysch massylien par quatre à cinq familles. L'étude des discontinuités effectuée conformément aux recommandations d'ISRM (1981), nous a permis de constater que les discontinuités du flysch massylien sont caractérisées par un très faible espacement, une persistance très faible. Leurs des épontes sont lisses, partiellement ouvertes et moyennement altérés et celle du flysch numidien sont caractérisées par un espacement faible à moyen, une persistance faible à moyenne. Leurs épontes sont rapprochées, légèrement altérées et rugueuses. La qualité du flysch massylien est mauvaise à très mauvaise et du flysch numidien est moyenne à bonne comme révélée par le RMR₈₉ et le GSI.

L'analyse de stabilité des talus rocheux a été effectuée conformément aux trois approches, géométrique en utilisant le code DIPS, empirique par l'utilisation du système SMR, et analytique par l'utilisation du logiciel SLIDE. Les résultats obtenus par l'approche analytique ont validé ceux obtenus par les autres approches dont leurs résultats sont similaires. Les techniques de confortements optées (les tirants d'ancrage, modification géométrique du talus (reprofilage), drainage) sont vérifiées par les calculs de stabilité en utilisant SLIDE, dont les résultats obtenus sont très satisfaisants ($F_s > 1.5$).

En effet, il est fortement recommandé d'analyser la stabilité des talus rocheux par les approches géométrique et empirique notamment dans les phases préliminaires, voire de construction des projets, en vue de leurs rapidités, de la fiabilité de leurs résultats et de leurs faibles couts

Mots clés : rocheux, SMR, flysch, RMR, pénétrente, discontinuité

Abstract

The stability of rock slopes is a major area of study and research whose applications concern a wide variety of fields: open pit mines and quarries, civil engineering excavations, natural risks linked to slope movements. The objective of this thesis focuses on the stability study of six rock slopes located on the DjenDjen- El-Eulma highway penetrating between PK 18 and 24.

From the view geological point, the slopes are formed by heterogeneous rock masses such as the Numidian at the slopes TR01 and TR02 and the Massylian in other slopes. The statistical treatment of structural data by the DIPS code showed that the Numidian flysch is intersected by three to four families of discontinuities and the massylian flysch by four to five families. The study of the discontinuities carried out according to the recommendations of ISRM (1981), allowed us to note that the discontinuities of the massylian flysch are characterized by a very small spacing, a very low persistence. Their walls are smooth, partially open and moderately altered, and that of the flysch Numidian are characterized by low to medium spacing, low to medium persistence. Their walls are closed, slightly weathered and rough. The quality of the flysch Massylien is bad to very bad and flysch Numidien is average to good as revealed by the RMR₈₉ and the GSI.

Rock slope stability analysis was performed according to the three approaches, geometric using the DIPS code, empirical using the SMR system, and analytical using the SLIDE software. The results obtained by the analytical approach validated those obtained by the other approaches whose their results are similar. The chosen reinforcement techniques (anchor bolts, geometrical modification of the slope (reprofiling), drainage) are verified by the stability calculations using SLIDE, whose results obtained are very satisfactory ($F_s > 1.5$).

Indeed, it is strongly recommended to analyze the stability of the rock slopes by geometric and empirical approaches, especially in the preliminary phases, or even construction of the projects, in view of their speed, the reliability of their results and their low costs.

Keywords: rocky, SMR, flysch, RMR, penetrating, discontinuity

ملخص

يعد استقرار المنحدرات الصخرية مجالاً رئيسياً من مجالات الدراسات والأبحاث التي تتعلق تطبيقاتها بمجموعة واسعة من المجالات: مناجم ومقالع الحفريات المفتوحة، وحفريات الهندسة المدنية، والمخاطر الطبيعية المرتبطة بحركات المنحدرات. يركز الهدف من هذه الرسالة على دراسة الثبات لستة منحدرات صخرية تقع على الطريق الرابط بين جن جن والعلمة بين 18 و 24 pk

من وجهة النظر الجيولوجية، تتشكل المنحدرات من كتل صخرية غير متجانسة من نوع الفليش مثل النوميديا عند المنحدرات TR01 و TR02 والماسيليا على مستوى المنحدرات المتبقية. أظهرت المعالجة الإحصائية للبيانات التركيبية من خلال كود DIPS أن النوميديا يتميز بوجود من ثلاث إلى أربع عائلات من التشققات والفليش الماسيليا من أربعة إلى خمس عائلات. سمحت لنا دراسة التشققات التي تمت وفقاً لتوصيات (ISRM 1981) أن نلاحظ أن تشققات الفليش ماسيليا تتميز بمسافة صغيرة جداً، واستمرار ضعيف جداً. أعمادها ناعمة ومفتوحة جزئياً و تعري معتدل، وتتميز تشققات الفليش نوميديا بمسافات منخفضة إلى متوسطة ومن استمرار منخفض إلى متوسط. جدرانها قريبة من بعضها، ومتعرية قليلاً. جودة الفليش الماسيليا سيئة إلى سيئة للغاية والفليش نوميديا من المتوسط إلى الجيد كما كشف عنها RMR₈₉ و GSI.

تم إجراء تحليل ثبات المنحدر الصخري وفقاً للمناهج الثلاثة، هندسياً باستخدام كود DIPS، تجريبياً باستخدام نظام SMR، وتحليلي باستخدام برنامج SLIDE. أثبتت النتائج التي تم الحصول عليها من خلال النهج التحليلي أكدت تلك التي تم الحصول عليها من خلال المناهج الأخرى التي كانت نتائجها متشابهة. تم التحقق من تقنيات التعزيز المختارة (مسامير التثبيت، التعديل الهندسي للمنحدر (إعادة التوطين)، التصريف) من خلال حسابات الاستقرار باستخدام SLIDE، ابن تم الحصول على نتائج مرضية للغاية ($F_s > 1.5$).

في الواقع، يوصى بشدة بتحليل استقرار المنحدرات الصخرية من خلال الأساليب الهندسية والتجريبية، خاصة في المراحل الأولية، أو حتى خلال مراحل بناء المشاريع، نظراً لسرعتها وموثوقية نتائجها وتكاليفها المنخفضة.

كلمات البحث: الصخرية، SMR، flysch، RMR، اختراق، تشققات