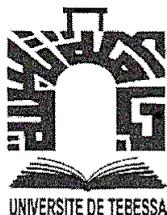


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Larbi Tébessi. Tébessa
Faculté des Sciences exactes, des sciences
de la nature et de la vie



Département des sciences de la terre et de l'univers

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master

Filière : Géologie

Option : Géologie de l'ingénieur et Géotechnique

Thème :

STABILITE DES MASSIFS ROCHEUX

(CAUSES ET REMEDES)

« RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE »

présenté par

BOUABIDA Nadia

BELFAR Karim

Devant le jury

Dr. MOUICI Ridha

MC. «B»

U.L.T Tébessa

Président

Pr. ATHMANIA Djamel

Professeur

U.L.T Tébessa

Examineur

Dr. AOUN Mounira

MC. «B»

U.L.T Tébessa

Rapporteur

Session juin 2021



DEDICACE

Grâce à mon dieu je dédié ce travail

À ma grande famille (mes parents, mes sœurs, mes frères)

A ma petite famille (mon époux, mes enfants amine et nour)

Et à tous mes professeurs

À vous tous, dédiez le fruit de ce modeste travail

*Enfin, je demande à Dieu de le rendre acceptable et que tous
les intéressés le bénéficient.*





DEDICACE

*Je dédie le fruit de mes efforts et de mon travail à mes chers
parents et ma famille sans exception.*

*A tous ceux qui m'ont encouragé et soutenu de loin ou de près,
et m'ont poussé à rechercher constamment la connaissance
Car atteindre des objectifs nobles demande de la diligence et
de la patience.*



Remerciement

Nos sincères remerciements à notre dieu le grand créateur qui nous a guidé toujours dans nos pas pour arriver à cette réussite.

Nous souhaitons adresser un message de tendresse et de respect à toutes les personnes qui nous ont soutenues durant notre travail.

Nos profondes gratitudes s'adressent tout particulièrement à notre encadreur Aoun M. Docteur à l'université de Tébessa, qui nous a accordé sa confiance dans l'élaboration de ce travail. Nous la remercions pour son soutien, ses précieux conseils et critiques attentive.

Nous tenons à remercier très vivement et respectueusement Monsieur Mouici Ridha Docteur à l'université de Tébessa qui nous a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Nous présentons aussi avec gratitude, nos remerciements les plus sincères à Monsieur Athmania Djamel Professeur à l'Université de Tébessa qui a accepté d'examiner ce travail.

Nous remercions chaleureusement nos familles pour leur soutien moral qui nous a accompagnés dans ce parcours.

Nos remerciements les plus sincères vont aux enseignants du département des sciences de la terre et de l'univers pour leurs conseils et intérêts qu'ils ont porté à notre formation.

Que Dieu vous accorde santé et bien-être.

Sommaire

Dédicace	
Remerciement	
Introduction générale.....	I
Les questions de recherche.....	II
Les hypothèses de recherche.....	III
Les objectifs de recherche.....	III
Motivation du choix du thème.....	V
Méthodologie d'approche.....	V
Structure de mémoire.....	VI

Chapitre 01 : Caractérisation des massifs rocheux.

Introduction.....	2
I. Définition de la roche et sol.....	3
II. Classification des roches.....	3
II.1. Roches magmatiques (roches ignées)	3
II.2. Roches sédimentaires.....	4
II.2.1. Roches sédimentaires détritiques.....	4
II.2.2. Roches sédimentaires chimiques et biochimiques.....	5
II.3. Roches métamorphiques.....	5
III. Structure des massifs rocheux.....	5
IV. Les discontinuités.....	6
IV.1. Définition.....	6
IV.2. Type de discontinuité.....	6
A. Les plans de stratification.....	7
B. Les joints.....	7
B.1. Les diaclases.....	7
Les plans lithologiques.....	8
Les plans de schistosité.....	8
C. Les couloirs de fracturation.....	8
D. Failles.....	9

V. Caractéristiques de discontinuité.....	9
V.1.Aspect géométrique.....	9
V.1.1. Extension.....	9
V.1.2. Ouverture.....	10
V.1.3. Orientation.....	10
V.1.4. Espacement.....	10
V.2.Aspect mécanique.....	11
V.2.1. La déformabilité.....	11
V.2.2. La rugosité.....	11
V.2.3. Le remplissage.....	12
V.2.4. La dilatance.....	12
V.3.Aspect hydraulique.....	13
V.3.1. La quantité de débit.....	13
V.3.2. La conductivité hydraulique.....	13
VI. Comportement mécanique de massif rocheux.....	14
VI.1. Essais mécanique effectués pour les massifs rocheux.....	14
VI.2. Critères de rupture.....	15
Conclusion.....	20

Chapitre 02 : Classification des massifs rocheux.

Introduction.....	22
I. Systèmes de classification géomécanique.....	23
I.1. Type et but des systèmes de classification.....	23
I.2. Buts de classification des massifs rocheux.....	23
I.2.1. Le RQD : Rock Quality Designation.....	25
I.2.2. Le RMR : Rock Mass Rating.....	26
I.2.3. Le Q-Système.....	29
I.2.4. Le GSI: Géological Strongth Index.....	31

Conclusion.....	32
-----------------	----

Chapitre 03 : Différents type de ruptures et approche à l'analyse d'instabilité dans les massifs rocheux

Introduction.....	34
I. classification basée sur les modes de rupture.....	35
I. 1. Dégradation superficielle	35
I.2.Les glissements	35
I.3. Rupture de pied.....	36
I.4.Glisement de dièdre.....	37
I.5.Rupture de surplomb.....	37
I.6.Rupture de basculement.....	38
I.7.Phase d'instabilité.....	44
II. Paramètres d'instabilité.....	45
Conclusion.....	48

Chapitre 04 : Méthodes de surveillance et de confortation des massifs ou des talus rocheux

Introduction.....	50
I. Méthodes de surveillance.....	52
I.1. Techniques instrumentales utilisées en surveillance.....	53
I.2. Définition d'un système de surveillance.....	53
I.3.Méthodes de surveillance : seuils et critères d'alerte.....	53
II. Méthodes de confortation.....	54
II.1. Méthodes de confortement des talus.....	54
II.1.1 -Drainage.....	54
II.1.1.1. Collecte et canalisation des eaux de surface	55
II.1.1.2. Massifs drainants	55
II.1.1.3. Tranchées drainantes.....	56
II.1.1.4. Drains subhorizontaux.....	56
II.1.1.5. Drains verticaux, puits et galeries drainantes.....	57

II.1.2. Modifications géométriques.....	57
II.1.2.1. Butée de pied.....	57
II.1.2.2. Allègement en tête.....	58
II.1.2.3. Purge.....	58
II.1.2.4. Reprofilage.....	59
II.1.2.5. Substitution totale ou partielle.....	59
II.1.3 : Renforcement.....	60
II.1.3.1. Organes résistants en pied.....	60
II.1.3.2. Techniques de renforcement par inclusions.....	61
II.1.3.3. Tirants d’ancrages.....	61
II.1.3.4. Techniques de remblai renforcé.....	61
Conclusion.....	62
Chapitre 05 : Chapitre : Présentation de certains cas d’étude de stabilité des massifs rocheux.	
I. Sites miniers.....	64
I.1. Cas de mine Troilus, Chibougamau	64
I.2. Cas de mine Djebel el Onk (Kef el snoun)	71
I.3. Cas de mine Boukhadra	74
Conclusion générale.....	78
Bibliographie.....	79
Liste des figures.....	82
Liste des tableaux.....	85
Résumé.....	86

Introduction générale :

Aujourd'hui, nous reconnaissons que les risques naturels constituent un obstacle au développement économique et social des pays. Malheureusement, pour la plupart, nous ne pouvons pas nous contredire face à face aux excès de la nature, qu'ils soient d'origine atmosphérique ou terrestre, mais il est possible de découvrir et d'identifier les principaux secteurs dans lesquels ces phénomènes sont susceptibles de se produire. Nous pouvons donc les éviter et nous assurer que leurs effets sont moins nocifs. Parmi ces risques, nous pouvons citer l'instabilité des massifs rocheux.

La connaissance des propriétés géologiques et mécaniques des massifs rocheux doit impérativement passer par une étude détaillée des propriétés de la masse rocheuse.

Ces propriétés sont inhérentes d'une part à la matrice rocheuse (la roche intacte) avec ces caractéristiques spécifiques telles que le type pétrographique, la composition minéralogique, la texture et l'altération et d'autre part à la structure géologique, les discontinuités, matériaux de remplissage et les conditions des épontes. (geo.univ-batna2.dz)

La rupture des talus rocheux peut contraindre la circulation des véhicules sur les routes nationales ou les autoroutes qui les longent. Ces pentes rocheuses instables ont souvent conduit à des dommages sérieux, engendrant des travaux d'entretien, de réparation et de renforcement importants. Le comportement de ces pentes rocheuses est principalement dicté par les discontinuités qui les traversent. La mécanique des roches compte aujourd'hui un large éventail de techniques empiriques expérimentales, analytiques et numériques pour étudier la stabilité des talus rocheux fracturés. La majorité des études sont basées sur les méthodes traditionnelles de calcul. Malgré que ces méthodes classiques constituent un outil efficace pour les analyses de stabilité des pentes en raison de leur simplicité et de leur disponibilité, elles présentent des limites :

- Elles ne prennent pas en compte la déformabilité des joints
- Elles ne permettent pas d'identifier les mécanismes de déformation et de rupture complexe, la surface de rupture étant déterminée et fixée au début. (Ahmari Ahmed,2021)

Ces méthodes ne sont pas adéquates pour un milieu rocheux dans lequel les surfaces de discontinuités, leurs géométries et leurs propriétés mécaniques jouent un rôle déterminant.

Pour résoudre ce problème, plusieurs chercheurs ont développé des méthodes numériques telles que la méthode des éléments finis et la méthode des éléments distincts. Ces méthodes permettent de modéliser les principales caractéristiques telles que les failles, les joints, les fractures, les fluctuations du niveau de la nappe phréatique ainsi que la charge dynamique. En outre, elles permettent d'analyser des facteurs complexes tels que le comportement non linéaire, l'inhomogénéité et l'anisotropie de ces discontinuités. (Pastel.archives-ouvertes.fr)

Les roches sont une sous-classe, elles sont une source de danger, en particulier pour les zones côtières et montagneuses où les glissements de terrain sont plus susceptibles de se produire. Les aléas naturels liés à la stabilité du massif sont dus à la forte fracturation des roches en surplomb sur la route. La plupart des routes dans les zones montagneuses comportent des risques de chute et de roulement de roches, La géologie régionale et la géologie locale contribuent à la compréhension de la géologie générale et permettent l'établissement d'un modèle géologique et structural correct. Cette étape est suivie d'une caractérisation géomécanique de la masse rocheuse suivie d'une classification RQD, RMR et GSI. Ces trois paramètres montrent la qualité des masses rocheuses, le degré de fractures et les familles de joints, ce qui montre que les discontinuités contrôlent la stabilité. (geo.univ-batna2.dz)

Dans ce travail, nous examinerons l'instabilité des talus Tout cela pour déterminer la trajectoire des masses rocheuses ainsi que les différentes méthodes de renforcement pour tenter de répondre à ces mouvements de terrain. Les éboulements rocheux qui sont une sous-catégorie. Ils représentent une source de danger, en particulier pour les zones côtières et montagneuses ou ils sont susceptibles de se produire le plus. Les dangers naturels liés à la stabilité du massif rocheux sont dus à l'intensité de la fracturation des roches surplombant la chaussée routière. La plupart des itinéraires dans les zones montagneuses présentent des risques de chutes de pierres, de roulis et de rebonds.

La question principale de recherche :

Dans cette thèse on va toucher et aborder les différentes causes de chutes des massifs rocheux et d'effondrement des talus et leurs remèdes ainsi on a consisté à démontrer l'angle de frottement, la discontinuité et leurs importances dans la stabilité des massifs rocheux, donc notre question principale de recherche sera :

Quelle est la relation entre les caractéristiques des discontinuités avec le risque de l'instabilité des massifs rocheux ?

Les questions secondaires de recherche :

Donc pour atteindre les objectifs de cette thèse, on va poser des questions suivantes :

- 1- Quelle est l'influence de l'angle de frottement sur la stabilité des talus rocheux ?
- 2- Quelles sont les mécanismes de glissement ?
- 3- Comment Résoudre le problème de l'instabilité des massifs rocheux ?

Les hypothèses de recherche :

L'hypothèse principale :

La relation entre les caractéristiques des discontinuités des massifs rocheux et le risque de leur instabilité est basée sur plusieurs paramètres comprenant : la résistance à la compression, les ruptures, le type de la roche, la méthode d'excavation des pentes, les eaux souterraines et la résistance au cisaillement.

Les hypothèses secondaires :

- 1/ L'angle de frottement influe sur la stabilité des talus par son degré entre l'angle de frottement de discontinuité et l'angle de frottement de la roche intacte.
- 2/ Les glissements peuvent être de type rotationnel (surface de glissement circulaire) ou translationnel (déplacement plus ou moins parallèle à la topographie). En outre, les glissements peuvent être classés selon leur degré d'activité et leur profondeur. Tout ça pour définir les différentes méthodes de confortement.
- 3/ On peut résoudre le problème de l'instabilité des massifs rocheux par connaître les facteurs déclenchants du phénomène

Les objectifs de recherche : Les principaux objectifs de recherche tendent à :

- 1- La compréhension théorique des talus et massifs rocheux
- 2- 2- Connaître la relation entre les caractéristiques des massifs rocheux et l'instabilité
- 3- Toucher les causes principales des instabilités des massifs rocheux
- 4- Connaître les résultats et les implications des chutes
- 5- Déterminer le rôle et la responsabilité des organes de contrôle concernant
- 6- Bénéficier des résultats de cette étude dans le futur

- 7- Contribuer à enrichir la bibliothèque universitaire avec une référence traitant du sujet.
- 8- Trouver des solutions appropriées et des réponses aux problèmes présentés selon la méthodologie de recherche scientifique utilisée.

Motivation du choix du thème :

- 1- La nouveauté et l'importance du sujet, en particulier pour l'Algérie.
- 2-La plupart de la mise en œuvre en Algérie ont échoué car ils n'étaient pas à la hauteur des études.
- 3-Encourager les autorités et les spécialistes concernés à s'intéresser à cette question.
- 4-Exhorter la surveillance légale.

Méthodologie d'approche : La méthode scientifique utilisée dans cette recherche se repose sur la description, Il est utilisé pour clarifier et identifier une solution à un problème spécifique et pour découvrir de nouveaux faits à travers des informations. Ce mémoire cherche à étudier les causes et les remèdes de l'instabilité des massifs rocheux. Donc la partie théorique est consisté à lire divers ouvrages, références et notes universitaires pertinentes au sujet, afin de former une base théorique qui sera pratiquement basée sur notre traitement du thème.

• **La méthode descriptive :** La description scientifique fait partie des nombreux types de description, elle est utilisée dans l'étude de nombreux sujets, elle nécessite une observation attentive, approfondie et ordonnée dans La pensée, dans laquelle le chercheur utilise des sens naturels. la description scientifique est venue résoudre un gros problème dans la recherche.

Structure de mémoire :

Pour élaborer cette recherche, on a opté pour la démarche suivante : La première partie porte sur une étude théorique visant d'abord à définir un certain thème qui est familiarise avec notre thème de recherche. Ainsi la consultation des différents documents de la géologie et l'hydrologie. En plus Pour atteindre les objectifs fixés, nous sommes appuyées sur les exemples dans une deuxième partie ; Cette dernière consiste à clarifier les cas. Afin de confirmer nos hypothèses.

Structure de mémoire

Introduction

Générale



**Introduction
Problématique
Hypothèse
Structure de
mémoire**

**Chapitre 01 : caractérisation
des massifs rocheux**

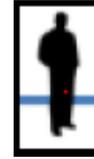
**Chapitre 02 : classification des
massifs rocheux**

**Chapitre 03 : différents types
de ruptures et approche à
l'analyse d'instabilité dans les
massifs rocheux**

**Chapitre 04 : Méthodes de
surveillance et de confortation
des massifs rocheux**

**Chapitre 05 : Présentation de
certains cas d'étude de
stabilité des massifs rocheux**

**Conclusion
générale**



Chapitre 01 :
Caractérisation des massifs rocheux

Introduction :

Les massifs rocheux sont des structures très complexes. Ils sont assimilés à un assemblage de blocs, délimités par des discontinuités telles que des fissures, des fractures, des diaclases ou des failles ou encore des limites stratigraphiques. (SADEK Kahina.et CHAOUCH Ibtissem.2016). La reconnaissance du massif rocheux a pour but d'identifier les matériaux formant le massif, d'en prélever les échantillons pour une étude en laboratoire, et de repérer les zones de faiblesses. L'étude d'un massif rocheux fracturé nécessite une caractérisation de la matrice rocheuse, ainsi que celle des discontinuités. Cette caractérisation consiste à décrire ou à quantifier des paramètres ou des caractéristiques influençant le comportement de la masse rocheuse. La conception d'un talus rocheux dépend des constituants du massif dans lequel il est excavé, et plus précisément des interactions entre la matrice rocheuse et les discontinuités, il est évident que la présence de ces dernières crée une baisse de la résistance et de la rigidité du massif rocheux autrement dit ça constitue une discontinuité dans ses caractéristiques mécaniques. Par conséquent, il est primordial de procéder à une caractérisation de ce massif avant de réaliser les travaux sur ou à proximité d'un talus rocheux et ce pour des raisons sécuritaires et économiques. L'étude de la stabilité des talus rocheux nécessite une connaissance des caractéristiques géologiques, mécaniques et hydrauliques du massif rocheux. Généralement, le comportement de ce massif est gouverné par la présence de différents éléments structuraux (failles, fractures, diaclases), qui sont aussi caractérisés par leurs propres propriétés mécaniques et des propriétés géométriques. Il est donc intéressant d'identifier et de caractériser toutes les discontinuités qui parcourent le massif rocheux. La connaissance aussi des caractéristiques hydrologiques du massif (la vitesse de circulation de l'eau dans les discontinuités, le niveau de la nappe, le débit dans les fractures, la conductivité hydraulique) est d'une grande importance afin d'obtenir un modèle du massif permettant de dimensionner le talus rocheux. En effet, la présence de l'eau dans le massif provoque le développement de pressions interstitielles ainsi que la diminution du coefficient de frottement le long des discontinuités. (Ali Rafiee,2008) .Pour réaliser le dimensionnement des talus rocheux, la reconnaissance et la caractérisation du massif rocheux doivent avoir comme objectifs la connaissance de la géologie du massif et bien déterminer les caractéristiques mécaniques ses éléments importants; Ainsi que l'hydrogéologie du massif Donc on désigne des méthodes directes pour toutes les opérations de sondage mécaniques (les pénétromètres statiques et dynamiques, les forages au marteau, les forages au rotary, les puits,...).(Ahmed Ahmari,2021)

I. Définition de la roche et du sol :

A • Roches : Géomatériaux possédant une cohésion ($C \neq 0$) et une résistance à la compression simple supérieure à 10 Mpa. (SADEK Kahina.et CHAOUCH Ibtissem.2016).

B • Sols : Géomatériaux pulvérulents ou cohésifs mais ne présentant pas ou pratiquement pas de résistance à la compression simple. La cohésion disparaît par isolution. La règle plus générale veut que l'on désigne par roches les terrains profonds et par sols les terrains de surface. (SADEK Kahina.et CHAOUCH Ibtissem.2016).

II. Classification des roches :

Les roches sont classées selon leur composition, leur origine ou la modalité de leur formation d'abord en trois grandes catégories. (SADEK Kahina.et CHAOUCH Ibtissem.2016).

II.1• Roches Magmatiques (roches ignées) : Les roches Magmatiques (ou roches ignées) comprennent les roches intrusives et les roches extrusives.



Figure 01 : Roche plutonique

(Benmarce Abdelhakim, 2019)

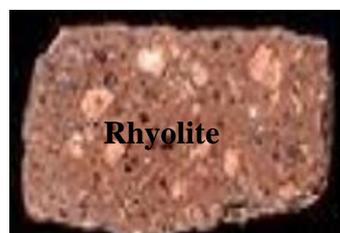


Figure 02 : Roche volcanique

(Benmarce Abdelhakim, 2019)

II.2• Roches Sédimentaires : Les roches sédimentaires sont des roches qui se forment à la surface de la croûte terrestre. Ce sont des roches qui résultent de la compaction et de la cimentation de boues, de sables, de graviers ou de fossiles. Dans le détail, ce processus complexe est composé de quatre phases principales :

a. production de particules : par érosion et altération superficielle des roches de la croûte.

b. transport de ces particules : principalement par l'eau, le vent ou la glace.

c. sédimentation et dépôt : dans un milieu favorable pour former un sédiment.

d. diagenèse : processus physico chimique (compactage, cimentation chimique, biochimique...) qui transforme les sédiments pulvérulents en roche sédimentaire.

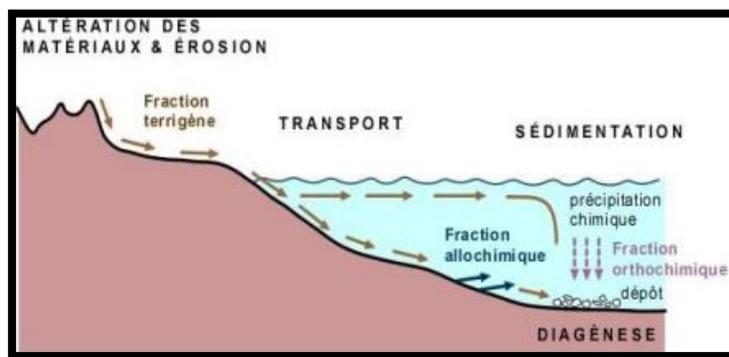


Figure 03 : Les principales phases de formation des roches sédimentaires, (Benmarce Abdelhakim, 2019)

II.2.1. Les roches sédimentaires détritiques : Ce sont des roches qui proviennent de l'érosion de roches pré existantes continentales qualifié de roches détritiques terrigènes (argile, grès)

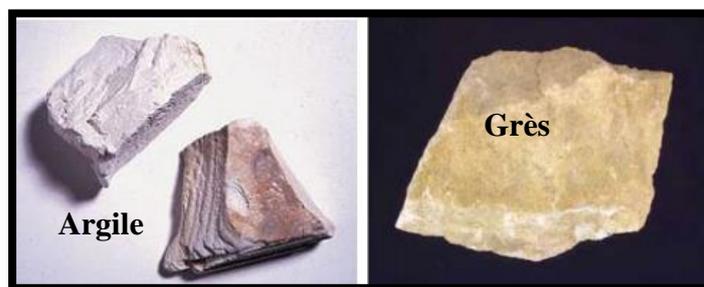


Figure 04 : Roches Détritiques
(Benmarce Abdelhakim, 2019)

II.2.2. Les roches sédimentaires chimiques et biochimiques : Elles comprennent les roches organogènes ou biogènes, elles sont liées à l'activité des organismes vivants et proviennent de l'accumulation et de la transformation de matière organique (le charbon) mais aussi les roches biochimiques qui sont liées à l'activité des organismes vivants mais proviennent de l'accumulation de certain éléments minéraux qu'ils synthétisent (le calcaire)



Figure 05 : Roches sédimentaires chimiques et biochimiques

II.3. Roches Métamorphiques : Les roches métamorphiques sont issues de la transformation de roches ignées ou sédimentaires sous l'effet de température et/ou de pressions élevées.

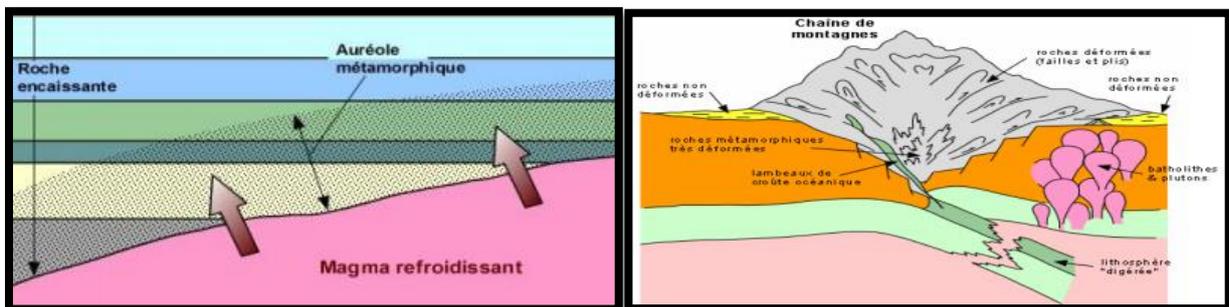


Figure 06 : Roche Métamorphisme régional. (Benmarce Abdelhakim,2019)

III. Structure des massifs rocheux :

La roche a une structure discontinue. Elle peut être assimilée à un milieu composé d'éléments continus plus ou moins homogènes, de forme géométrique quelconque ; la matrice rocheuse, et de fines zones situées entre ces éléments continus, qualifiées de 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. L'étude d'un massif rocheux fracturé nécessite donc une caractérisation de la matrice rocheuse, ainsi que celle des discontinuités.

Les études de stabilité d'ouvrage ou de versants, ont tendance actuellement à s'appuyer sur une note globale, affectée au massif, sommant avec un coefficient variable selon les auteurs ses caractéristiques géologique et géomécanique. Cette note n'est pas une caractéristique intrinsèque du terrain ; elle dépend de l'orientation de l'ouvrage ou de la topographie du versant dans la structure et dans le champ géostatique son utilisation n'est donc pas sans risque. Elle ne serait notamment se substituer à une analyse des champs cinématiques concernant les joints actifs et passifs induits par l'ouvrage ou le creusement de la vallée. (Ahmari ahmed,2021 univ de Québec)

IV. Les discontinuités :

IV.1. Définition :

1 : On définit une discontinuité dans un massif rocheux par une surface qui interrompt la continuité physique du milieu sain L'identification géologique, géométrique et mécanique des discontinuités, à toutes les échelles est indispensable dans l'étude de comportement du massif. Elle nécessite une analyse statistique, pour pouvoir différencier toutes les familles de discontinuités qui affectent le massif. Chaque famille est alors analysée à part pour déterminer la distribution des différents paramètres géométriques. (Sadek Kahina et chaouch Ibtisem, 2016 Univ de Bejaia)

2 : Les discontinuités sont généralement des lieux de grande déformabilité, où la rupture est plus facile et où l'eau circule plus facilement. Elles transforment l'état de contrainte du massif à leur proximité. (BENMARCE Abdelhakim, Juillet 2019)

IV.2. Type de discontinuité : Les discontinuités qui traversent les roches ont une influence significative sur la stabilité du massif rocheux. Elles sont généralement des endroits de grande déformabilité où la rupture est plus facile et où l'eau circule plus facilement (Martin et Saitta, 2012). On peut définir une discontinuité comme étant une fracture ayant une résistance en traction négligeable dans une roche (Priest, 2012). Ses types sont :

A•les plans de stratification : entre strates dans les massifs sédimentaires. Leur extension peut être très grande.



Figure 07 : Stratification (BENMARCE Abdelhakim, Juillet 2019)

B. Les joints : Un joint est une fissure dans la roche dont les deux parois sont parallèles l'une à l'autre (Peacock et al. 2016). Il se développe dans des roches telles que les calcaires, les grès ou les roches éruptives. Il possède une grande extension et une faible ondulation et il est rempli par de minces dépôts, généralement argileux, délimitant les strates des roches sédimentaires. Par conséquent, il est dangereux pour la stabilité.

Les joints sont des structures discontinues dues à des déplacements nuls ou faibles vis-à-vis de la surface de discontinuité (Priest, 2012). Ils sont divisés en deux catégories :

- 1/ les diaclases
- 2/ les litages.

B.1. Les diaclases : discontinuités séparant deux compartiments sans mouvement relatif. Elles peuvent s'organiser en familles directionnelles.



Figure 08 : Les diaclases. (BENMARCE Abdelhakim, Juillet 2019)



B•2. Les contacts lithologiques : (Entre deux matériaux différents.) Les litages sont des surfaces créées par changement de certains facteurs tels que la taille ou l'orientation des grains, la minéralogie ou la chimie de la déposition des roches sédimentaires. Les plans de litage ne seront jamais intersectés. Le recours à des méthodes statistiques spécifiques est nécessaire lors des études de l'orientation et d'espacement des plans de litage (Priest, 2012).

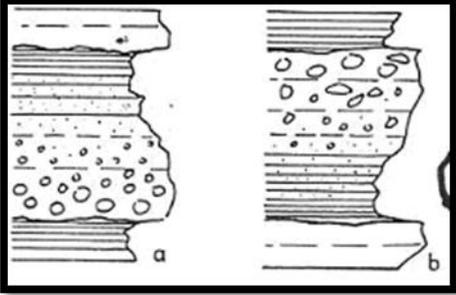


Figure 09 : les contacts lithologiques.

(<https://coursgeologie.com/correlations-stratigraphiques-5/>)

C-Les plans de schistosité : Débit des roches en feuillets parallèles. Origine liée aux contraintes tectoniques. Extension est plus ou moins grande.



Figure 10 : Plans de schistosité. Source : BENMARCE Abdelhakim, Juillet 2019

D• les couloirs de fracturation : Assemblage de petites discontinuités de faible extension et d'orientations variées formant une structure continue.



Figure 11 : Les couloirs de fracturation.

(https://ogst.ifpenergiesnouvelles.fr/articles/ogst/pdf/2001/05/putot_v56n5.pdf)



E• les failles : mouvement relatif entre les deux compartiments : faille normale, inverse et de décrochement fonction du champ de contrainte. Leur extension est très variable (métrique à pluri-kilométrique).

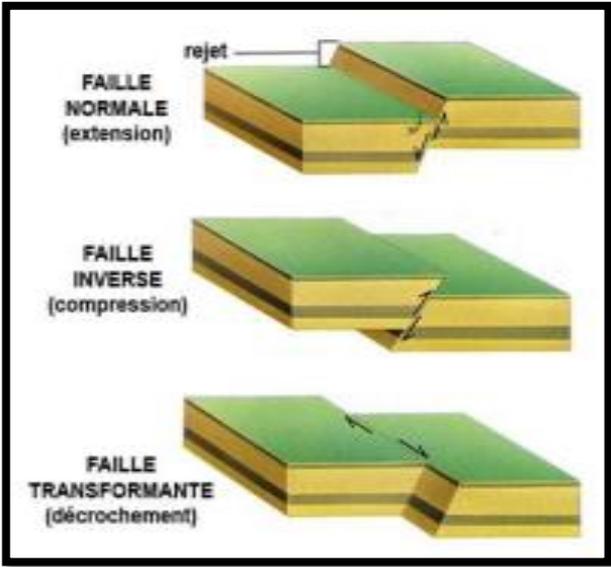


Figure 12 : Les failles. BENMARCE Abdelhakim, Juillet 2019

V. Caractéristiques de discontinuité : Pour caractériser une discontinuité, trois aspects importants sont à prendre en considération : l’aspect géométrique, l’aspect mécanique et l’aspect hydraulique.

V.1.Aspect géométrique :

V.1.1. Extension : L’extension ou taille des discontinuités correspond à la surface totale de la discontinuité dans l’espace.

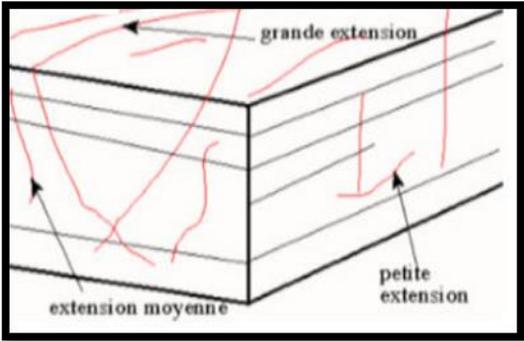


Figure 13 : Extension d’une discontinuité Tirée de Nguyen (2015)

V.1.2. Ouverture : distance entre épontes comptée perpendiculairement au plan de discontinuité.

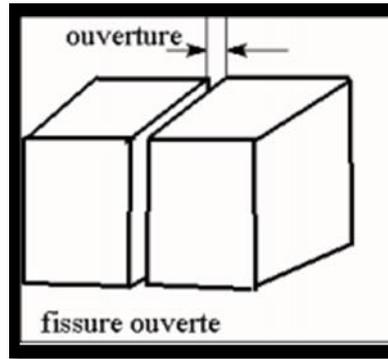


Figure 14 : Fissure ouverte

V.1.3. Orientation : Position du plan de la discontinuité dans l'espace. Permet le classement en familles directionnelles.

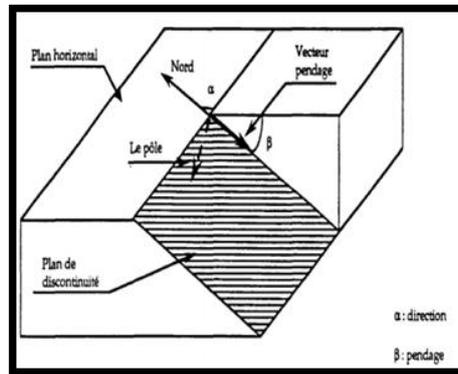


Figure 15 : Orientation d'un plan de discontinuité Tirée de Tahiri (1992)

V.1.4. Espacement : Distance entre deux discontinuités les plus proches d'une même famille mesurée perpendiculairement à celles-ci.

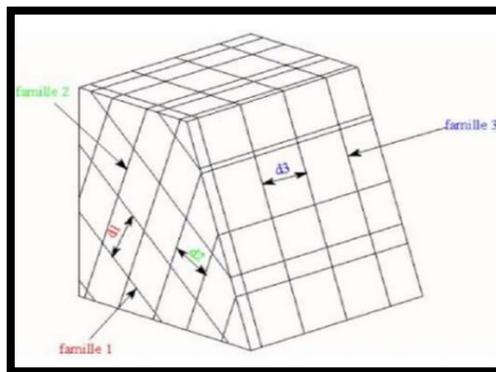


Figure 16 : Espacement dans un massif rocheux avec trois familles de discontinuités Tirée de Nguyen (2015)

V.2.Aspect mécanique :

V.2.1. La déformabilité : Une discontinuité est caractérisée par son comportement sous une sollicitation normale et sous une sollicitation de cisaillement. Les courbes contraintes-déplacements illustrées dans la figure ci-dessous expliquent la déformabilité des discontinuités. Cette déformation qui est un aspect important de point de vue mécanique est contrôlée par des rigidités normale (K_n) et tangentielle (k_s) de surface des joints.

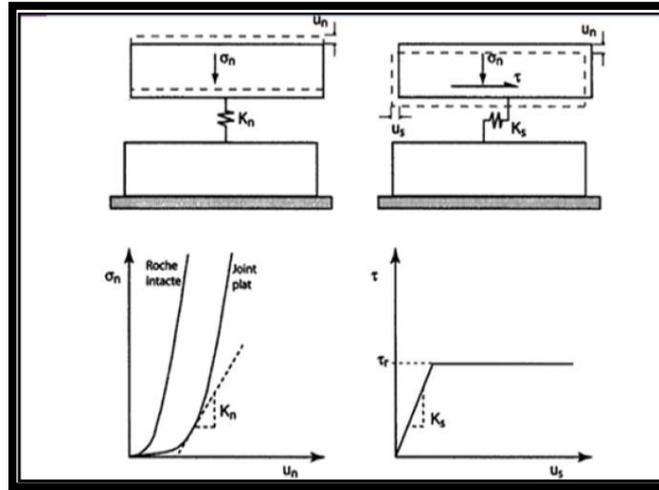


Figure 17 : Rigidités normale et tangentielle des discontinuités
Tirée de Goodman (1969)

V.2.2. La rugosité : La rugosité est une caractéristique qui décrit l'état de surface d'une discontinuité. Elle se manifeste sous forme des épontes irrégulières ou imbrication d'une éponte dans l'autre (Redjem et Fillali, 2018). C'est une caractéristique importante pour quantifier la résistance au cisaillement de la discontinuité.

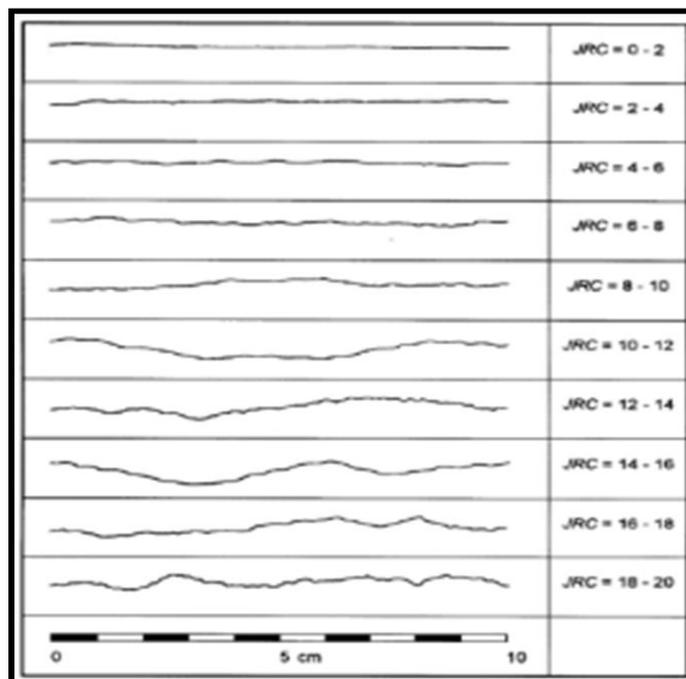


Figure 18 : Profils de rugosité typiques et valeur correspondante du JRC Proposés par Barton et Choubey (1977)

V.2.3. Le remplissage : Ce sont des matériaux broyés qui comblent les vides entre les deux lèvres d'une fracture. Les fractures sont des voies de circulation privilégiées pour les eaux souterraines qui laissent des dépôts. Il peut y avoir cimentation des fractures et formation d'un filon qui peut être plus résistant que la roche elle-même. Dans d'autres cas, il y a dépôt de matériaux argileux dont il est important de connaître la nature (Bjerrum, Brekke, Moum et Selmer, 1964). Ce type de remplissage peut causer des problèmes pour la stabilité du massif rocheux traversé par de telles discontinuités.

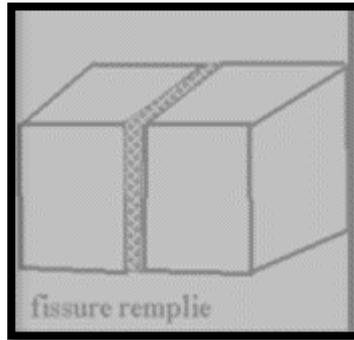


Figure 19 : Fissure remplie

V.2.4. La dilatance : La dilatance représente la variation de la déformation normale par rapport à la déformation tangentielle. Elle est souvent exprimée par un angle et sa valeur maximale est obtenue quand la résistance au pic est mobilisée (Berset, 2000).

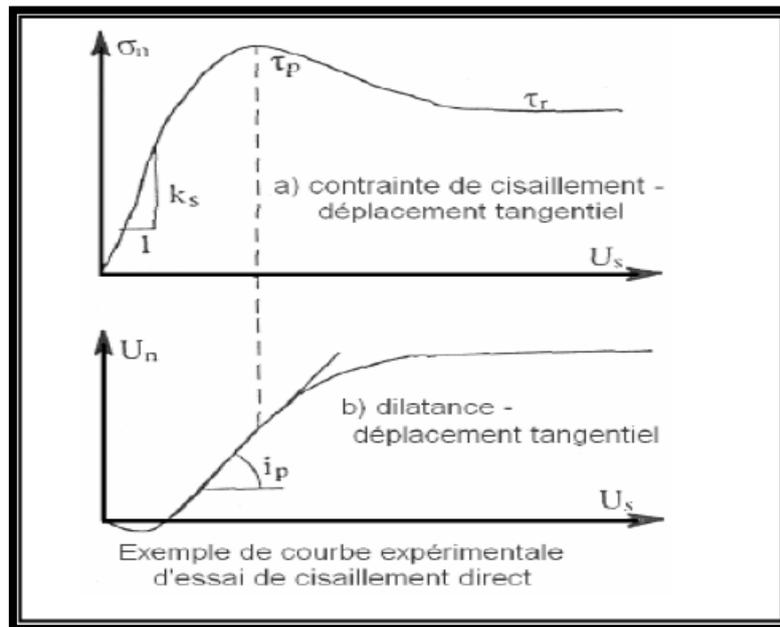


Figure 20 : Angle de dilatance Tirée de Berset (2000)

V.3.Aspect hydraulique :

V.3.1. La quantité de débit : Le débit est la quantité d'une grandeur qui traverse une surface donnée par unité de temps. Il permet de quantifier un déplacement de matière ou d'énergie. Le terme débit est le plus souvent associé au débit volumique : il quantifie alors le volume qui traverse une surface, une section, par unité de temps.

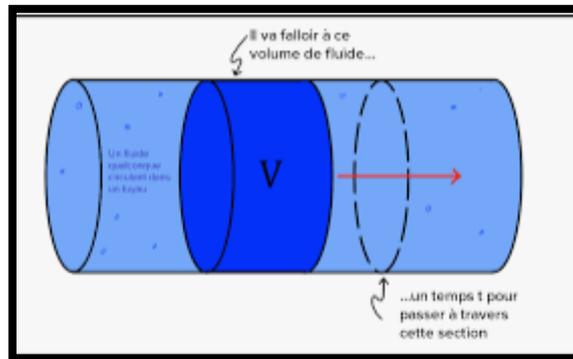


Figure 21 : La quantité de débit.
[www. fr.khanacademy.org](http://www.fr.khanacademy.org)

V.3.2. La conductivité hydraulique : La conductivité hydraulique d'un sol est la propriété physique fondamentale nécessaire lors du design d'un système de drainage souterrain.

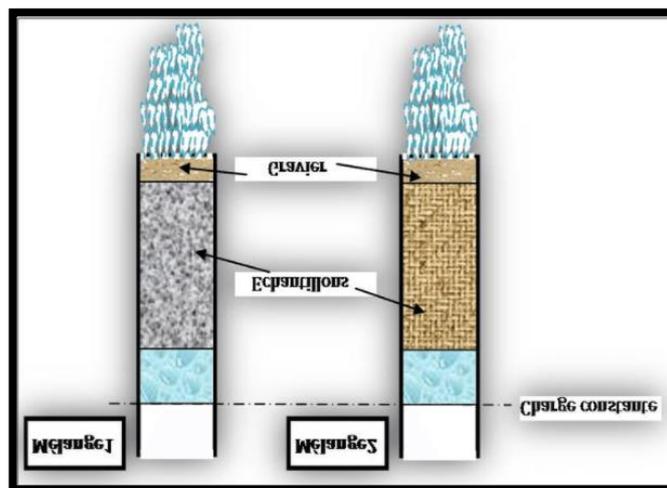


Figure 22 : La conductivité hydraulique.
 (www.researchgate.net)

VI. Comportement mécanique de massif rocheux :

VI.1. Essais mécanique effectués pour les massifs rocheux :

La majorité des problèmes de stabilité en massifs rocheux provenant de la présence de discontinuités, il est particulièrement important de pouvoir en assurer une caractérisation fine, tant du point de vue géométrique que de celui de leurs propriétés mécaniques. Une réflexion importante a initialement été menée pour s'approprier la connaissance de ce type d'essai : préalablement à la réalisation d'un essai mécanique, il est nécessaire de procéder à une préparation de l'échantillon. Chaque éponte est scellée dans une demi-boîte de cisaillement, à l'aide de mortier de forte rigidité. La discontinuité (naturelle ou non) à tester est en général placée à l'horizontale au niveau de la séparation des deux demi boîtes. Le travail initial de finalisation des procédures expérimentales (essai de chargement sous contrainte normale constante), grâce à la réalisation d'essais sur fractures naturelles. Il a mis en évidence l'importance de la réalisation d'au moins trois cycles de charge-décharge, cette méthode décrite par (Gentier 1986 en 2004 et Marache et al. En 2008), afin d'assurer un bon emboîtement des épontes préalablement à l'essai de cisaillement décrit plus bas. Pour ce faire, il s'agit, épontes en place et tout déplacement bloqué dans le plan de l'éponte, d'appliquer des chargements verticaux cycliques (donc normaux au plan de l'éponte) sur une demi-boîte. Par ailleurs, il est nécessaire de positionner les capteurs de déplacement au plus près de la fracture a cependant, si tel n'est pas le cas, on pourra s'affranchir de la déformation de la roche saine en soustrayant cette dernière à la déformation totale afin de ne conserver que la déformation de la fracture au sens strict fin de n'enregistrer que la fermeture de cette dernière et non la déformation de la roche saine.



Figure 23 : Exemple de joint de calcaire scellé en place, essai réalisé au LRPC de Toulouse

a- vue de dessus demi-boîte inférieure uniquement, **b-** vue de côté, joint en place.

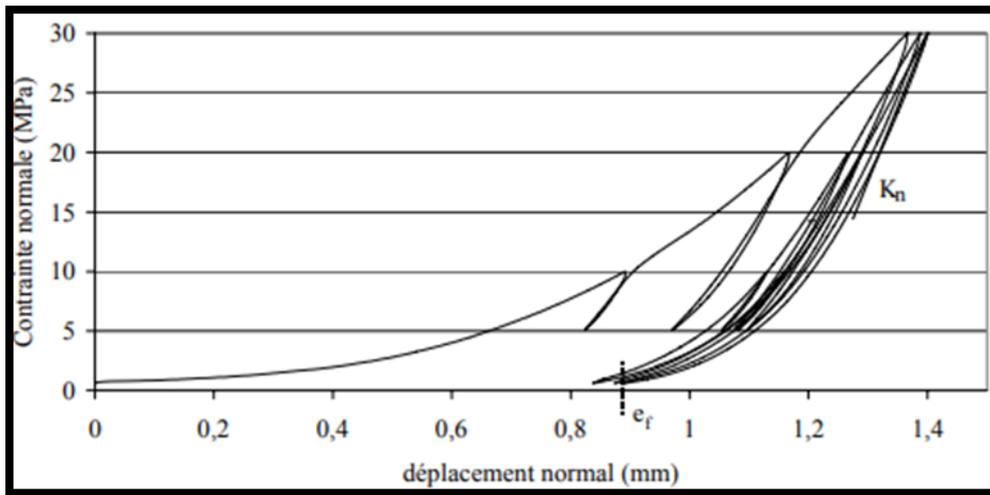


Figure 24 : Comportement à la compression simple d'une discontinuité naturelle de gneiss

Le comportement à la compression simple d'un joint est présenté sur la Figure. La phase initiale, dite « de serrage » correspond à la remise en place des deux épontes. Cette phase se caractérise par une augmentation de la raideur normale, K_n , définie par le rapport $\Delta\sigma_n/\Delta u_n$, (variation de contrainte normale rapportée à la variation de déplacement normal), avec l'augmentation de la charge appliquée. La raideur croît jusqu'à la valeur de la rigidité de la roche saine. Caractéristiques de la matrice naturelle : $\sigma_c = 77$ MPa, $\sigma_t = 9$ MPa [Ar11] Le comportement à la décharge, pour les premiers cycles, dépend du matériau étudié : l'hystérésis qui se manifeste lors des cycles peut être plus ou moins importante en fonction du joint testé, en particulier de son ouverture initiale, de l'imbrication des épontes et du remplissage éventuel. Gentier (1986, 2004) et Marache et al. (2008)

Donc on remarque une mauvaise mise en place des épontes entraînera une augmentation de la déformabilité normale du joint. On constate (expérimentalement) que lorsque plusieurs cycles sont réalisés, ils finissent par se superposer. A la décharge, il restera une fermeture normale permanente celle-ci sera d'autant plus faible que l'emboîtement initial est bon. 60/107 La fermeture maximale du joint est la valeur limite de la fermeture du joint. Elle décroît quand la résistance à la compression simple de la roche constituant les épontes du joint diminue, à rugosité équivalente (CFMR 2000). Il est également important de noter que la résistance en traction d'un joint rocheux est souvent considérée comme nulle. (Ahmari ahmed,2021)

V.I.2. Critères de rupture : Le critère de rupture, d'un joint en cisaillement, le plus utilisé est celui :

Le critère Mohr-Coulomb : Il est représenté soit par la résistance de pic pour les joints rugueux, soit par la résistance résiduelle pour les joints lisses. La résistance résiduelle peut être déterminée à partir d'un essai sur un joint lisse où à partir d'un essai répété sur un joint rugueux jusqu'à la stabilisation de la contrainte tangentielle. La résistance résiduelle peut être liée à la contrainte normale (σ_n) selon le critère de Mohr-Coulomb avec :

C_r : cohésion résiduelle. $\tau_{res} = C_{res} + \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_r)$
 ϕ_r : angle de frottement résiduel.

La résistance de pic est liée à la dilatance, elle peut être aussi liée, selon le critère de Mohr-Coulomb, à un angle de frottement dit de pic et à une cohésion de pic (C_{pk}) :

$$\tau_{pic} = C_{pic} + \sigma_n \cdot \text{tg}(\phi_{pic})$$

Barton (1977) a exprimé l'angle de frottement de pic en fonction de JRC, JCS et la contrainte normale appliquée sur le joint :

$$\phi_{pic} = JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_b$$

(b) est l'angle de frottement de base, qui est fonction de la nature de la roche.

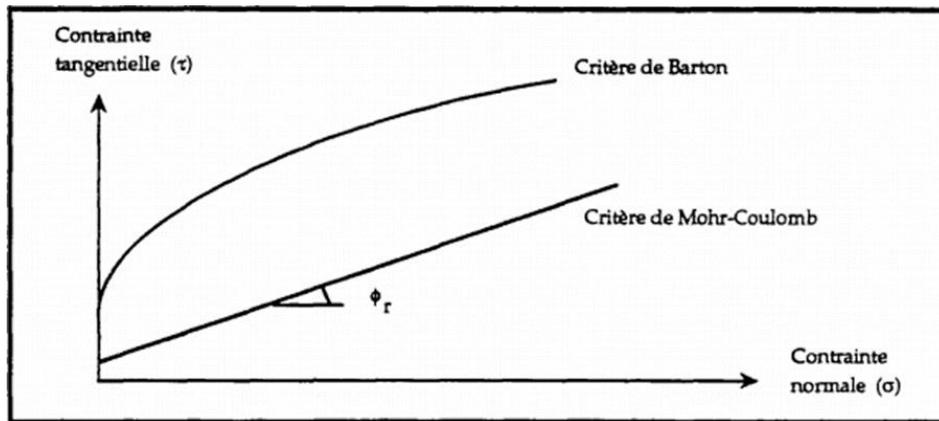


Figure 25 : critère de rupture

Le même auteur (Barton et al. 1985) a proposé une relation liant l'angle de dilatance au JRC mobilisé au cours du cisaillement, à JCS et à la contrainte normale :

$$\delta_p = \frac{L_n}{500} \cdot \left[\frac{JRC_n}{L_n} \right]^{0.33}$$

On s'intéresse toujours à la valeur maximale de l'angle de dilatance ($\hat{\delta}_p$) qui peut représenter l'angle moyen que font les aspérités par rapport au plan moyen du joint. Barton et al. (1985) ont mis en évidence l'influence de la longueur (L_n) du joint sur l'angle de dilatance maximum :

$$\delta_{(mob)} = 0.5 \cdot JRC_{(mob)} \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

La dilatance améliore l'angle de frottement de pic et donne une idée sur la grandeur de la résistance supplémentaire du joint par rapport à la résistance résiduelle. (Idem Ahmari, 2021)

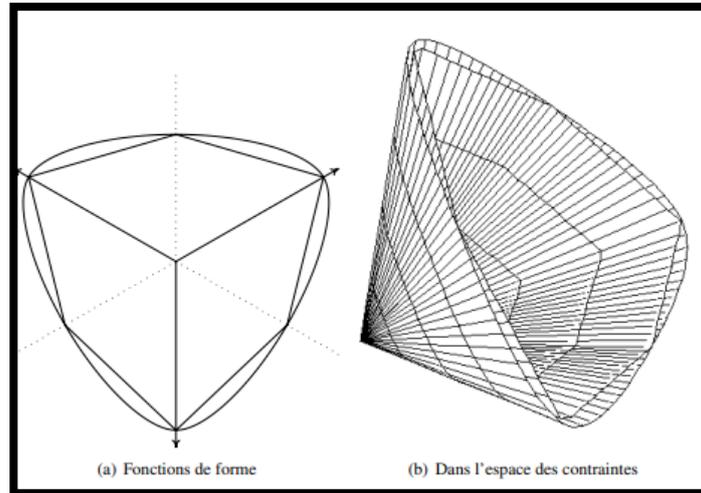


Figure 26 : Approximation du critère de Mohr-Coulomb ($\varphi = 35^\circ$)

Critère de Høek-Brown : Dans le cadre de l'utilisation du critère de Høek-Brown, on peut faire apparaître la contrainte intérieure normalisée, fonction de la contrainte moyenne et des constantes issues du matériau :

$$P_i = \frac{s}{m_b^2} - \frac{\sigma_m}{m_b R_c}$$

La valeur $P_i = 0$ correspond au « *sommet du critère* ». Les constantes s et m_b sont des constantes positives dépendant des caractéristiques du matériau.

1 : (s varie entre 0 et 1). La valeur 1 correspondant à une roche intacte, (s pouvant toutefois être utilisé comme variable d'écrouissage).

2 : Pour une roche intacte, la valeur m_b est égale au constant (m_i), donne les valeurs usuelles Pour différents types de roche. On peut déduire de ces grandeurs que la valeur de (P_i) sera généralement inférieure à un, pour la plupart des états de contrainte. L'approximation du critère de Høek Brown se fait en utilisant les fonctions suivantes :

$$\sigma^+ = \frac{m_b R_c}{4\sqrt{3}} \frac{-1 + \sqrt{1 + 36P_i}}{3}$$

$$L_S = 1 - 0.49e^{-1.25\sqrt{P_i}}$$

Nous pouvons remarquer que la valeur de L_S choisie n'est pas exactement celle provenant du critère de Høek-Brown, il fallait en effet s'assurer que la valeur.

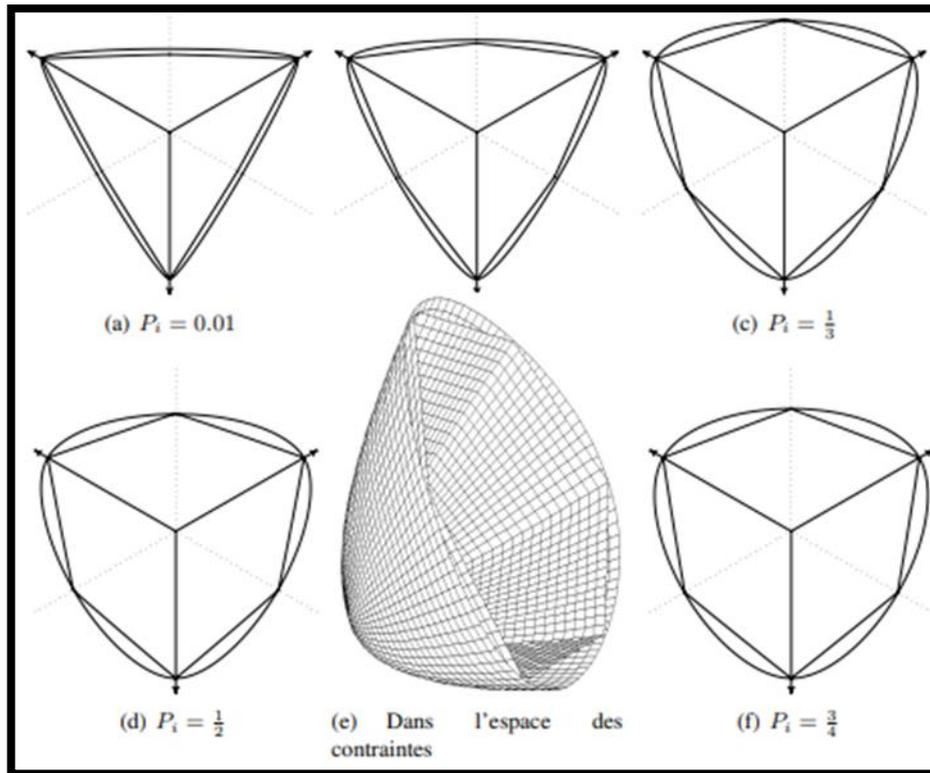


Figure 27 : Forme approchée du critère de Høek-Brown

De L_S demeure toujours strictement plus grande que $1/2$; cependant cette forme, également plus simple, constitue une bonne approximation de la fonction originale (figure I.14). De plus l'écart le plus important est situé pour P_i proche de zéro, c'est à dire la zone de décohésion du matériau. $L_S = \frac{1}{2} + \sqrt{1 + 9P_i} = \frac{1}{2} + \sqrt{1 + 36P_i}$ (I.48) Le critère ainsi proposé a permis de réaliser une forme régularisée du critère de Høek-Brown, rendant compte du caractère parabolique du critère et de sa forme dans le plan déviatorique. (Siegfried Maiolino, 2006)

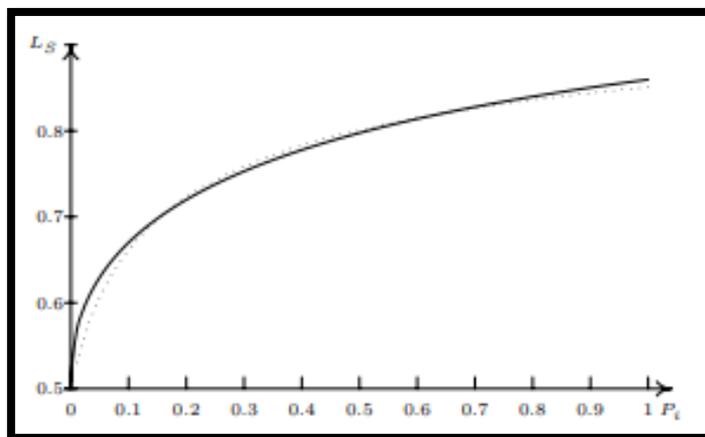


Figure 28 : L_S de Høek-Brown (pointillé) et L_S approché

Tableau 01 : Valeurs de mi pour différents types de roches

Type	Classe	Groupe	Texture			
			A gros grains	Moyenne	Fine	Très fine
Sédimentaires	Clastiques		Conglomérat (22)	Grès 19 _____Greywacke _____ (18)	Siltstone 9	Argilite 4
	Non Clastiques	Organiques		_____Craie _____ 7 _____Charbon _____ (8-21)		
		Carbonates	Brèche (20)	Calcaire Sparitique (10)	Calcaire Micritique 8	
		Chimique		Gypse 16	Anhydrite 13	
Métamorphiques	Non feuilletées		Marbre 9	Cornéenne (19)	Quartzites 24	
	Légèrement feuilletées		Migmatite (30)	Amphibolite 25-31	Mylonites (6)	
	Feuilletées ¹⁶		Gneiss 33	Schistes 4-8	Phyllites (10)	Slate 9
Ignées	Claires		Granite 33		Rhyolite (16)	Obsidienne (19)
			Granodiorite (30) Diorite (28)		Dacite (17) Andésite 19	
	Sombres		Gabbro 27 Norite 22	Dolérite (19)	Basalte (17)	
		Pyroclastiques Extrusives	Agglomérat (20)	Brèche (18)	Tuff (15)	

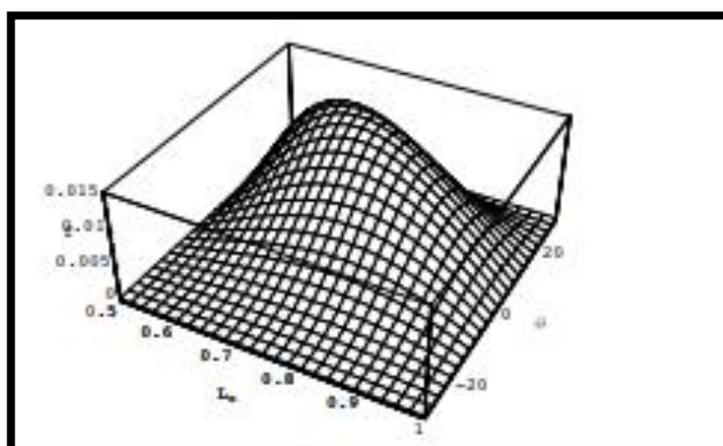


Figure 29 : Valeurs pour $g_p(\theta) = g_{ww} p(\theta)$

Conclusion :

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse. L'analyse des conditions de stabilité commence par une description et une représentation des surfaces de discontinuités. La présence des discontinuités peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif. L'étude des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basée sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se basé sur la caractérisation géométrique des discontinuités. Donc les propriétés du massif et leurs facteurs affectent sa stabilité.



Chapitre 02 :
Classification des massifs rocheux.

Introduction :

La classification des massifs rocheux est la méthode la plus utilisée pour caractériser un massif du point de vue qualité, portance et stabilité. Les classifications les plus connues sont généralement le système RMR et le système Q. Ces systèmes de classification sont présentés par plusieurs auteurs comme (Hooke et al., 1995), (Singh et Goel, 1999), (AFTES : Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain, 2003). Dont le but de déterminer le soutènement des tunnels, ces classifications ont été élaborées et développées sur la base de certains cas pratiques, de données des propriétés géologiques et de performance des soutènements utilisés pour différents projets souterrains de référence. Ces classifications prennent en considération des données très importantes du massif rocheux à savoir, la résistance de la roche intacte, l'écoulement souterrain, la contrainte in situ et les propriétés des discontinuités (le nombre, l'espacement, l'inclinaison et les propriétés des interfaces des discontinuités... etc.). On peut utiliser ces méthodes à la phase de l'étude préliminaires pour prévoir le soutènement adéquat. Cependant, à cette phase, les informations détaillées nécessaires à l'application de ces systèmes de classification ne seront pas encore disponibles. Pour résoudre ce problème, des méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher, ont été mise au point et servent aux recommandations du soutènement RQD (Rock Quality Désignation), RMR (Rock Mass Rating), Q-system, GSI (Geological StrengthIndex), SMR (SlopMassRating).

Dans ce chapitre, nous abordons les méthodes de classification géomécanique des massifs rocheux. En premier lieu, nous présentons les types de classification existante, puis nous exposons quatre classifications géomécaniques largement utilisées dans le domaine de la Mécanique des Roches : (RQD, RMR, Qsystème, GSI).

I. Les classifications géomécaniques :

I.1. Types et buts des systèmes de classification :

Les classifications des massifs rocheux fracturés continuent à évoluer depuis plus d'un siècle (Stille et Palmström, 2003 in Armatys Maciej, 2012).

Leur utilisation a un intérêt considérable lors de l'étude de faisabilité et de dimensionnement préliminaire d'un projet (Bieniawski, 1984), surtout quand les informations mécaniques, hydrologiques et l'état de contrainte in-situ du massif rocheux ne sont pas disponibles (Stille et Palmström, 2003).

Les systèmes de classification prennent en considération plusieurs facteurs affectant la stabilité des massifs rocheux (Stille et Palmström, 2003). Ces facteurs sont reliés notamment à la résistance de la matrice rocheuse, la présence de l'eau et la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage) (Stille et Palmström, 2003). Nous nous intéressons, dans ce qui suit, aux systèmes de classifications quantitatives, nommés également classifications géomécaniques (Stille et Palmström, 2003).

I.2. Buts de classification des massifs rocheux :

Les buts principaux de ces classifications se résument comme suit (Michel CHALHOUB, 26 juin 2006)

1/ Estimer indirectement les propriétés mécaniques à grande échelle d'un massif fracturé en particulier son module de déformation, sa résistance à la compression simple, sa cohésion et son angle de frottement interne (Michel CHALHOUB, 26 juin 2006).

2/Estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement (stand up time) (Michel CHALHOUB, 26 juin 2006). C'est un indice très essentiel dans la détermination de la portée d'excavation en cas d'exploitation minière.

3/ Donner des recommandations nécessaires pour les soutènements des ouvrages.

D'après Singh et Goel (1999) la popularité des classifications quantitatives dérive de plusieurs facteurs (Palmstrom, 1995). Elles représentent un langage commun entre les géologues, les ingénieurs, les concepteurs et les entrepreneurs. Moyennant ces classifications, l'observation, l'expérience et le jugement des ingénieurs sont mieux corrélés. Ces systèmes de classification ont été développés à une époque où la plupart des ouvrages d'excavation sont réalisés par technique dite technique d'essai-erreur (Bieniawski,1973). De nos jours, l'utilité de ces systèmes est rarement recommandée vue que ces systèmes ont été développés pour des conditions d'utilisation particulière ou bien calibrés d'après un nombre très limité d'études de cas documentés (AFTES,2003). Actuellement, il existe plusieurs systèmes de classification modernes dans la littérature. (AFTES,2003).

Le Tableau 02 : Système de classification des massifs rocheux (Bieniwaski,1993 ; Palmstrom,1995)

Rock Loads	Référence	Pays d'origine	Applications
Système de classification	Terzaghi, 1946	E.U.A	Tunnels avec support en acier
Stand-up time	Lauffer, 1958	Autriche	Tunnels
New Austrian tunnelling method (NATM)	Rabcewics, 1964/1965, 1975	Autriche	Tunnels
Rock Quality Designation	Deere, 1968	E.U.A	Carottes de forage, tunnels
Rock Strength Rating (RSR)	Wickham et al, 1972	E.U.A	Tunnels
Rock Mass Rating (RMR)	Bieniawski, 1973, 1974, 1976, 1979, 1989	Afrique du Sud E.A.U	Tunnels, mines, SLOPES, fondations.
Extensions du système RMR	Laubscher 1977, 1984 Ghose and Raju, 1981 Kendorski et al, 1983 Seraphim and Pereira, 1983	Norvège	Mines Mines de charbon Mines en roche dure Fondations
	Gonzales de Vallejo, 1983 Unal, 1983 Romana, 1985 Newman and Bieniawski, 1985		Tunnels Support du toit/charbon Stabilité des pentes Mines de charbon
Rock Mass Quality	Barton et al, 1974	Canada	Tunnels, chambres
Strength-Size	Franklin, 1975		Tunnels
Basic geotechnical description	ISRM, 1981a	Canada	Communication général
Geological strength index (GSI)	Hoek et al, 1995		Mines

On remarque que les systèmes les plus utilisés sont le RQD (Rock Quality Designation), RMR (Rock Mass Rating) et le système Q (Rock Mass Quality), ainsi que le GSI (Geological Strength Index : Indice de résistance géologique). Malgré que ces systèmes caractérisent la masse rocheuse de manière distincte l'une de l'autre, ils s'intéressent essentiellement aux différents paramètres reliés au comportement mécanique du massif rocheux.

Avant l'utilisation d'un système de classification particulier, il est primordial de bien saisir les subtilités que présente chacun afin d'assurer la compatibilité avec le massif rocheux étudié (MaciejArmatys,2012).

I.2.1. Le RQD : Rock Quality Designation :

(Deere 1964) : a proposé un paramètre pour évaluer la qualité de la roche dans le massif rocheux, et ceci selon un index intitulé RQD (Rock Quality Designation). A partir de forage géologique, cet indice représente l'évaluation du pourcentage des carottes récupérées sur une longueur précise parcourue par le carottage. Basée sur un procédé qualitatif, seule la somme des longueurs de morceaux de plus de 10 Cm est conservée et cette somme est divisée par la longueur de course de la carotte de forage. Ce paramètre est défini comme suit :

$$RQD(\%) = \frac{\sum \text{longueurs de pièces} \geq 100\text{mm}}{\text{longueur totale de la course}} \times 100$$

(Deere et al), (1967) affirment que le RQD est très utile pour déterminer le facteur de réduction du module de déformation de la roche intacte à la masse rocheuse (V. Marinos et P. Marinos et E.Hoek, 2005).

La relation entre la valeur du RQD et la qualité du massif peut être établie selon la proposition de Deere (1968) (V. Marinos et P. Marinos et E. Hoek, février 2005) et elle est présentée au Tableau 4.2 ci-dessous (Maciej Armatys,2012).

Tableau 03 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux (Maciej Armatys,2012 tirés par Deere,1968).

RQD (%)	Qualité du massif rocheux
<25	Très pauvre
25–50	Pauvre
50–75	Moyenne
75–90	Bonne
90–100	Excellente

Le RQD peut également être déterminé à partir de la fréquence de discontinuité linéaire obtenue à partir de l'échantillonnage des lignes balayées sur terrain. Les corrélations entre RQD et la fréquence de discontinuité linéaire a été dérivée pour différentes formes de distribution d'espacement de discontinuité (Priest et Hudson, 1976 ; Sen et Kazi, 1984 ; Sen, 1993 in Lianyang Zhang, 2016). Par exemple, pour une distribution exponentielle négative des espacements de discontinuité, Priest et Hudson (1976) ont dérivé la relation suivante entre RQD et la fréquence de discontinuité linéaire

$$RQD = 100e^{-0.1}(0.1\lambda + 1)$$

Avec λ = fréquence de discontinuité linéaire

Cette corrélation constitue un secours en cas où le forage ou bien le sondage géologique n'est plus disponible.

L'utilisation de carottes de forage géologique n'est pas le seul moyen pour estimer l'indice RQD, en 1976 Priest et Hudson ont établi une relation entre l'espacement des joints (joints/mètre) déterminé à partir de mesure de surface du massif rocheux concerné et de l'indice RQD, la relation est comme suit :

$$RQD = 100e^{-0.1}(0.1\lambda + 1)$$

Cette corrélation constitue un secours en cas où le forage ou bien le sondage géologique n'est plus disponible.

(Palmström en 1982) a également proposé une méthode pour un massif rocheux sans remplissage d'argile. A travers cette méthode, l'indice RQD peut être indirectement déterminé par le nombre de joints/discontinuités par unité de volume pour définir la somme volumétrique des joints (J_v) caractérisant la surface du massif rocheux (RongzhenWang, 2017) :

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Avec J_v = nombre de joint par unité de volume (m^3)

Pour : $J_v < 4.5$ le $RQD = 100$

Le système de classification RQD se base sur des forages géologiques standards, sa plus grande force retombe sur sa simplicité, la vitesse d'acquisition et aussi simple sauf qu'il est peu coûteux. Le RQD doit être interprété comme un indice de qualité du massif lorsque la roche présente des caractéristiques problématiques comme un haut degré de détérioration et se présente par un comportement ductile, une zone de cisaillement ou un massif fracturé (Deere 1988 RongzhenWang, 2017). Ceci signifie que l'indice RQD est seulement capable d'évaluer la partie intacte du massif rocheux (RongzhenWang, 2017).

I.2.2. Le RMR : Rock Mass Rating :

Cette classification a été développée par Bieniawski (SACSIR : South African. Council of Scientific and Industrial Research, 1973). L'utilisation de cette classification nécessite de diviser au préalable le site en régions homogènes d'un point de vue de structures géologiques. Chaque région est classifiée séparément, Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation et d'une note d'ajustement. La classification RMR consista à diviser au préalable le site concerné en régions structurellement homogènes (du point de vue structure géologique), chaque région est classifiée séparément. Le RMR résulte de la somme de cinq notes de caractérisation (les notes vont de A1 à A5) et d'une note d'ajustement (JNGG 2002, 8 et 9 octobre 2002). Un exemple de ces paramètres est illustré sur la figure X. La somme de ces notes

attribue une valeur comprise de 0 et 100 au massif. De cette valeur 70% sont attribués à la fracturation, 15% aux propriétés de la matrice rocheuse et 15% à la présence d'eau.

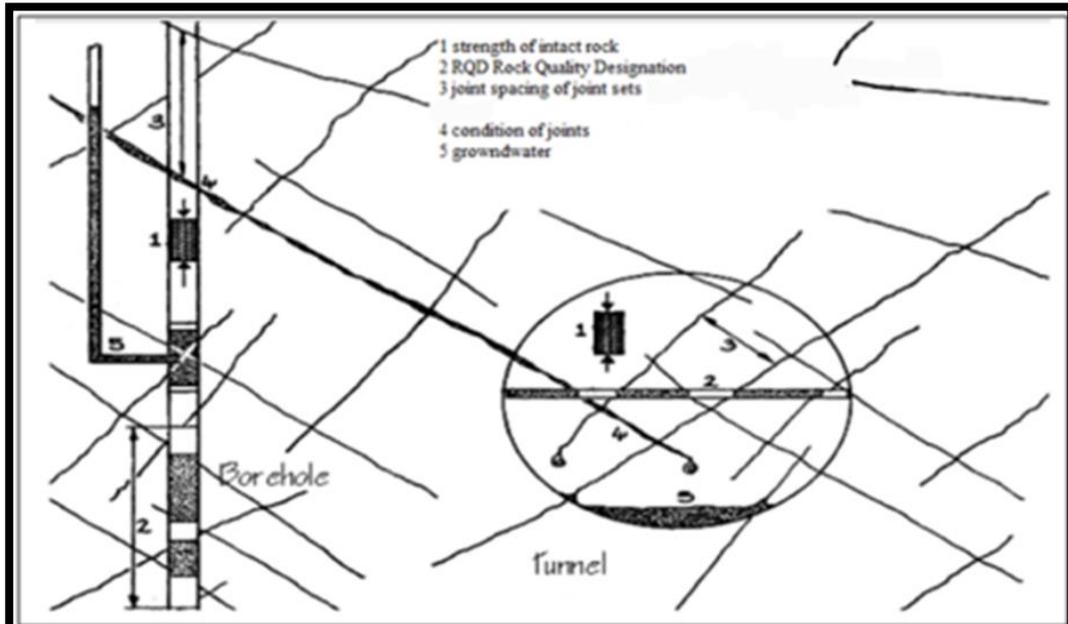


Figure 30 : Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR (Michel CHALHOUB, 2006).

La signification des indices du RMR sont définis comme suit (JNGG 2002) :

- A1(Strength of intact rock material) :la résistance à la compression simple de la matrice rocheuse qui est obtenue, soit par procédure d'écrasement d'échantillon, soit par procédure de chargement ponctuel (note de 0 à 15).
- A2 (Rock Quality Designation RQD, Deer (1964)) : il caractérise la qualité des carottes de sondage en calculant le rapport entre la longueur cumulée des carottes supérieures à 10 centimètres et la longueur totale carotté (note : de 3 à 20).
- A3 (Spacing of discontinuities) : dans le cas de plusieurs familles de fractures le minimum des notes attribuées à l'espacement des fractures est considéré (note : de 5 à 20).
- A4 (Conditions of discontinuities) : cet indice caractérise l'extension, l'ouverture, la rugosité, le matériau de remplissage et l'altération des épontes des discontinuités (note :de 0 à 30).
- A5(Ground water conditions) : Il est en rapport avec les conditions hydrogéologiques et consiste à réaliser des mesures de flux d'eau ou de pressions interstitielles des joints (note de 0 à 15).
- B (Adjustment for joint orientation) : c'est un facteur correctif qui est en rapport avec l'effet de l'azimut et du pendage des familles de discontinuités sur la stabilité de l'ouvrage (note : de -12 à 12 pour les tunnels, de -25 à 0 pour les fondations et de -60 à 0 pour les talus).

Les sommes des cinq premiers indices caractérisent le RMR de base. Quant aux travaux souterrains, il faut ajouter l'effet du facteur correctif. Le RMR 89 s'écrit donc (Bieniawski,1989) :

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

Cette classification ne prend pas en considération l'état de contrainte in-situ ni la rugosité des fractures et l'angle de frottement du matériau de remplissage ; les roches gonflantes n'y sont pas non plus traitées (Michel CHALHOUB, 2006).L'application de cette classification est limitée aux cas des massifs dont la matrice a une bonne résistance et dont le comportement est régi par les discontinuités .La version 1976 du système de classification (RMR76) l'utilisation du RMR se repose sur la simplicité à déterminer les différent paramètres suivants et leurs pondérations (Michel CHALHOUB, 2006).

- A1 : Résistance en compression de la roche intacte.
- A2: Rock Quality Index (RQD).
- A3 : Espacement des diaclases.
- A4 : Condition des joints.
- A5 : L'état d'infiltration d'eau ou terrain.
- A6 : Orientation des discontinuités.

$$RMR_{76} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

Tableau 04 : Classification du massif rocheux selon RMR, traduit de Bieniawski (Michel CHALHOUB, 2006)

Classe du massif	RMR	Qualification
I	81–100	Excellente
II	61–80	Bonne
III	41–60	Moyenne
IV	21–40	Faible
V	<20	Très faible

I.2.3. Le Q-Système : (Barton et al. 1974) ont introduit le système Q, qui consiste à un indice permettant de décrire la qualité de la masse rocheuse pour l'excavation de tunnels (Michel CHALHOU,2006). Le système de classification se nomme Rock Mass Quality ou Tunneling Quality Index (système Q) ou tout simplement système du NGI en hommage de l'Institution Géotechnique Norvégienne.

Le système Q juge important d'évaluer, en tant que paramètres de classification, six caractéristiques particulières du massif rocheux, soit :

- Indice RQD (Deere,1964)
- Nombre de familles de joints (JN)
- Indice de rugosité des joints (JR), celle du plus faible plan de fissuration
- Indice de l'altération des joints (JA), caractéristiques de ce dont les fissures sont remplies
- Facteur de réduction pour la présence d'eau (JW)
- Facteur de réduction pour les contraintes in-situ (SRF)

La valeur des différents paramètres de cette classification, ainsi que des notes explicatives supplémentaires permettant d'évaluer ceux-ci plus adéquatement, sont donnés au Tableau.

Tableau 05 : Valeur des différents paramètres de la classification Q-Système (D'après Barton et al, 1974)

Altération des diaclases		Jr
<i>Parois en contact</i>		
Dure, élastiques, remplissage imperméable		0.75
Non altérées, salissage de surface seulement		1
Légèrement altérées, minéraux non déformables, particules sableuses etc.		2
Remplissage silteux, sableux, avec une faible fraction d'argile		3
Matériaux déformables, i.e kaolinite, mica etc. épaisseur < 1-2 mm		4
Infiltration d'eau	Jw	Pression d'eau (kgf/cm ²)
Sec ou infiltration mineure <5 l/m	1	< 0.1
Infiltration moyenne, lessivage occasionnel	0.66	1.0 – 2.5
Infiltration importante, roc compétant sans remplissage	0.5	2.5 – 10
Infiltration importante	0.33	2.5 – 10
Infiltration exceptionnelle importante après sautage, réduction dans le temps	0.2 – 0.1	> 10
Infiltration exceptionnellement importante	0.1 0.05	> 10

Nombre de famille de diaclases	Jn	
Massif, peu ou pas de diaclases	0.5 – 1	
Une famille de diaclases	2	
Une famille et diaclases aléatoires	3	
Deux familles de diaclases	4	
Deux famille et diaclases aléatoires	6	
Trois familles de diaclases	9	1 pour une intersection, utilisez 3 × Jn
Trois familles et diaclases aléatoires	12	
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses	15	2 pour un portail, utilisez 3 × Jn
Roche concassée, semblable à un sol	20	
Rugosité des diaclases		Jr
<i>Parois en contact</i>		
Diaclases discontinues	4	
Rugueuses, irrégulières, ondulées	3	
Lisses, ondulées	2	
Très lisses, ondulées	1.5	1. Ajoutez 1.0 si l'espacement moyen de la famille dominante > 3m
Rugueuses ou irrégulières, planaires	1.5	
Lisses, planaires	1	
Très lisses, planaires	0.5	
<i>parois séparées lorsque cisaille</i>		Jr
Zone avec remplissage de minéraux argileux assez épais pour empêcher le contact des parois.	1	
Zone sableuse, de gravier ou concassé assez épaisse pour empêcher le contact des parois.	1	

Le calcul de la cote Q se fait comme suit et varie sur une échelle logarithmique de 0,001 à 1000 :

$$Q = \left[\frac{RQD}{J_N} \right] \times \left[\frac{J_R}{J_A} \right] \times \left[\frac{J_W}{SRF} \right]$$

Les trois quotients de la formule représentent des caractéristiques particulières du massif rocheux, l'interprétation est la suivante (Michel CHALHOUB, 22 juin 2006)

- RQD/JN représente la structure globale du massif, ce qui constitue une mesure approximative de la taille des blocs rocheux (éléments dissemblables)

- JR/JA représente la résistance au cisaillement des discontinuités (les plus défavorable sous argileuses) séparant les blocs rocheux
- JW/SRF consiste le paramètre de réduction due à la présence d'eau JW qui a un effet néfaste sur la résistance au cisaillement et indirectement quant à l'évaluation de l'état général des contraintes SRF (Michel CHALHOUB, 2006).

La cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau 06 présente cette qualification :

Tableau 06. Evaluation de la cote Q et de la qualité du massif

Indices Q	Qualité de la masse rocheuse
0.001–0.01	Exceptionnellement pauvre
0.01–0.1	Extrêmement pauvre
0.1–1	Très pauvre
1–4	Pauvre
4–10	Moyenne
10–40	Bonne
40–100	Très bonne
100–400	Extrêmement bonne
400	Exceptionnellement bonne

(Bieniawski 1976) : a été le premier à proposer des corrélations empiriques entre le RMR et le Q-Système.

$$\text{RMR} = 9 \log Q + 44$$

Le RMR et le Q-Système ne prennent pas en considération les mêmes paramètres et donc elles ne sont pas équivalentes (Kharfallah A et Kherrat A, 2020).

I.2.4. Le GSI : Géological Strength Index :

Introduit par Hoek et al. (1995) puis amélioré par Hoek et Brown (1997). Le Geological Strength Index "Indice de résistance géologique" ne présente pas une classification géomécanique en tant que telle. Cependant il constitue un lien entre le RMR (Q-Système) et la détermination des paramètres de déformabilité et de résistance des massifs rocheux (Kharfallah A et Kherrat A, 2020). Afin d'estimer le GSI, il est nécessaire de calculer le RMR' de base et le Q' qui sont des valeurs modifiées de RMR et de Q. Le RMR de base est calculé comme une valeur 15 pour le coefficient relatif à l'eau (A5) et une valeur nulle pour le coefficient de correction relatif à l'orientation des discontinuités (B) (Kharfallah A et Kherrat Abdallah, 2020).

$$\text{RMR}_{\text{Base}} = A1 + A2 + A3 + A4 + 15$$

De même, Q' se calcule en ne tenant pas compte de l'état initial du massif par rapport à l'eau et aux contraintes (J_w/SRF) (Kharfallah A et Kherrat A, 2020).

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a}$$

Ayant calculé RMR' et Q' le GSI se détermine comme suit (V. Marinos et P. Marinos et E. Hoek, 2005).

$$GSI = RMR'_{89} - 5 \quad \text{si } RMR'_{89} > 23$$

$$GSI = 9(\log Q' + 44) \quad \text{si } RMR'_{89} \leq 23$$

L'estimation du GSI s'appuie sur une observation directe de la structure du massif rocheux à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. Cet indice varie entre 5 et 85. Par définition, les valeurs proches de 5 correspondent à des matériaux de très mauvaise qualité, tandis que les valeurs proches de 85 décrivent des matériaux d'excellente qualité.

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré essentiellement à la description des systèmes de classification des massifs rocheux. Ces systèmes (RQD, RMR, Q système, GSI), ont été développés dont le but de prévoir les soutènements des ouvrages implantés sur des terrains rocheux. D'après les renseignements acquis à travers notre recherche, nous avons conclu que généralement ces méthodes prennent en considération des facteurs très importants, parmi ces facteurs il y a ceux qui sont liés aux propriétés intrinsèques du massif rocheux telle que la résistance la cohésion et l'angle de frottement interne de la matrice rocheuse, d'autres sont liés beaucoup plus aux conditions au limite de ce massif tel que la description des discontinuités (nombre de familles, espacement, rugosité, altération des épontes, matériau de remplissage ... etc.), la présence de l'eau, les propriétés mécaniques des plans de discontinuité ... etc., l'utilisation de ces systèmes dans les différents cas de projet (exploitation minière, tunnels, pont, ... etc.) permet de :

- 1- caractériser le massif du pont de vue qualité, portance et stabilité.
- 2- choisir le confortement convenable à l'état de stabilité du massif rocheux.

Des corrélations permettent même d'estimer le temps durant lequel le massif rocheux peut tenir sans soutènement.

Certainement, ces systèmes sont très utiles pour la caractérisation des massifs rocheux, cependant, la mise en place d'un soutènement nécessite la connaissance du mécanisme de rupture affectant le massif ainsi qu'une analyse de stabilité de ce dernier. A cet effet le chapitre qui suit sera consacré à aborder les différents types de ruptures et les approches de l'analyse d'instabilité dans les massifs rocheux.

Chapitre 03 :

***Différents types de ruptures et
approche à l'analyse d'instabilité
dans les massifs rocheux***

Introduction :

Les massifs rocheux sont présentés comme un milieu discontinu, composé de discontinuités et de la matrice rocheuse. L'analyse des conditions de stabilité commence par une description et une représentation des surfaces de discontinuités. La présence des discontinuités peut avoir une grande influence sur le comportement et la structure du massif. L'étude des massifs rocheux ne sont donc pas seulement basée sur la caractérisation de la roche saine, mais on doit se basé sur la caractérisation géométrique des discontinuités. Les systèmes de classifications des massifs rocheux sont des méthodes empiriques qui déterminent les propriétés du massif en fonction de plusieurs facteurs affectent sa stabilité.

Hoek et Bary (1981) ont dénombré un certain nombre de mécanismes élémentaires de rupture qui peuvent résulter des différentes combinaisons des familles de fractures existant dans le massif. Ces mécanismes de rupture sont les plus simples qu'on peut rencontrer, mais dans la plupart des cas, la rupture est plus complexe, suivant la distribution du réseau de discontinuités dans le massif. Les ruptures impliquant le déplacement des blocs de roche sur les discontinuités combinent un ou plusieurs modes de rupture. Les mécanismes élémentaires de rupture sont les suivants :

La rupture circulaire

La rupture en glissement plan

La rupture en dièdre et la rupture en basculement.

Donc l'instabilités des massifs rocheux sont majoritairement contrôlées par la présence des discontinuités (failles, diaclase, familles de fractures, etc...). Lorsqu'un massif rocheux est folié et jointe, il peut présenter de nombreux risques d'instabilité en raison des possibilités de développement de divers modes de rupture. Ces derniers sont : la rupture circulaire, le glissement sur un plan (failles ou joints) ou d'un dièdre (plusieurs familles de joints) et le développement de zone d'instabilité en (kink) pour former des zones de rupture par fauchage (« toppling »). Les divers modes de rupture qui ont été mentionnés plus haut peuvent se produire concurremment dans le cadre de la même fosse à ciel ouvert. Tout dépend de l'attitude spatiale des différentes structures géologiques. Pour effectuer une meilleure analyse en géologie, il est préférable de connaître les différents modes de rupture. L'influence de la pression d'eau Les roches dans l'écorce terrestre sont généralement saturées en eau. Cette eau a une grande influence sur leurs comportements, en particulier à la rupture. La circulation de l'eau dans les massifs rocheux est liée essentiellement à l'existence des discontinuités. La présence d'eau dans les discontinuités entraîne une réduction de leur résistance au cisaillement (Panet, 1976).

I. classification basée sur les modes de rupture :

Ils existent plusieurs types ruptures affectant les massifs rocheux, bien que l'on trouve quelques légères malgré certaines distinctions entre les auteurs, les catégories suivantes qui sont très largement admises sont :

I.1. Dégradation superficielle (délitage, desquamation) :

Il s'agit de décollements superficiels de petits fragments de roche résultant généralement de l'altération de la roche. L'action de la pluie, du gel ou des venues d'eau à travers une longue période peut engendrer des dommages très remarquables sur la roche, ces dommages se traduisent essentiellement par des chutes de pierres (PanetM.,1991). Ce phénomène n'est pas toujours quelconque vis à vis des mouvements de grande ampleur dans la mesure où le départ de petits blocs peut parfois suffire à déstabiliser des masses beaucoup plus importantes (Sharp JC, 1996).

I.2. Glissement plan :

Ce type d'instabilité correspond à un mouvement gravitaire de translation d'une masse de roche (généralement plane) sur un plan de discontinuité du massif (discontinuité par fracture, plan de stratification, banc sur banc... etc. Le plan de rupture doit impérativement resurgir dans le versant avec un plongement important vers l'aval, pour que le glissement puisse se produire. Les conditions de rupture, qui peuvent être assimilées à un problème en deux dimensions, sont atteintes lorsque la résistance au frottement sur le plan de rupture est plus faible devant les efforts déstabilisateurs (Calvino A. Dumont P., Durville JL. Et al.,2001).

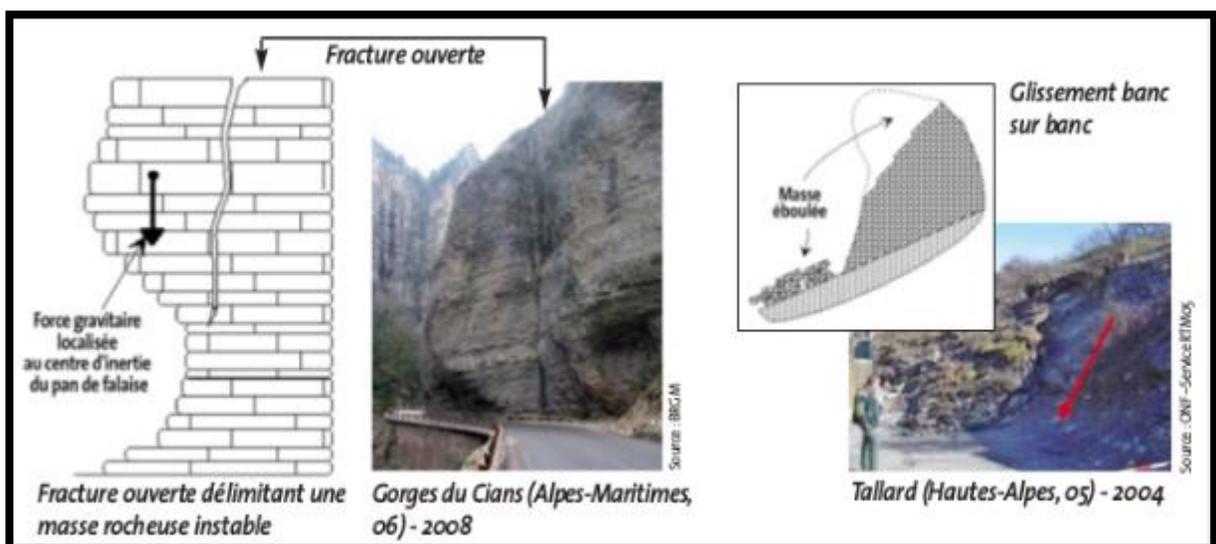


Figure 31 : Glissement plan blanc sur blanc

I.3. Rupture de pied :

La rupture de pied est généralement assimilée au glissement plan par de nombreux auteurs (Calvino A. Dumont P., Durville JL. et al,2001), est individualisé par Calvino *et al* dans le guide de conception des parades contre les instabilités rocheuses. Il s'agit alors d'une rupture avec glissement vers l'extérieur de la base d'une écaille ou d'une colonne.



Figure 32 : Rupture de pied (guide technique, 2004)

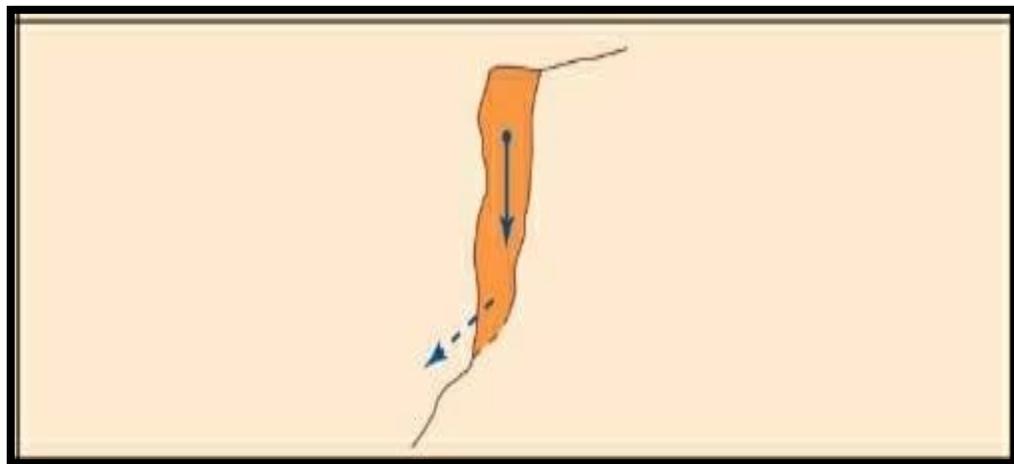


Figure 33 : Schéma de Rupture de pied (guide technique,2004)

I.4. Glissement de dièdre (ou en coin) :

Ce type de configuration correspond à une translation d'un compartiment rocheux sur 2 discontinuités planes formant un angle entre eux dite dièdre (Figure 34). Pareillement au glissement plan, les deux plans formant le dièdre doivent recouper le versant avec un plongement aval suffisant (J.L. Nédellec, M. Cruchet, 2003). Les efforts déstabilisateurs doivent excéder la résistance au cisaillement sur les plans de glissement pour conduire à une rupture. Ce type de configuration est généralement étudié à l'aide de formules analytiques assez simples (Calvino A. Dumont P., Durville JL. et al., 2001).

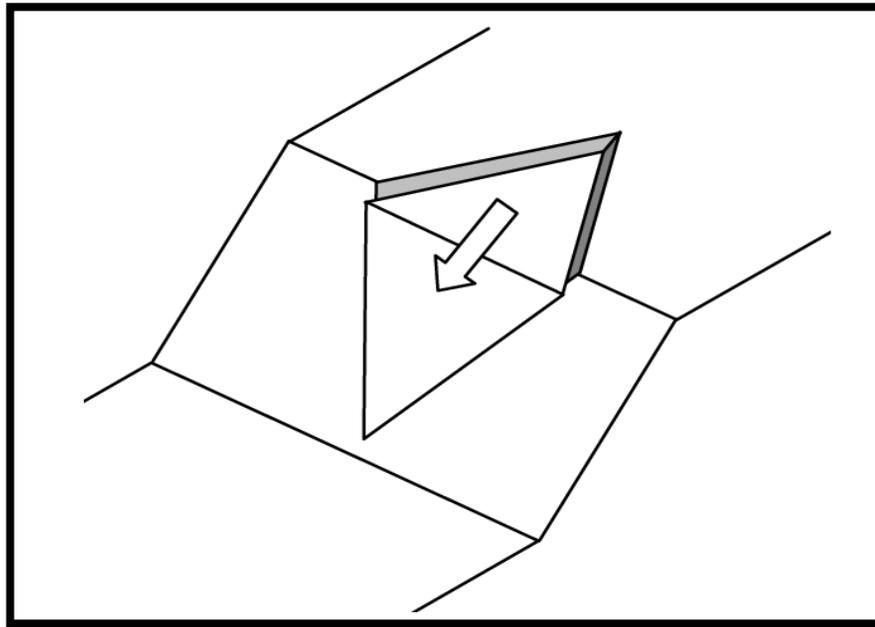


Figure 34 : Rupture en dièdre (Abdelouahed TAHIRI, 2011)

I.5. Rupture de surplomb :

Le massif rocheux devient instable lorsque les efforts de traction, de flexion et de cisaillement ne peuvent plus être compensés par la résistance des matériaux (Calvino A. Dumont P., Durville JL. et al., 2001). Également, pour ce type de rupture, une approche purement analytique peut être adoptée pour analyser les mécanismes de rupture (Calvino A. Dumont P., Durville JL. et al., 2001)

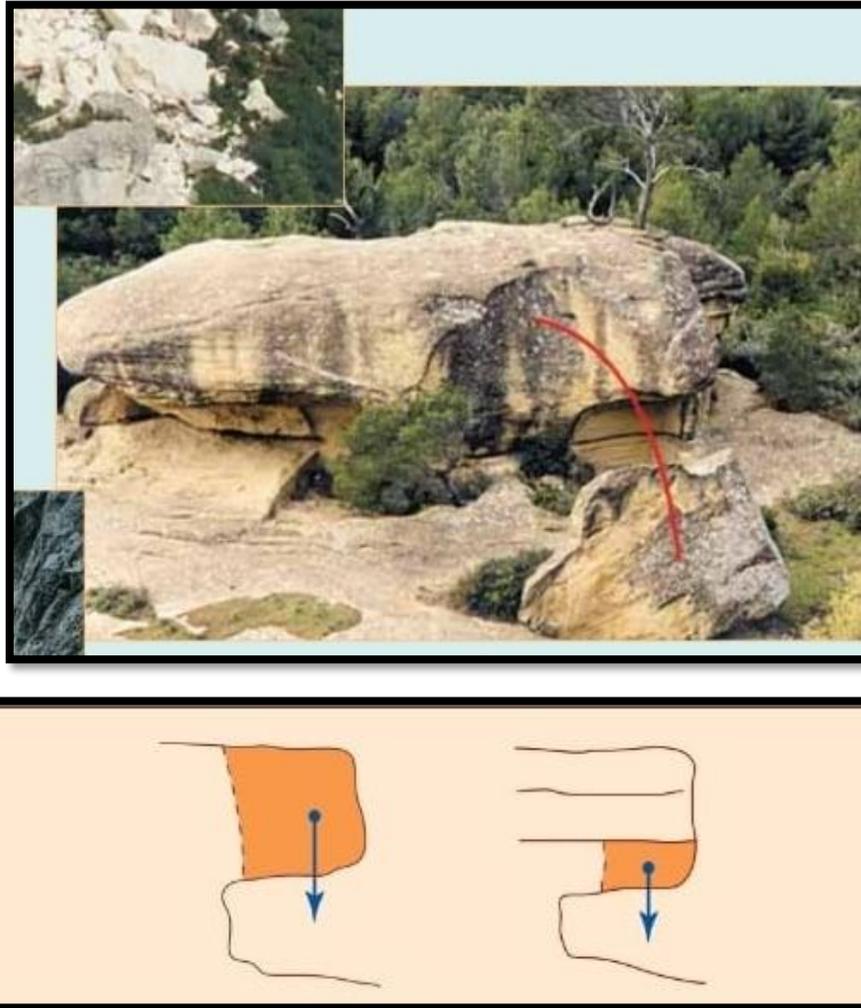


Figure 35 : Photo real et un schéma de Rupture de surplomb (guide technique, 2004)

I.6. Rupture par basculement :

Ce type de déstabilisations produit lorsque le massif rocheux est découpé par des discontinuités presque verticales (schistosités, stratifications, diaclases, failles, fissures de traction, prismes de refroidissement...) et profondes, les structurant en grandes écailles ou colonnes. Ces colonnes présentent donc une géométrie très favorable au basculement. En effet, du fait de leur élancement, un relativement faible effort ou mouvement vers l'aval suffit à les déstabiliser. Le basculement se produit lorsque la projection du centre de gravité de la colonne rocheuse sort du polygone de base (Williams A.T., Davies P. Bomboe P., 1993). Quatre types de configuration sont généralement à l'origine de ce phénomène (certains auteurs comme Norrish et Wyllie (Norrish N, Willy W. (1999) ou Goodman and Bray proposent des sous-classes en fonction de l'origine de l'instabilité).

Chute de résistance du pied (par présence d'un terrain moins résistant sous le massif rocheux, par fatigue, par fluage, par érosion). Le terrain à la base de la colonne a tendance de s'affaisser légèrement ce qui favorise le décollement et le basculement du pan de rocher (Norrish N, Willy W., 1999).

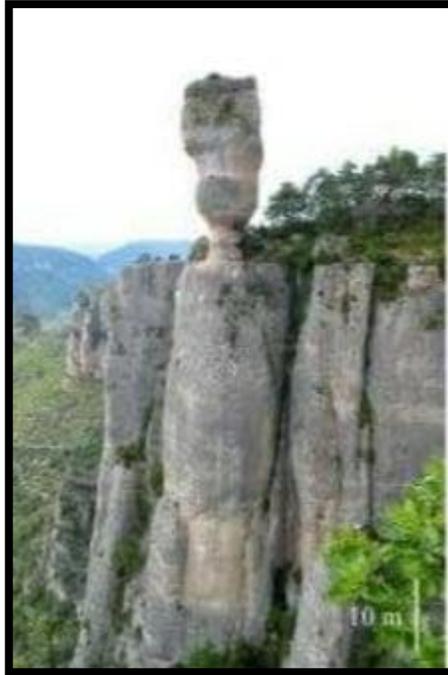


Figure 36 : Basculement par défaut d'assise (Magali Frayssines, 2006)

Décompression du massif : accompagnée de fissures de traction sub-verticales, surtout au niveau de la tête de paroi qui n'est pas confinée (J.L. Nédellec, M. Cruchet, 2003), ce qui favorise un léger déplacement du massif vers le vide. Dans certains cas (parois très raides), cela peut suffire à provoquer le basculement d'écaïlle (Norrish N, Willy W., 1999).

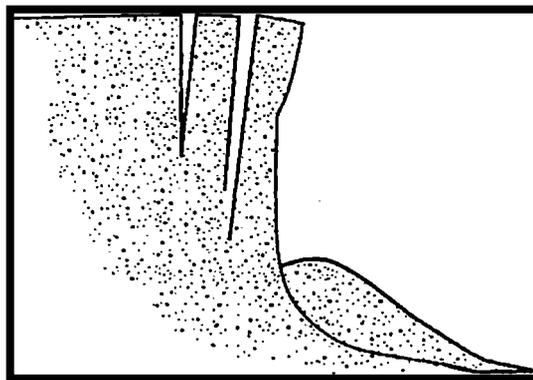


Figure 37 : Fissures de décompression du massif et basculement (Abdelouahed TAHIRI, 2011)

Rupture par flexion d'écaillés : découpées par des discontinuités très redressées entrant dans le massif (très fort pendage vers l'amont) (Norrish N, Willy W., 1999)

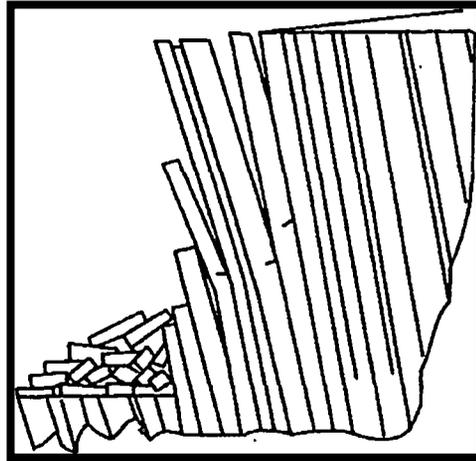


Figure 38 : Basculement par flexion (NGUYEN Anh Tuan, 2015)

Développement de surpressions : due à l'eau, à la glace ou même aux végétaux dans les discontinuités à l'arrière du plan de rocher, (Homand F., 1983) par exemple montre l'effet de la pression de l'eau sur le banc déjà fissuré

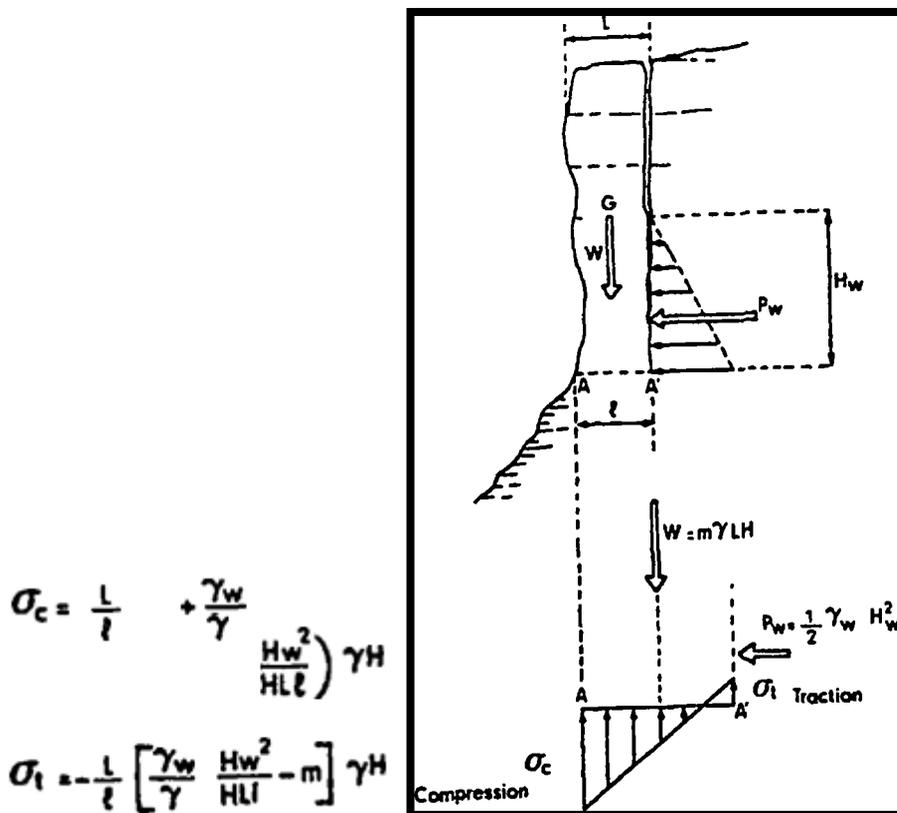


Figure 39 : Basculement par développement de pressions en arrière d'écaillés (Homand F., 1983)

Basculement par développement de dévers lié à l'érosion différentiel (Homand F., 1983).

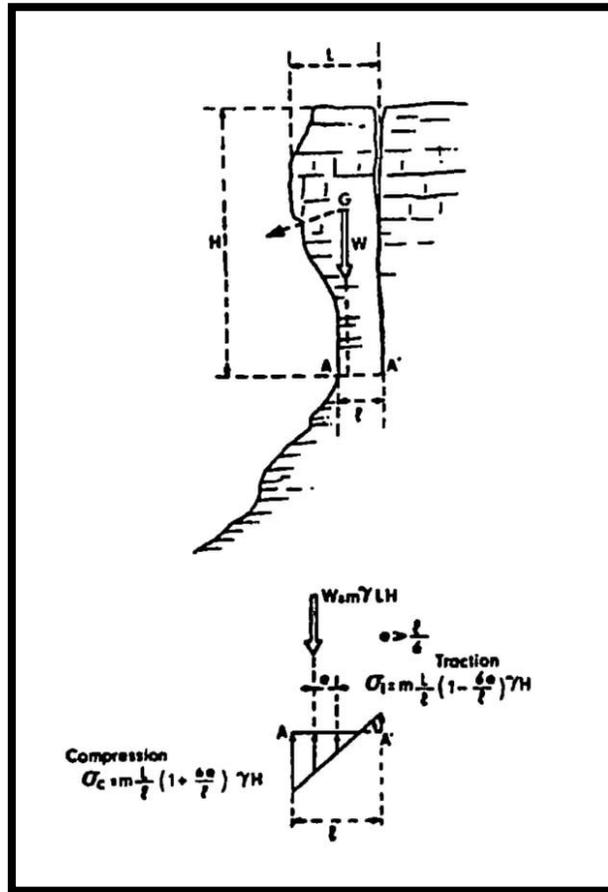


Figure 40 : basculement par développement de dévers (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

Basculements secondaires par le pied de paroi lors que le massif rocheux est chargé latéralement par une instabilité plus en amont. (Norrish N, Willy W., 1999).

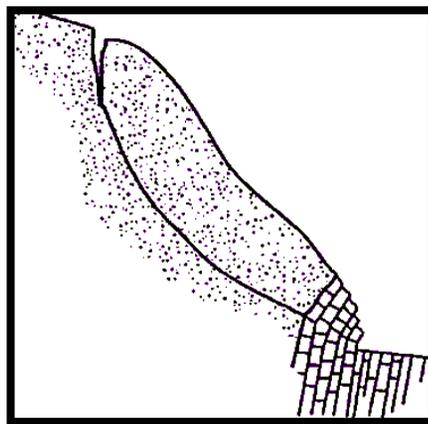


Figure 41 : Basculement secondaire par le pied (Norrish N, Willy W., 1999)

Basculement secondaire par la tête de paroi lorsque des instabilités amont la recourent (Norrish N, Willy W., 1999).

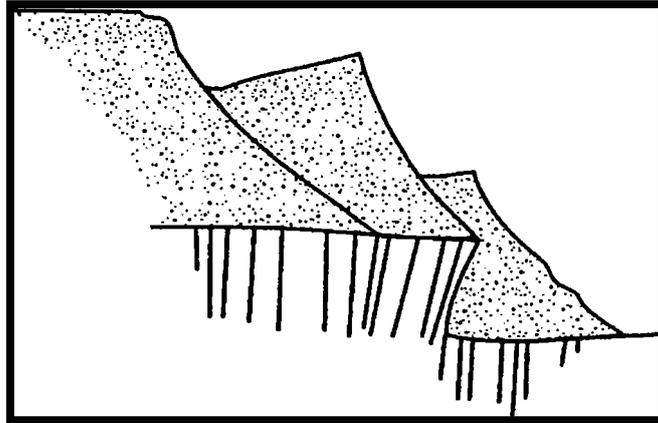


Figure 42 : Basculement secondaire par la tête (Norrish N, Willy W., 1999)

Certains de ces mécanismes peuvent être associés. Des compartiments rocheux moins élancés peuvent également subir un basculement (Figure 43). Dans ce cas, la rupture est souvent initiée par la suppression de buté en aval de ces blocs (Norrish N, Willy W., 1999).

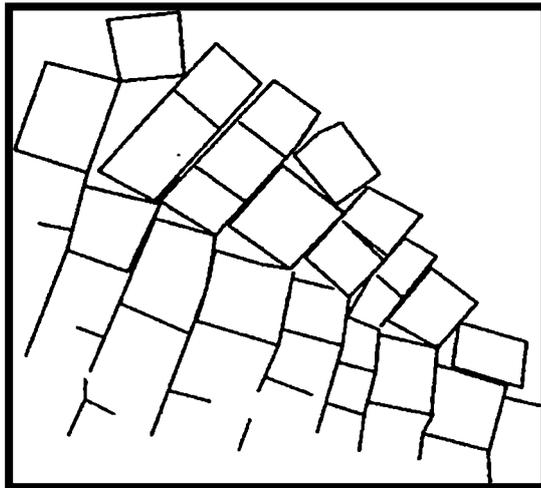


Figure 43 : Basculement de blocs (Norrish N, Willy W., 1999)

Le fauchage : Le mécanisme de fauchage gravitaire est l'un des phénomènes évoqués pour expliquer des glissements dans des roches stratifiées, schistosités ou foliées présentant un pendage opposé à la pente du talus. Ce processus est souvent suggéré comme première étape du développement du glissement de terrain ([www. doi.org/geotech/2001095133](http://www.doi.org/geotech/2001095133) , 2017) (Figure 44).

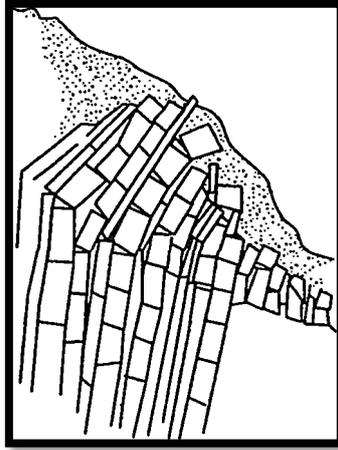


Figure 44 : Figure montrant le phénomène de fauchage (<https://doi.org/10.1051/geotech/2001095133> , 2017)

Le flambement : C'est un phénomène qui est fréquemment confondu avec le basculement. Il est purement gravitaire, la rupture dans ce cas étant provoquée généralement en pied de colonne sous le seul effet du poids de l'écaille rocheuse (Figure 45) (Norrish N, Willy W., 1999).

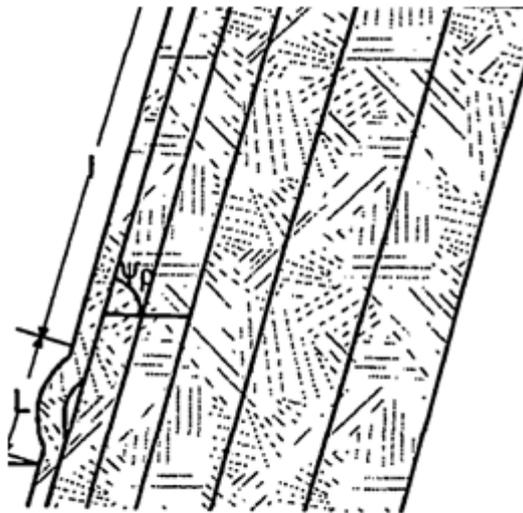


Figure 45 : Figure montrant le phénomène de flambement (Norrish N, Willy W., 1999)

Glissement pseudo-circulaire : La rupture dans ce cas affecte généralement les roches tendres ou très altérées se rapprochant du comportement des terrains meubles (Norrish N, Willy W, 1999). (Figure 46).

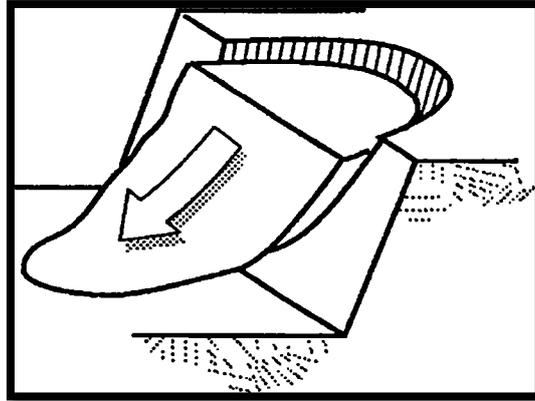


Figure 46 : Glissement pseudo-circulaire (Norrish N, Willy W., 1999)

I.7. Phase d'instabilité :

(Leroueil S.,2001) fait la distinction de 4 phases essentielles à travers lesquelles il explique l'évolution des instabilités, ces états sont définis comme suit :

I.7.1. Prérupture : cette phase inclut tous les processus de déformation menant à la rupture. Elle est essentiellement contrôlée par les déformations liées aux variations de contrainte, au fluage lent et à la fracturation progressive. Lors de cette étape, le matériau peut passer d'un état de déformation élastique à un état plastique, ou directement à la phase de rupture sans étape plastique (comportement « fragile ») (HoupertR.,1991). Ce comportement dépend souvent de la vitesse de déformation du matériau (HoupertR.,1991)(Leroueil S. ,2001). En effet, des déformations très lentes favorisent l'apparition d'une phase plastique et une chute de la résistance intrinsèque du rocher.

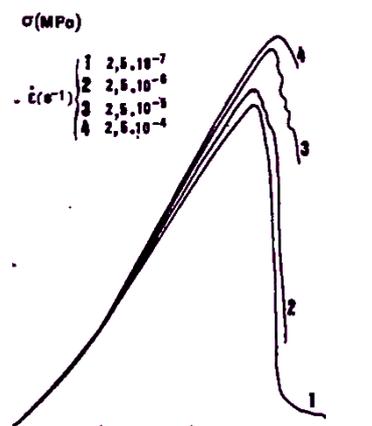


Figure 47 : Relation contrainte-déformation en fonction de la vitesse de déformation : Essai sur de la Laurvikite de Scandinavie (HoupertR.,1991)

I.7.2. L'amorce de la rupture : elles sont caractérisées par le développement des surfaces de cisaillement recoupant la matrice rocheuse. (Leroueil S., 2001)

I.7.3. L'étape post-rupture : elle inclut les mouvements des compartiments de roches englobés dans la masse instable, depuis la rupture jusqu'à l'arrêt des éléments instables. (Leroueil S.,2001)

I.7.4. L'étape de réactivation : lorsqu'une masse instable glisse le long de plans de rupture préexistants. (Leroueil S.,2001)

II. Les paramètres d'instabilité : On général les chercheurs distinguent deux catégories de paramètres ayant un impact sur les instabilités rocheuses (Nédellec JL, Cruchet M.,2003) :

1) Les paramètres de prédisposition : ce sont des facteurs permanents qui peuvent induire la susceptibilité aux phénomènes d'instabilité. Ces paramètres ont plus ou moins de poids vis à vis de la prédisposition du massif à la rupture. Leur coïncidence favorise d'autant plus les contextes instables (Nédellec JL, Cruchet M., 2003).

D'après ((BrunoG., ZezzaF.,1992) (FleurissonJ.A.,2001) (HoekE., BrayJ.W.,1973) (Homand F., 1983) (HoupertR.,1991) (Leroueil S., 2001) (Norrish N, Willy W. ,1999) (PanetM.,1991) (Sharp JC, 1996) es paramètres permanents de prédisposition peuvent être énumérés comme suit :

- L'intensité d'altération des roches altérer les roches perdurent de la résistance ce qui favorise les instabilités en surface et dans la masse essentiellement aux abords des discontinuités (Nédellec JL, Cruchet M.,2003)

- la présence de minéraux particuliers : par exemple les minéraux sériciteux (« satinés », favorisant le glissement), le graphite (provoque le décollement entre feuillets), le gypse est très soluble, etc.... (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

- la séquence stratigraphique : la présence de niveaux plus tendres au sein de la paroi ou au pied favorise les basculements ou les ruptures de pied (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

- la résistance intrinsèque de la matrice de la roche :la résistance à la compression simple (R_c), le module d'Young (E), le module de cisaillement (G), si ces caractéristiques sont faibles ils vont favoriser les instabilités (fracturation par décompression du massif, effondrement des surplombs, ruptures de pied, basculement par flexion, flambement, fauchage, ...etc. (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

- l'orientation des discontinuités, principalement par rapport au versant et entre elles glissements plans, glissements en dièdre, basculement, flambement, fauchage, etc. (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

- la persistance des discontinuités, c'est-à-dire leur étendue dans le massif, et la présence de ponts rocheux volume potentiellement instable, poids propre des compartiments rocheux, présence de ponts rocheux stabilisateurs (Nédellec JL, Cruchet M.,2003)
- l'espacement entre discontinuités dimension et volume des compartiments rocheux, résistance globale du massif (Nédellec JL, Cruchet M. ,2003)
- la résistance au cisaillement des discontinuités (rugosité, irrégularités, nature des épontes et degré d'altération) : module de cisaillement, résistance au pic (T_p), résistance résiduelle (T_r), angle de frottement interne (ϕ), dilatance (ψ) résistance au glissement (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)
- la résistance à la traction des discontinuités : ce paramètre est capital pour les formations schisteuses qui présentent une propension à la « fissilité » plus ou moins importante (très marquée pour les schistes graphiteux (Nédellec JL, Cruchet M. ,2003)
- le remplissage des discontinuités : présence d'argile d'altération pouvant jouer un rôle de « lubrifiant » et diminue la résistance au glissement (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)
- pente du versant W potentiel de décompression du massif, capacité de développement d'écaille sou de colonnes sub verticales, existence de zones en dévers (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)
- Hauteur de la paroi potentiel de décompression du massif, capacité de développement d'écailles ou de colonnes subverticales de grande dimension, déviateur de contraintes très important dans la partie inférieure du massif. Sharp (Sharp JC ,1996) signale que les mécanismes de rupture des parois rocheuses de grande hauteur (> 100 m) sont très probablement étroitement liés au comportement de la partie basse du versant rocheux. En effet, dans la mesure ou pour les grandes hauteurs de paroi, la partie basse est sujette à des états de contrainte très importants provoquant des ruptures ou du fluage localisé, cela peut suffire à initier les premières étapes d'une instabilité remontant dans tout le massif. Cette hypothèse de mouvement essentiel dans la partie inférieure de la paroi semble être confirmée par les travaux de Pothérat (PothératP., AlfonsiP.,2001)
- l'état de contrainte géostatique dans le massif (rapport contrainte horizontale sur contrainte verticale souvent modifié par une tectonique locale ou régionale), ce paramètre est trop souvent sous-estimé alors qu'il peut totalement influencer l'évolution du massif. L'état de contrainte dans la paroi est étroitement lié à la contrainte initiale (Lo K., Lukajic B., Yuen C.M.K. et al. ,1979 ; Sharp J.C.,1996)
- présence d'intrusions modifiant localement les caractéristiques du massif (altération, barrage hydraulique, couche savon, dykes, pipes volcaniques, filons hydrothermaux, fissures hydrothermales) (Kerle N., Van Wyk de Vries B., 2001), tous ces intrusions peuvent être source d'instabilité.
- présence de cavités (karst, tunnels de lave, tunnels et galeries anthropiques) fragilisant le rocher et provoquant une modification de l'état de contrainte dans le massif (Adashi T ,Ohnishi Y,Arai K.,1991)

- perméabilité du massif : une perméabilité forte favorise l'infiltration et la circulation d'eau dans les fissures, mais elle assure également une bonne décharge des discontinuités proches de la paroi. A l'opposé, une faible perméabilité limite les venues d'eau mais favorise les mises en pression dans le massif. Le cas le plus critique est celui du massif perméable qui présente un colmatage des événements naturels (fractures, karsts) en paroi (Nédellec JL, Cruchet M.,2003)

- aussi la présence de végétaux dans la paroi favorise l'ouverture des discontinuités par les racines

- la présence permanente d'eau au sein du massif favorise des mises en charge rapides et élevées, et une forte teneur en eau peut dans certaines roches provoquer une baisse de leur résistance (Nédellec JL, Cruchet M.,2003)

- la présence d'anciennes instabilités (glissements fossiles) rend le massif plus fragile, également des sollicitations cycliques (vent, eau dans les fissures, houle, sismicité, chocs thermiques) sur une très longue durée générant une fatigue du matériau et favorisant une baisse de sa résistance (Leroueil S.,2001).

2) Les paramètres déclenchant : Contrairement aux paramètres de prédisposition, les paramètres déclenchants sont temporaires (Nédellec JL, Cruchet M.,2003). Ces derniers ont également plus ou moins d'influence sur la rupture et ils peuvent se réunir pour provoquer l'éboulement rocheux (Nédellec JL, Cruchet M. ,2003). Les paramètres essentiels de déclenchement peuvent être les suivants :

- l'infiltration ou les résurgences d'eau mise en pression d'eau dans les discontinuités en arrière des compartiments potentiellement instables. Pour Sharp (Sharp JC ,1996) et Pan et (PanetM.,1991), ce facteur est essentiel dans l'apparition de grandes instabilités dans les versants rocheux de grande hauteur (Nédellec JL, Cruchet M. ,2003)

- les mouvements dans les terrains meubles sous la paroi rocheuse (fluage, glissement) basculement par défaut d'assise

- les glissements dans des terrains meubles au-dessus ou en arrière de la paroi pouvant déstabiliser le massif rocheux (basculement en tête ou en pied) (Nédellec JL, Cruchet M. ,2003)

- la purge naturelle ou artificielle de blocs assurant initialement la stabilité de compartiments rocheux plus en amont. On notera que (PanetM.,1991) et Sharp (Sharp JC,1996) ont souligné ce phénomène qui est trop largement sous-estimé, à savoir la déstabilisation de « petits » blocs pouvant provoquer l'effondrement de grands compartiments rocheux

- le vent : lorsque des arbres sont enracinés en paroi, des vents violents peuvent provoquer des chutes de blocs, les racines écartant les compartiments de roches (Nédellec JL, Cruchet M., 2003)

- ravinement par ruissellement lorsque des passées meubles sont présentes, le ruissellement en paroi peut rapidement éroder la matrice fine et provoquer un déchaussement de blocs. Par ailleurs, le pied de la paroi rocheuse, parfois épaulée par des formations meubles (par exemples éboulis, ou brèches) peut être dégagé par le ravinement naturel lié au climat

- suffusion par venue d'eau dans le massif : les fractions fines des remplissages de fissures ou les remplissages karstiques peuvent être entraînés par des venues d'eau dans le massif. Dans ce cas, des vides plus ou moins importants, peuvent se développer dans le rocher provoquant une déstabilisation de la paroi
- vibrations : des séismes ou des vibrations liées à des travaux peuvent parfois suffire à provoquer des instabilités dans le massif
- le gel-dégel (dans les zones de haute altitude ou en climat froid) les coins de glace peuvent repousser les compartiments rocheux (toutefois, la glace assure généralement un certain liant entre les épontes), et lors du dégel les vides laissés après la fonte des coins de glace provoquent une déstructuration du massif diminuant la résistance au cisaillement des discontinuités. Par ailleurs, les remplissages argileux dans les fissures perdent toute cohésion lors du dégel de l'eau interstitielle. Enfin, un gel superficiel en paroi (par le vent) peut naturellement colmater les événements de la roche et provoquer une mise en pression de l'eau liquide dans les fractures (Barnes P., Lewiw B., 1991).

Conclusion :

La qualité d'un massif rocheux peut être influencée par différents types de rupture allant de l'échelle de particule en cas de l'érosion jusqu'au déplacement de grandes masses rocheuses en cas de failles, en parcourant cet intervalle, plusieurs types de rupture peuvent affecter les massifs rocheux, ces ruptures se différencient entre elles par les types et les propriétés de discontinuités déjà évoqués aux chapitres précédents. Le mécanisme de rupture est donc fonction du développement de discontinuité au sein du massif, de la relation entre pente de discontinuité et pente topographique, du remplissage des plans de fracturation, de stratification de faille ...etc., des eaux d'infiltration ou souterraines, ...etc.

Dans ce chapitre nous avons énumérés tous types de rupture pouvant affecter les massifs rocheux en résumant brièvement les mécanismes selon lesquels une masse peut être déplacé. Peu importe le type et ses mécanismes, il menace les sites et les ouvrages implantés dessus. Pour ce fait, le choix des méthodes de confortation est indispensable, ce qui va être abordé au chapitre suivant.



Chapitre 04 :
**Méthodes de surveillance et de
confortation des massifs rocheux**

Introduction :

D'habitude, une étude de stabilité de talus fera référence à différentes méthodes de confortement et de surveillance permettant de mieux suivre l'évolution du mouvement et de choisir le mode de stabilisation adéquat pour le talus en question.

Plusieurs méthodes et procédés peuvent réduire les risques si l'instabilité des pentes est certaine. Ces techniques comprennent l'amélioration du drainage, l'adoucissement de la pente du talus, la réduction de la charge au sommet de la pente, la pose de filets ou grillages actifs, le béton projeté, le boulonnage et les ancrages.

Lorsque les glissements de terrain ne peuvent être ni empêchés ni évités, un certain nombre d'ouvrages de confinement ont été conçus pour protéger les communautés et les infrastructures essentielles. Des merlons, des murs de gabion et des fosses permettant de faire dévier le glissement de débris à l'écart des sites menacés, ainsi que des filets, des barrières, des grillages empêchant les pierres de tomber ou de rebondir sur les routes. Il est important aussi d'installer des moyens de surveillance sur le site jugé instable. La mécanique des solides est le milieu idéal continu et homogène. (Ahmari Ahmed 2021)

L'observation montre que tous les matériaux rocheux sont déviés d'une manière ou d'une autre. Ce qui montre clairement la présence de discontinuités. Les propriétés mécaniques et hydrologiques des masses rocheuses sont fortement influencées par la présence de ces discontinuités (Barrages, failles et zones de cisaillement). D'autres discontinuités telles que les joints, les petites crevasses, les fissures et les surfaces de stratification, se produisent en grand nombre à n'importe quelle taille de roche. Souvent, ces multiples dispositifs discontinus (appelés ici fractures) sont connectés et forment des réseaux tridimensionnels (appelés ici systèmes fractals). (www.ifsttar.fr/PDF)

L'emplacement spatial, la taille, l'orientation et d'autres caractéristiques des grandes discontinuités mineures peuvent être mesurés individuellement et décrits impérativement ; Il est impossible de mesurer la taille exacte, la forme, l'emplacement et la direction de chaque fracture dans le système rocheux. Chaque fracture est une extension limitée et est généralement de petite taille par rapport à la masse rocheuse. L'interconnexion des fractures conduit à des phénomènes indésirables tels que la formation de régions instables sur les pentes rocheuses. Par conséquent, une représentation appropriée des caractéristiques et du comportement des systèmes de fractures dans des environnements rocheux est très importante. Les approches statistiques ont été identifiées comme les plus appropriées pour décrire les systèmes de failles

dans les environnements rocheux. Leur représentation statistique comprend le développement d'un modèle stochastique capable de représenter la grande variation de taille, de forme, d'emplacement et de direction et d'ouvrir les fractions discrètes qui composent ces systèmes de fractions. (Ali Rafiee 2008).

Cette modélisation nécessite l'utilisation de fonctions de distribution de probabilité appropriées qui décrivent la variance des propriétés de fracture dans ces systèmes.

La configuration spatiale du problème doit être déterminée, souvent à partir des graphiques 2D des effets des discontinuités qui forment les réseaux tridimensionnels dans les masses rocheuses. De plus, la représentation statistique doit prendre en compte des phénomènes géologiques tels que l'agrégation de fractions, c'est-à-dire la tendance à former de nouvelles fractions autour de fractions préexistantes mais la fracturation virginale, c'est l'absence de fractures dans certaines zones de la masse rocheuse.

I-La surveillance :

Proprement dite, se distingue de l'auscultation par son objectif de gestion de la sécurité. L'objectif de la surveillance est d'assurer un contrôle total ou partiel de l'instabilité. Elle doit fournir des informations précises sur l'évolution de l'état de stabilité d'un massif rocheux. Le recueil régulier et périodique des données, permet une exploitation des corrélations ainsi que l'interprétation des informations liées à la stabilité du massif selon une échelle de temps adaptée à la nature du phénomène. (LCPC, 1994).

Dans ce cadre, le contrôle est effectué uniquement à l'aide de capteurs et appareillage à enregistrement automatique, intégrant une unité de gestion des alertes. L'évaluation de la stabilité du massif est effectuée à chaque mesure afin qu'une procédure d'alerte adaptée au contexte du site puisse être déclenchée instantanément.

Le système de surveillance se différencie donc du système d'auscultation par :

1 – l'analyse des données en temps réel (selon une échelle de temps adaptée à l'évolution du phénomène)

2– la prise en compte de contraintes temporelles. Autrement dit, le système de surveillance ne doit pas simplement délivrer des résultats concernant la stabilité du massif rocheux, il doit les délivrer dans des délais imposés. (Phillips Mourot, 2013)

Un des principaux avantages de la mise sous surveillance d'un site réside dans sa rapidité de mise en œuvre, permettant ainsi de faire face à des problématiques urgentes. Il peut par exemple s'agir de rétablir la circulation routière sur un axe stratégique menacé par un aléa d'éboulement rocheux. Le système de surveillance peut être mis en place et fonctionnel dans un délai de 48 heures alors que les moindres travaux de confortement demandent au minimum plusieurs semaines de réalisation. Hormis l'urgence, la mise sous surveillance est envisagée de manière temporaire, dans l'attente d'une décision politique ou de travaux de confortement ou de protection, mais aussi dans le cas où aucun ouvrage de protection n'est en mesure de réduire significativement le risque. (Phillips Mourot, 2013)

I.1. Techniques instrumentales utilisées en surveillance : Différentes techniques instrumentales peuvent être utilisées dans le cadre de la surveillance des instabilités gravitaires. Ces techniques peuvent être regroupées en 5 principales méthodes instrumentales

- 1– la mesure des déformations structurelles (en surface et en profondeur).
- 2– la mesure des vibrations.
- 3– la détection d'objets en mouvement.
- 4 – la mesure de niveau et de pression.
- 5 – la mesure météorologique. (Site web :00771338 : archive ouvert).

I.2. Définition d'un système de surveillance : Un système de surveillance est un système de mesure qui intègre des outils de traitement de l'information permettant d'analyser en temps réel l'évolution d'un phénomène. Le dispositif de mesure et d'analyse est relié et synchronisé à un dispositif de gestion d'alerte ayant pour but de sécuriser la zone menacée en cas de crise.

On distingue trois grands types de systèmes de surveillance :

- A. Le premier type, dit « tout ou rien », est le plus simple
- B. Le deuxième type regroupe toutes les stations de mesure télémétrées
- C. Le système de télésurveillance le plus élaboré et le plus complet est un système qui permet de centraliser l'information de plusieurs sites sous surveillance par une gestion automatisée. (Site web :00771338 : archive ouvert).

I.3.Méthodes de surveillance : seuils et critères d'alerte : Les méthodes de surveillance vont permettre de déclencher des procédures d'alerte à partir de l'analyse des données reçues du dispositif de mesure. Pour cela des seuils doivent être définis préalablement afin que le système informatisé automatique soit en mesure d'évaluer les données.

a. La définition des seuils est une problématique extrêmement complexe à laquelle on ne peut répondre de façon exhaustive. Elle nécessite d'abord la définition des paramètres pertinents à suivre, sachant que ces paramètres varient suivant le type d'aléa surveillé.

b. Un critère d'alerte peut être défini de différentes manières et dépend essentiellement de la bonne connaissance du site et de l'aléa. (Interreg IIIA).

La définition des seuils et critères d'alerte s'effectue souvent au cas par cas et est affinée à partir d'une auscultation préalable de l'instabilité. Il faut ainsi rester prudent sur l'utilisation de modèles déterministes, qui s'attachent le plus souvent à l'extrapolation d'une seule variable. Or les fluctuations sur les déplacements (ouverture de fracture) ne sont pas nécessairement représentatives, de manière exhaustive, de la stabilité du massif rocheux. Par exemple, un bloc associé à un massif par quelques ponts rocheux répartis à la surface d'une fracture arrière verticale peut rester immobile ou se déplacer de façon infime et éventuellement non mesurable, alors que l'état des ponts rocheux évolue sous l'effet de transformations physico-chimiques (transfert de matière, par exemple) lentes mais continues. (Rochet, 1992 ; Effendiantz et Rochet, 2000).

II. le confortement : Les confortements des talus au glissement sont l'ensemble des méthodes qui servent à stabiliser la masse de terrain instable. Le choix de la méthode de confortement varie d'une part avec les caractéristiques et l'état de chaque site comme le type des sols, les conditions de drainage et les surcharges, et d'autre part avec le coût économique (quand il existe plusieurs solutions de confortement), l'accessibilité du site, La période de l'année choisie pour l'exécution des travaux, la cinématique du glissement, Les conditions de sécurité vis-à-vis de l'environnement et notamment les risques de désordre en phase de travaux, les délais impartis à la réalisation du confortement, qui dépendent de la gravité du phénomène et de l'urgence des travaux, La pérennité du système retenu et les possibilités d'entretien et de réparation et les moyens en matériel et la technicité des entreprises locales. (www.cloudfront.net/pdf).

II.1. Méthodes de confortement des talus : D'une manière générale, les méthodes de confortement peuvent être groupées comme suit :

II.1.1 -Drainage : L'eau joue un rôle aggravant la stabilité du talus, mais il existe un grand nombre de situations dans le massif rocheux où il est difficile de caractériser des nappes phréatiques clairement identifiées, et donc il est difficile de les rabattre. (Ahmari Hakim,2021) Donc comme on le sait tous, l'eau est à l'origine de la majorité des glissements de terrain. Par conséquent, l'abaissement du niveau des eaux souterraines et la réduction de la pression des pores sont des moyens logiques d'améliorer la stabilité. Les types de drainages les plus couramment utilisés sont :

II.1.1.1. Collecte et canalisation des eaux de surface : L'objectif est de limiter les infiltrations dans le massif en mouvement. Les eaux peuvent provenir de zones de sources, d'un défaut d'étanchéité sur un réseau ou un bassin de stockage à l'amont ou plus simplement des précipitations et des eaux de ruissellement. En effet, les eaux de surface ont tendance à s'infiltrer dans les fissures, à stagner dans les zones de faible pente et aggravent ainsi une instabilité amorcée. Les dispositifs de Collecte et canalisation des eaux de surface sont d'usage courant en génie civil, comme les fossés et caniveaux. (ww.cloudfront.net/pdf).



Figure 48 : Évacuations des eaux superficielles dans le déblai
(Ahmari Ahmed 2021)

II.1.1.2. Massifs drainants : Les masques drainants sont des ouvrages en matériaux granulaires grossiers mis en place en parement de talus ; leur rôle est d'annuler la pression interstitielle dans la portion correspondante de terrain, mais leurs caractéristiques très frottantes apportent également un gain de stabilité. Les éperons drainants sont des sortes de masques discontinus ; s'il est inutile ou difficile de réaliser un masque, on se contente de faire des saignées remplies de matériau drainant régulièrement espacées. (www.cloudfront.net/pdf).

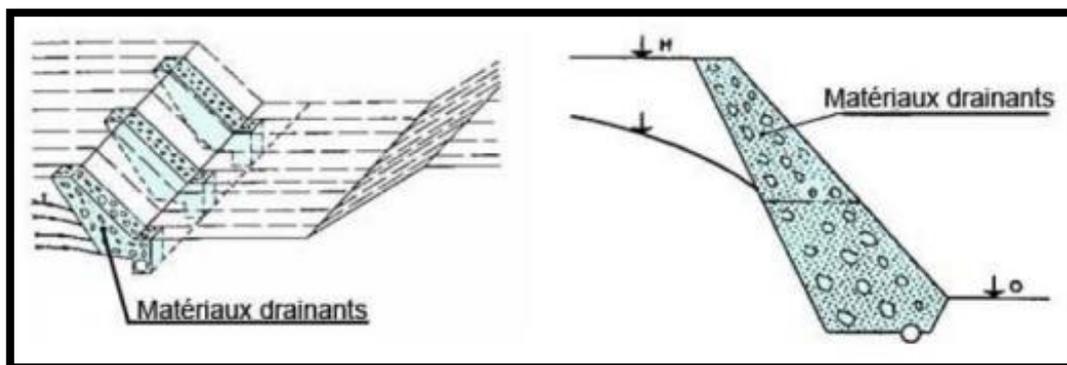


Figure 49 : a : éperon drainant b : masque drainant
(www.cloudfront.net/pdf)

II.1.1.3. Tranchées drainantes : Les tranchées drainantes, dont une coupe type est présentée sur la figure ci-dessus sont des ouvrages couramment utilisés pour rabattre le niveau de la nappe. Elles sont implantées sur le site de façon à venir recouper les filets d'eau (lignes de courant dans un horizon homogène, couche aquifère, venues d'eau ponctuelles, etc.). Le choix de l'implantation (dans le sens de la plus grande pente ou dans un sens parallèle aux lignes de niveau), de la profondeur et de l'espacement des tranchées dépend des résultats de l'étude hydrogéologique et conditionne l'efficacité du drainage. Elles peuvent être réalisées de plusieurs façons, soit à la pelle mécanique, à la trancheuse ou à la haveuse de paroi, qui donnent des dimensions de la paroi propre à chaque méthode. (www.cloudfront.net/pdf)

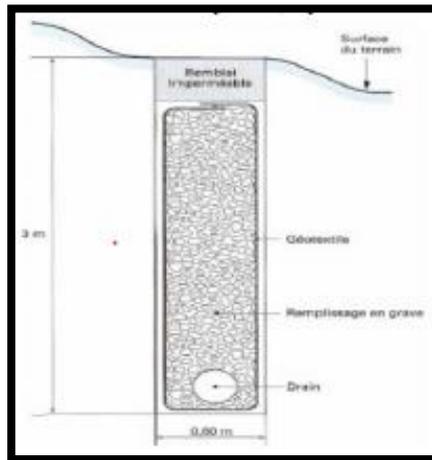


Figure 50 : coupe type d'une tranchée Drainante

II.1.1.4. Drains subhorizontaux : Lorsque les contraintes d'accessibilité du site ou les conditions de circulation interdisent la réalisation de tranchées, la réalisation de drains subhorizontaux peut permettre de diminuer les pressions interstitielles et de décharger des aquifères localisés. La technique consiste à réaliser de nombreux forages avec une faible pente sur l'horizontale (2 à 5°) et à y placer des tubes crépinés ; Le bon fonctionnement des drains nécessite :

1/ une protection contre le gel à la sortie des drains.

2/une lutte contre le colmatage (utilisation de jets d'eau sous pression, d'acide oxalique pour dissoudre des dépôts calcaires, etc.).

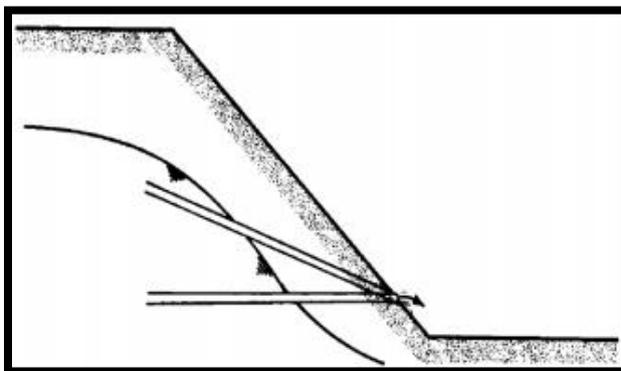


Figure 51 : a : Drains subhorizontaux. b : Colmatage d'un drain

II.1.1.5. Drains verticaux, puits et galeries drainantes : Les techniques de drains et puits verticaux sont peu fréquemment utilisées pour la stabilisation des glissements de terrain, sans doute en raison des difficultés d'évacuation des eaux drainées : gravitairement en profondeur vers des couches plus perméables ou vers le haut par pompage ou siphonage. Les puits et drains verticaux permettent de couper un aquifère comme le ferait une tranchée drainante sans être limité en profondeur. Les galeries drainantes ont en général des sections modestes (hauteur 1.80 à 2.00 m, largeur 1 à 2 m) afin de permettre le contrôle et la maintenance des ouvrages. La base de la galerie est positionnée à une profondeur légèrement inférieure à celle du niveau moyen des eaux souterraines.

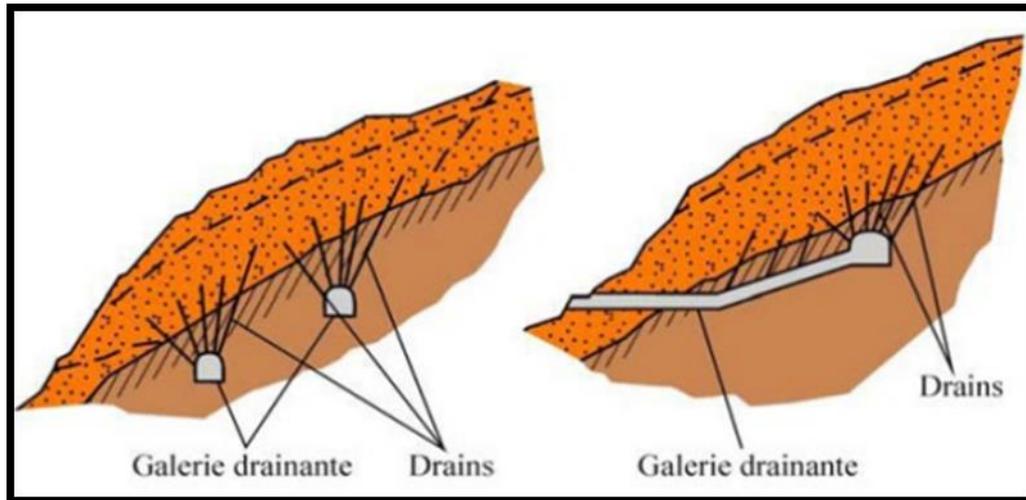


Figure 52 : Galerie drainante

II.1.2. Modifications géométriques : C'est le moyen d'action le plus naturel pour stabiliser un talus. On distingue trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement :

- Les actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, remblai en pied.
- Les actions sur la géométrie de la pente : purge et reprofilage.
- Les substitutions partielles ou totales de la masse instable.

II.1.2.1. Butée de pied : Le chargement en pied (ouvrage de butée, également appelé banquette dans certaines configurations) agit de deux manières : d'une part, il équilibre les forces motrices et, d'autre part, il permet de contenir les déplacements de la masse instable. Il est nécessaire de réaliser un ancrage dans les formations sous-jacentes en place. La stabilité au grand glissement suppose deux vérifications :

1-L'ouvrage de butée doit limiter les risques de reprise du glissement en amont.

2-L'ouvrage de butée ne doit pas déclencher d'autres glissements, par exemple à l'aval.

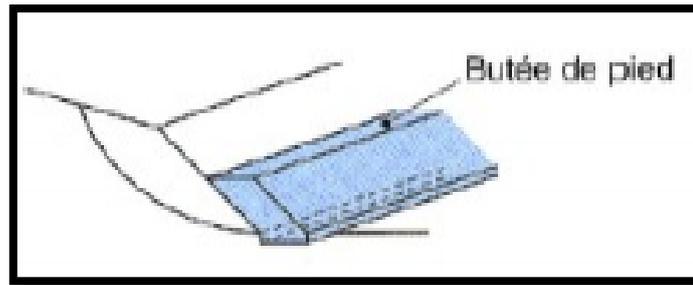


Figure 53 : Réalisation d'une butée de pied (par plots)

II.1.2.2. Allègement en tête : L'allègement en tête du glissement consiste à venir terrasser le matériau dans la partie supérieure. Il en résulte une diminution du poids moteur et par conséquent une augmentation du coefficient de sécurité. Comme dans le cas des butées de pied, l'amélioration de la sécurité recherchée $\Delta F/F_0$ sera de 20%. En général, cet objectif n'est obtenu qu'avec des volumes de terrassement importants.

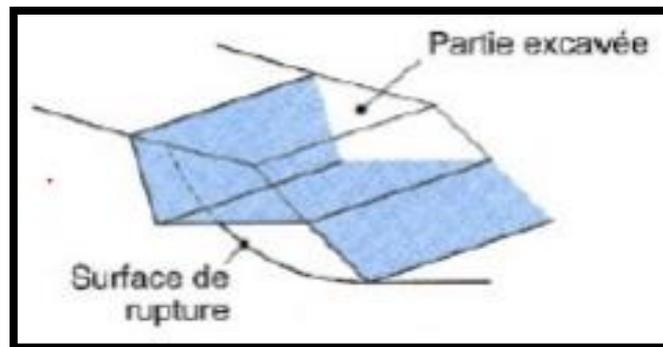


Figure 54 : Allègement en tête

II.1.2.3. Purge : Les techniques de terrassement s'accompagnent fréquemment de purges du matériau déplacé par le glissement. Cette solution est généralement limitée aux glissements de taille modeste. On peut, dans certains cas, purger l'ensemble du matériau glissé, à condition que la surface mise à nu soit stable.

Figure 55 : Photo montrant le cas où le purge peut être réalisé

(www.Acrobat.fr)



II.1.2.4. Reprofilage : Il consiste en un adoucissement de la pente moyenne. Ce type de traitement est particulièrement bien adapté aux talus de déblais, et il est de pratique courante. Notons que l'exécution de risbermes à l'avantage d'améliorer la stabilité par rapport à une pente unique et de créer des voies d'accès pour l'entretien ou des travaux complémentaires. L'adoucissement de la pente est généralement mal adapté aux versants naturels instables car il met en jeu des volumes de sol très importants.

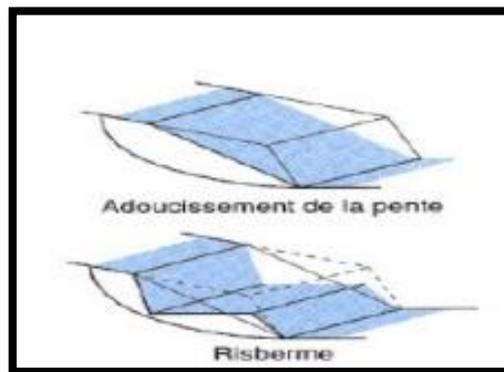


Figure 56 : Reprofilage

II.1.2.5. Substitution totale ou partielle : La substitution totale consiste à venir purger l'ensemble des matériaux glissés ou susceptibles de glisser, et à les remplacer par un matériau de meilleure qualité. Cela permet de reconstituer le profil du talus initial. Des substitutions partielles sont souvent employées, sous forme de bûches ou de contreforts discontinus. Le coefficient de sécurité de la pente ainsi traitée peut être estimé en prenant la moyenne pondérée des coefficients de sécurité de la pente avec et sans substitution.

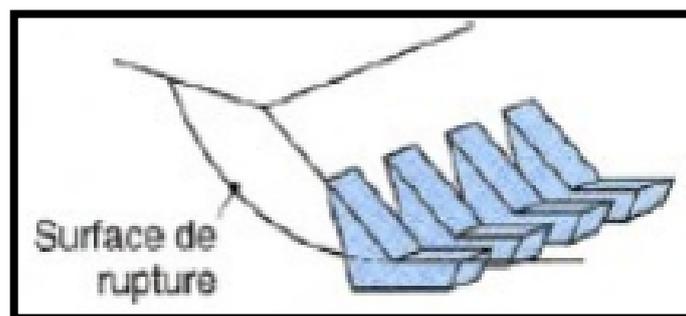


Figure 57 : Substitution partielle

II.1.3 : Renforcement :

II.1.3.1. Organes résistants en pied : Cette méthode consiste à stabiliser la masse du sol par l'installation d'un organe résistant dans la partie avale du talus, prenant en compte le contour du cercle de glissement pour assurer que cet organe ne soit pas emporté par le glissement. On trouve dans cette catégorie deux types d'ouvrages, les ouvrages de soutènement rigides et les ouvrages de soutènement souples.

a. Les ouvrages de soutènement rigides :

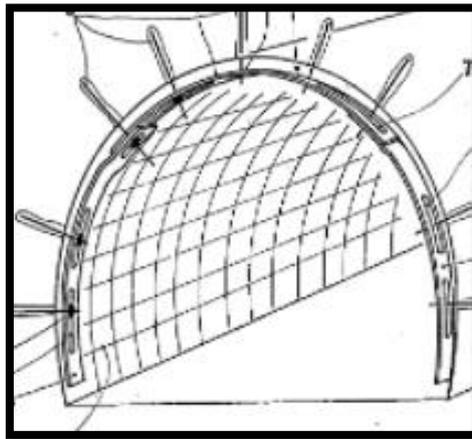


Figure 58 : Les ouvrages de soutènement rigides

www.data.epo.org

b. Ouvrages de soutènements souples :

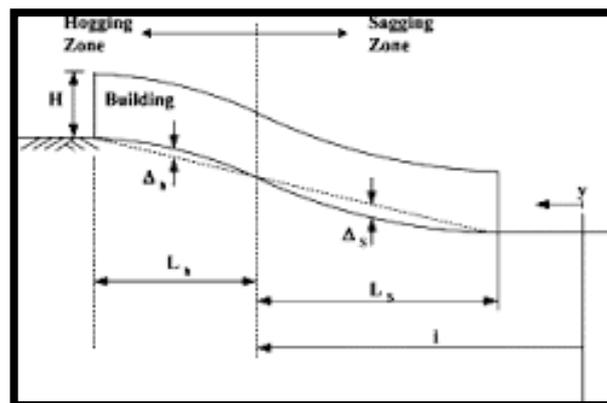


Figure 59 : Ouvrages de soutènements souples

(Univ-lorraine.fr)

II.1.3.2. Techniques de renforcement par inclusions :

a. Clous et micropieux :

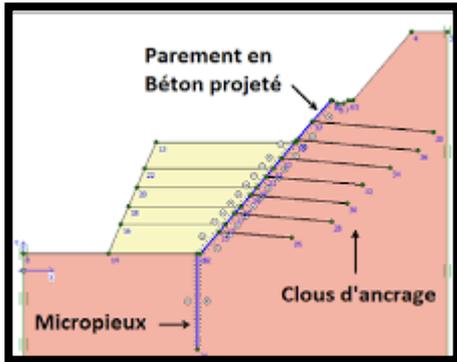


Figure 61 : Clous et micropieux

b. Pieux et barrettes :

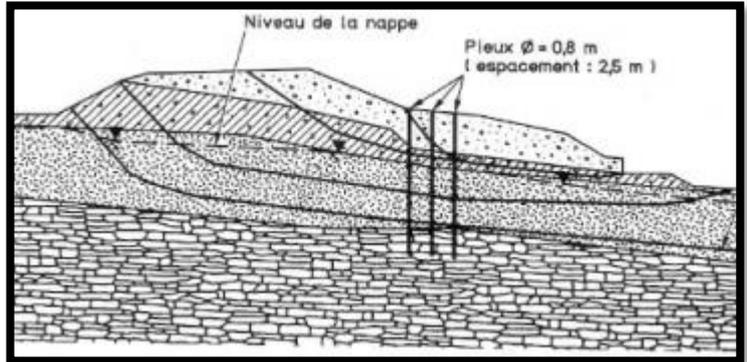


Figure 60 : Pieux et barrettes

(www.academia.edu)

II.1.3.3. Tirants d'ancrages : l'application de cette technique à la stabilisation de glissements est beaucoup moins fréquente car, comme pour les murs de soutènement, les efforts engendrés par les mouvements sont très importants et difficiles à évaluer. En pratique cette technique sera donc limitée aux glissements de faible extension.

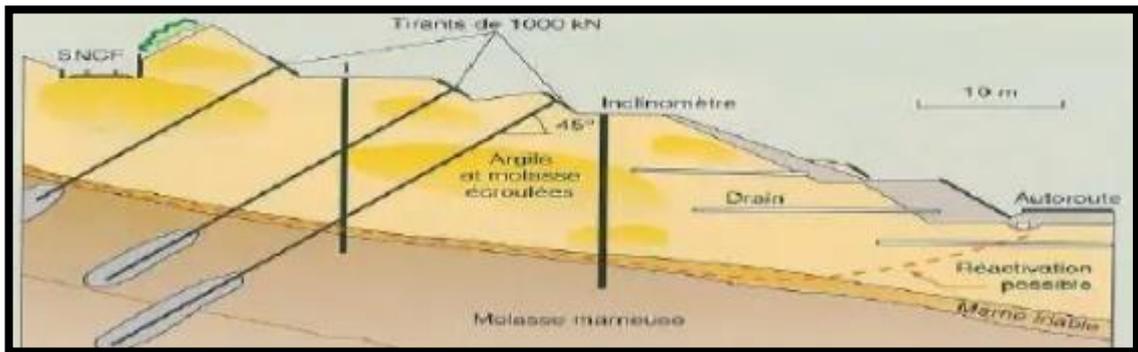


Figure 62 : Tirants d'ancrages

(www.cloudfront.net/pdf)

II.1.3.4. Techniques de remblai renforcé :

a) Renforcement par géo synthétiques

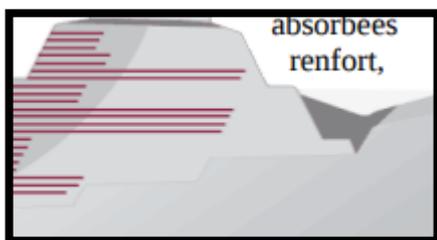


Figure 63 : a : Renforcement par geosynthétique

b) Le Pneusol



b : le pneusol

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de surveillance et de confortement pour un talus instable, et l'efficacité de chaque méthode. Malgré toutes les précautions que l'on peut avoir prises, on n'est jamais certain qu'il n'y aura pas de désordres sur un talus. S'il constitue un risque important, il faut alors envisager la mise en place de systèmes de surveillance et d'alerte. La reconnaissance et la caractérisation du massif rocheux, dans lequel est excavé le talus, sont des étapes nécessaires pour avoir une connaissance approfondie de ce massif. L'objectif est de quantifier les différentes propriétés et caractéristiques du massif qui seront utilisées pour modéliser le talus rocheux et pour faire des simulations numériques. Finalement les différents types de confortement et de surveillance pour un talus instable, et l'efficacité de chaque méthode, ont été présentés.



Chapitre 05 :
Présentation de certains cas d'étude
de stabilité des massifs rocheux

I. Les sites miniers :

I.1. Cas de mine Troilus, Chibougamau :

Julie Bélanger, 2005 : Analyse de stabilité des pentes rocheuses de la mine Troilus, Chibougamau, Qc, mémoire présenté à l'université du Québec à Chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en sciences appliquées, 398p.

Ce premier cas est consacré au résumé du travail réalisé par Julie Bélanger en 2005, ce travail a mis au point la stabilité des bords rocheux de la mine de Troilus qui exploite un gisement d'or à basse teneur. Le résumé est présenté tel qu'il a été élaboré par le rédacteur du travail : Julie Bélanger en 2005, nous avons enrichi dans certains endroits par quelques illustrations exprimant des résultats que nous jugeons importants.

La mine Troilus est une mine à ciel ouvert qui est la propriété de la corporation minière Inmet. Elle se situe à 175 km au nord de Chibougamau (Québec, Canada) dans la portion orientale de la ceinture volcano-sédimentaire archéenne de Frotet-Evans. Cette mine se situe dans un massif rocheux folié, fracturé et recoupé par des failles et de réseaux de joints systématiques, ce qui représente un contexte favorable à différents modes d'instabilité. Pour cette raison la stabilité de ces pentes rocheuses est importante. Il y a différents modes de rupture possible, soit (Julie Bélanger, 2005) : la rupture progressive par zones de fracturation, la rupture circulaire, le glissement sur un plan ou d'un dièdre et le développement de zone d'instabilité en *kink* pour former des zones de rupture en flambage ou à la limite une rupture par fauchage (*toppling*) (Julie Bélanger, 2005). Tous ces types d'instabilité peuvent se produire concurremment dans le cadre de la même fosse à ciel ouvert dépendamment de l'attitude spatiale des différentes structures géologiques (Julie Bélanger, 2005), de la nature de la roche et de la compétence de la roche. La conception géomécanique de la fosse, dans ces milieux rocheux, doit donc tenir compte de ces divers modes de rupture et d'instabilité des pentes rocheuses jointées et foliées (Julie Bélanger, 2005).

Ce projet a comme objectif d'analyser les conditions susceptibles de provoquer le développement des divers modes de rupture dans un massif rocheux fracturé dans le but de développer des critères de conception (*design*) et des modes de soutènement plus adéquats pour assurer la stabilité des pentes de la fosse. La démarche du projet comporte les étapes suivantes: premièrement, réaliser une compilation et une analyse structurale du gisement; deuxièmement, caractériser les propriétés mécaniques des roches et des discontinuités des murs de la fosse à l'aide des travaux antérieurs; et finalement, simuler par ordinateur les divers modes de rupture susceptibles de se développer. Ces travaux permettront de procéder à un zonage structural de la fosse, c'est-à-dire identifier les zones structurales qui contrôlent la stabilité des gradins et des murs finaux de la fosse (Figure 64). Chaque secteur présente une homogénéité dans l'angle du mur. La figure 64 présente ces différents secteurs ainsi que la localisation des quatre domaines structuraux. « Dans le cadre de ce zonage, les propriétés mécaniques seront établies pour les zones homogènes. Par la suite, l'analyse de la stabilité des murs principaux de la fosse sera évaluée en fonction des modes de rupture mentionnés plus haut à l'aide de méthodes de simulation analytique adaptée aux divers modes de rupture susceptibles de se développer ». (Julie Bélanger, 2005).

Dans cette étude Julie Bélanger en 2005 a pu cerner quatre domaines structuraux distincts, soit : A(2A), A(2B), A(2B,2C) et B (Figure 65). « À l'intérieur de chacun de ces domaines trois familles de discontinuités ont été identifiées » (Julie Bélanger, 2005). « La famille verticale, la famille horizontale et la foliation se retrouvent dans chacun de ces domaines. La différence entre les domaines A(2A), A(2B,2C) et A(2B) est le pendage de la famille horizontale. Les qualificatifs entre parenthèses représentent le pendage de la fracture horizontale. Le qualificatif 2A indique un pendage entre 0 et 15°, tandis que 2B indique un pendage de 16 à 25°. Finalement, le terme 2C indique un pendage de 26 à 40°. Pour ce qui est du domaine structural B, il est caractérisé par une fracture ayant une patine d'altération verdâtre et un pendage vers la fosse. Cette famille de discontinuité a été appelée zone problématique. C'est le domaine responsable d'un nouveau design au mur ouest » (Julie Bélanger, 2005).

A l'intérieur de chaque domaine structural les possibilités de rupture ont été identifiées à l'aide d'une étude de stéréogrammes et d'équilibre limite, la figure 66 donne un exemple pour cette identification. Ceci a permis de cerner les différentes possibilités de rupture planaire, en coin et fauchage (Julie Bélanger, 2005). Dans le cadre de cette analyse de stabilité, un facteur de sécurité de 1,3 a été utilisé comme limite entre la stabilité et l'instabilité (exemple des figures 67 et 68). Cette analyse a permis de faire ressortir neuf cas de rupture en coin pour les murs secs et à l'échelle du banc individuel (tableau 07). « Six de ces neuf cas correspondent à la zone problématique combinée à un joint vertical. Pour ce qui est de l'échelle inter-rampe, c'est le passage de la zone problématique à l'intérieur du domaine B qui crée les sept cas ». (Julie Bélanger, 2005).

« La présence d'eau a un effet très important sur la stabilité des pentes. En effet, le nombre de cas de rupture en coin passe de neuf à seize avec l'application d'une pression interstitielle dans les logiciels de modélisation » (Julie Bélanger, 2005).

« Des cas de rupture planaire ont aussi été identifiés. À l'échelle du banc individuel et avec des murs secs, il est possible de retrouver onze cas de rupture planaire. Les deux familles de discontinuités les plus importantes qui présentent des ruptures de type planaire sont la foliation et la zone problématique. À l'échelle inter-rampe, seulement six cas sont présents. Ils sont caractérisés par le passage de la zone problématique (Julie Bélanger, 2005). La présence d'eau joue aussi un rôle important pour les cas de rupture planaire. En effet, la présence d'eau diminue grandement le facteur de sécurité de chacune des possibilités de rupture ».

« Les abaques de Zambak permettent de dire que les possibilités de fauchage sont limitées au couloir de déformation présent au mur ouest de la fosse 87 (Julie Bélanger, 2005). Ce couloir de déformation est caractérisé par le passage de grands joints de foliation majeurs et continus.

Il se situe à l'intérieur des domaines A(2B) et A(2A). Les abaques de Zambak ne tiennent pas compte de plusieurs facteurs et ceci laisse prévoir que les cas de fauchage pourraient être plus étendus ».

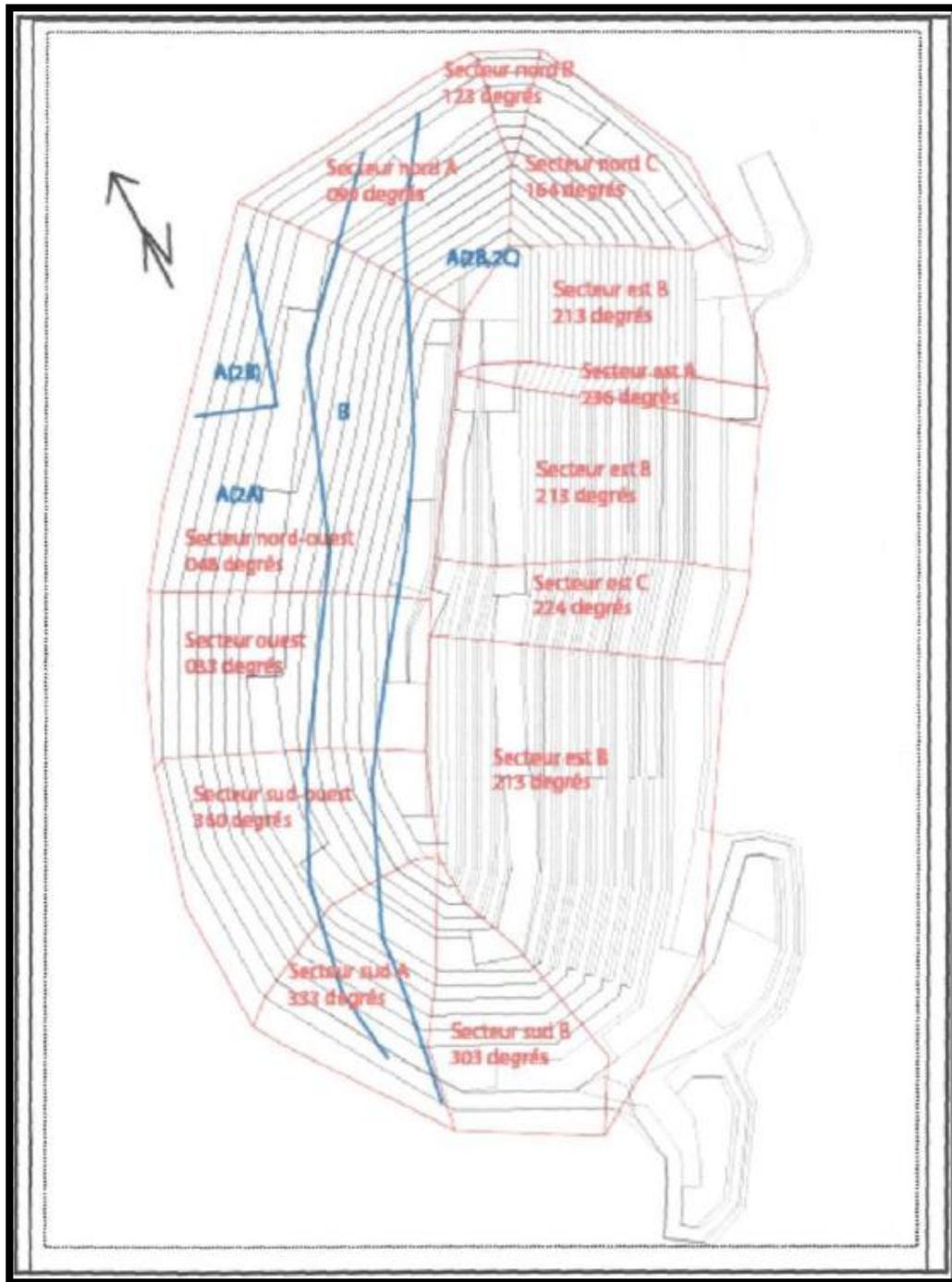


Figure 64 : « l'angle du mur présente ces différents secteurs ainsi que la localisation des quatre domaines structuraux. » (Julie Bélanger, 2005).

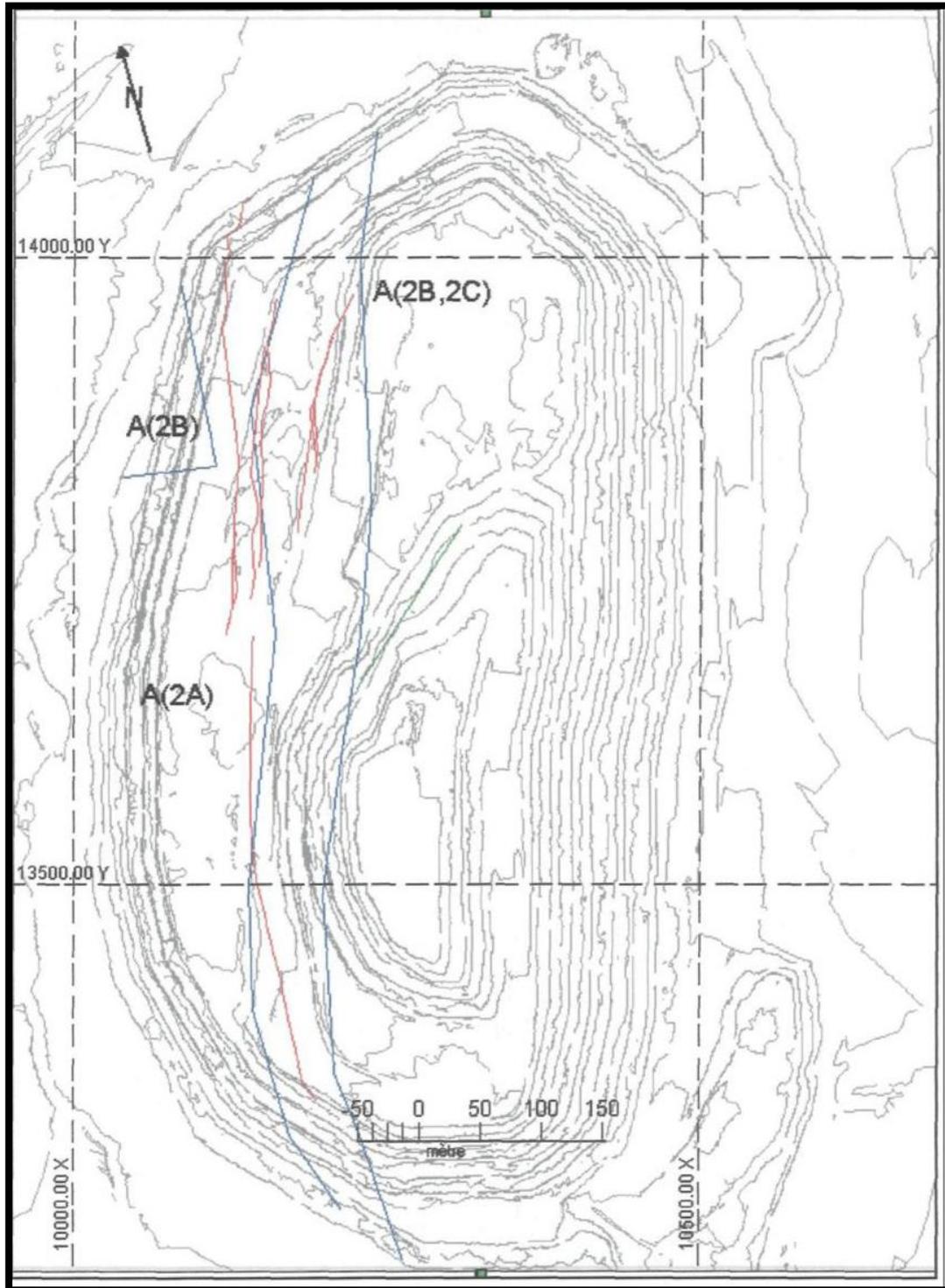


Figure 65 : « Localisation du couloir de joints de foliation majeurs traversant le mur ouest de la fosse 87 de la mine Troilus (lignes rouges). Les domaines structuraux sont aussi représentés en bleu » (Julie Bélanger, 2005).

Chapitre 05 : Présentation de certains cas d'étude de stabilité des massifs rocheux

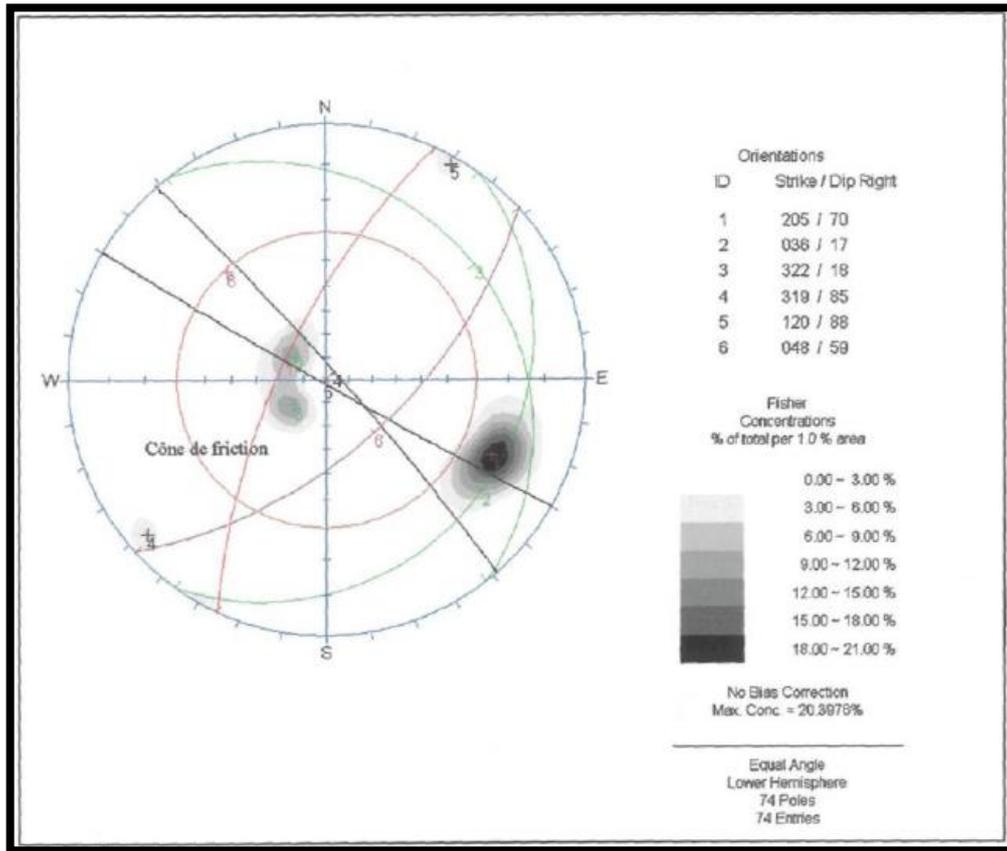


Figure 66 : « Stéréogramme représentant le secteur Nord-Ouest du domaine A(2B). Les demi-cercles de couleur représentent les différentes familles de discontinuités. » (Julie Bélanger, 2005).

Cette figure présente le domaine A(2B) « Le secteur Nord-Ouest présente une direction de 048 avec un angle de mur interrompu de 59°. La figure 66 présente les différentes familles de discontinuité présentes dans ce domaine, ainsi que l'orientation du mur dans ce secteur » (Julie Bélanger, 2005).

Chapitre 05 : Présentation de certains cas d'étude de stabilité des massifs rocheux

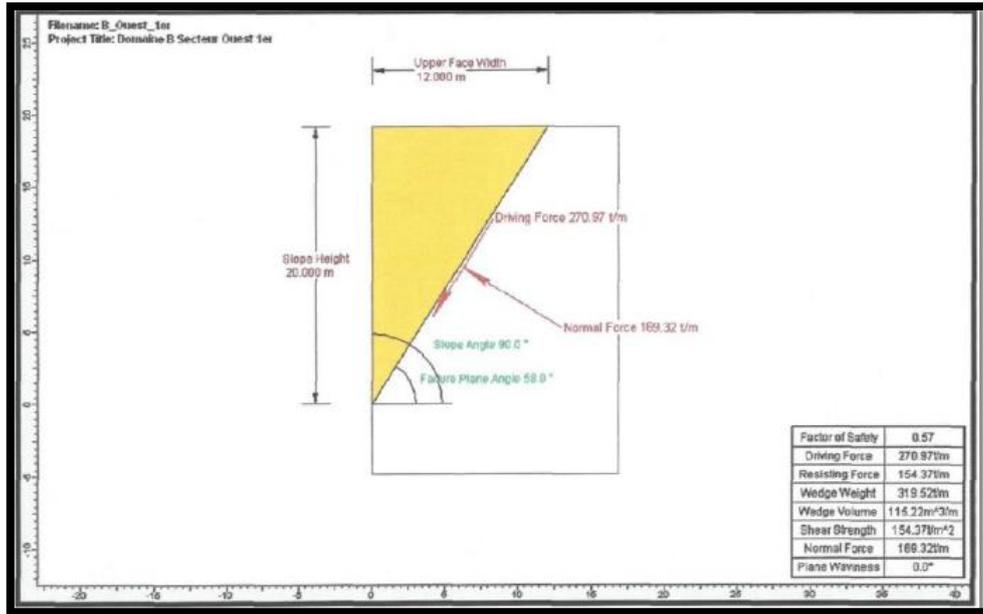


Figure 67 : « Modèle représentant le cas d'une rupture planaire le long du joint no.3 dans le domaine B secteur Ouest de fosse 87 de la mine Troilus. C'est une rupture à l'échelle du banc individuel. » (Julie Bélanger, 2005)

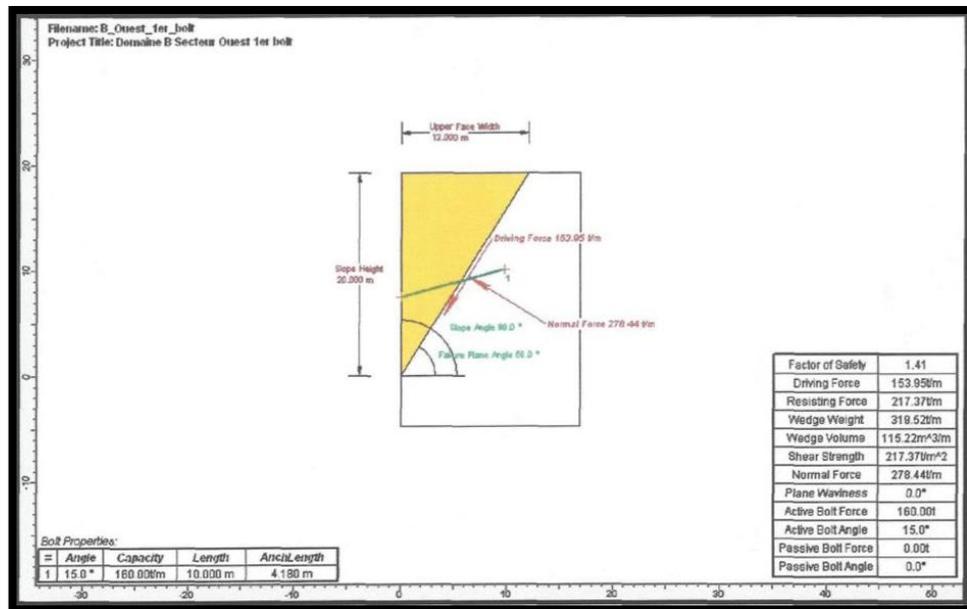


Figure 68 : « Modèle de rupture planaire avec boulonnage. C'est le modèle représentant le même cas que la figure 99, Par contre, les boulons nécessaires pour avoir un facteur de sécurité plus grand que 1.3 sont illustrés. Les dix boulons nécessaires sont représentés par un seul avec la résistance combinée nécessaire. » (Julie Bélanger, 2005)

Chapitre 05 : Présentation de certains cas d'étude de stabilité des massifs rocheux

Tableau 07 : « Résumé du résultat de l'analyse réalisée par le logiciel *ROCPLANE* sur les possibilités de ruptures planaires déterminées par l'analyse cinématique. »

Domaine	Secteur et orientation	Orientation du joint	Portion de mur affectée (banc ou inter-rampe; est, nord, ouest ou sud)	Facteur de sécurité sans boulon	Nombre de boulons pour F.S. > 1.3	Poids du bloc (tonnes par mètre)	Forces (tonnes par mètre)
A(2B,2C)	Nord A 090/59 (inter-rampe) 090/90 (banc)	Joint no.2: 061/35	Banc et inter-rampe Mur nord	Banc et inter-rampe: 1.281	Banc et inter-rampe : 1	Banc : 140 Inter-rampe : 241	Banc: 115 normal 103 résistance 80 entraînement Inter-rampe : 198 normal 177 résistance 138 entraînement
A(2B,2C)	Est B 1 ^{er} 213/53 (inter-rampe) 213/70 (banc)	Joint no.1 : 220/64	Banc Mur est	1.183	1	69	30 normal 73 résistance 62 entraînement
A(2B,2C)	Est B 2 ^e 213/53 (inter-rampe) 213/70 (banc)	Joint no.7 : 223/60	Banc Mur est	0.897	2	118	59 normal 92 résistance 102 entraînement
A(2B,2C)	Est A 1 ^{er} 236/53 (inter-rampe) 236/70 (banc)	Joint no.1 : 220/64	Banc Mur est	1.183	1	69	30 normal 73 résistance 62 entraînement
A(2B,2C)	Est A 2 ^e 236/53 (inter-rampe) 236/70 (banc)	Joint no.7 : 227/55	Banc Mur est	0.804	4	186	107 normal 123 résistance 153 entraînement
A(2B,2C)	Est C 224/53 (inter-rampe) 224/70 (banc)	Joint no.1 : 220/64	Banc Mur est	1.183	1	69	30 normal 73 résistance 62 entraînement
B	Ouest 1 ^{er} 033/59 (inter-rampe) 033/90 (banc)	Joint no.3 : 059/58	Banc et inter-rampe Mur ouest	Banc : 0.5697 Inter-rampe : 0.8354	Banc : 10 Inter-rampe : 28	Banc : 320 Inter-rampe : 1611	Banc : 169 normal 154 résistance 271 entraînement Inter-rampe : 854 normal 1141 résistance 1366 entraînement
B	Ouest 2 ^e 033/59 (inter-rampe) 033/90 (banc)	Joint no.4: 039/54	Banc et inter-rampe Mur ouest	Banc : 0.649 Inter-rampe : 0.649	Banc : 7 Inter-rampe : 37	Banc : 275 Inter-rampe : 1589	Banc : 162 normal 124 résistance 222 entraînement Inter-rampe : 934 normal

Chapitre 05 : Présentation de certains cas d'étude de stabilité des massifs rocheux

							834 résistance 1285 entraînement
B	Nord-Ouest 1 ^{er} 048/59 (inter-rampe) 048/90 (banc)	Joint no.3 : 059/58	Banc et inter-rampe Mur ouest	Banc : 0.5697 Inter-rampe : 0.8354	Banc : 10 Inter-rampe : 28	Banc : 320 Inter-rampe : 1611	Banc : 169 normal 154 résistance 271 entraînement Inter-rampe : 854 normal 1141 résistance 1366 entraînement
B	Nord-Ouest 2 ^e 048/59 (inter-rampe) 048/90 (banc)	Joint no.4: 039/54	Banc et inter-rampe Mur ouest	Banc : 0.649 Inter-rampe : 0.649	Banc : 7 Inter-rampe : 40	Banc : 275 Inter-rampe : 1589	Banc : 162 normal 144 résistance 222 entraînement Inter-rampe : 934 normal 834 résistance 1285 entraînement
B	Nord A 090/59 (inter-rampe) 090/90 (banc)	Joint no.3 : 059/58	Banc et inter-rampe Mur nord	Banc : 0.5697 Inter-rampe : 0.8354	Banc : 10 Inter-rampe : 28	Banc : 320 Inter-rampe : 1611	Banc : 169 normal 154 résistance 271 entraînement Inter-rampe : 854 normal 1141 résistance 1366 entraînement

I.2. Cas de mine Djebel Onk (Kef Essnoun) :

Ce deuxième cas présente un résumé du mémoire de master réalisé au niveau du département des sciences de la terre et de l'univers (Univ. Tébessa) dont le but d'obtention d'un master en l'option de géologie de l'ingénieur et de l'aménagement. Le travail est élaboré en 2020 par Bekkar Hanane et Laouar Fouzia sous la direction de monsieur Boumezbeur Abderrahmane Professeur à l'Université Cheikh Larbi Tébessi, Tébessa. L'intitulé du mémoire est « Les instabilités de la mine de Djebel Onk : les causes et les remèdes ».

Cette étude, est consacré à la problématique d'instabilités de la mine de Kef Essnoun à Djebel Onk (Tébessa, Nord-Est d'Algérie) qui reste l'une des questions principales se posant lors d'exploitation des gisements qui résulte des activités d'extraction par la constitution d'ouvrages miniers, la conception optimale de ces ouvrages doit intégrer les concepts de sécurité du travail.

L'étude d'instabilité des gradins d'exploitation à ciel ouvert de la mine de phosphate de Kef-Essnoun pour laquelle un glissement de terrain s'est produit le 08 Septembre 2007 ; a montré la grande importance de l'étude détaillée de tous les facteurs géologiques, géométriques, lithologique, conditions hydrogéologique et géotechniques du massif. En achevant ce travail, Bekkar Hanane et Laouar Fouzia (2020) ont abouti à d'importantes conclusions :

- Le gisement de phosphate de Kef Essnoun fait partie d'une succession d'assises sédimentaires, développées dans l'Est et le Sud-est constantinois (Algérie), Elle présente une série tertiaire au passage entre le Paléocène et l'Eocène inférieures, il est composé de quatre couches principales en alternance (phosphate, calcaire, phospho-calcaire et marne) (figure 69).

- Les massifs rocheux sont des structures discontinues, et leur étude et leur classification s'appuie sur la caractérisation de la roche saine et des discontinuités (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).

- Les classifications géomécaniques empiriques, établies à base des observations sur terrain menées par l'entreprise et nous même, que ce soit RQD, RMR et le SMR, on déduit que la qualité du massif Kef Essnoun varie en fonction des différents faciès, elle est de bonne pour les calcaires Yprésien-Lutétien, les calcaires phosphatés, les phosphates et les calcaires Danien-Montien sont de qualité moyenne à médiocre, la qualité est de mauvaise à très mauvaise pour les marnes schistifiées du thanetien inferieur. D'après les résultats de la classification SMR on constate que l'interface marneuse constitue la cause probable d'une instabilité du massif en raison de sa mauvaise qualité (marne schistifiées) (Tableau 08 d'après Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).

- « Les rapports d'expertises sur glissement ont abouti, au fait que, les causes probables de l'aléa sont attribuées essentiellement à certains facteurs géologiques et techniques » (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).

- « Afin de confirmer ou d'infirmer les résultats obtenus par la classification semi-empirique, on a utilisé deux méthodes d'analyse de spécialité : méthode des éléments finis (Plaxis) et GEOSLOPE pour la détermination d'un coefficient de sécurité (Fs) qui évalue l'état de stabilité du massif ». Les résultats tirés de ces applications sont :

- « L'analyse par la méthode de l'équilibre limite en utilisant le logiciel Géoslope (SlopeW) donne un facteur de sécurité inférieur à (1) confirmant les résultats des deux méthodes précédentes » (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).
- « L'analyse numérique de stabilité par le logiciel Plaxis8.5 a confirmé, d'une part, les résultats obtenus par la méthode déterministe avec un facteur de sécurité de l'ordre 0.83, et d'autre part, il a permis de constater que le déplacement de la paroi nord de Kef Essnoun est important » (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).

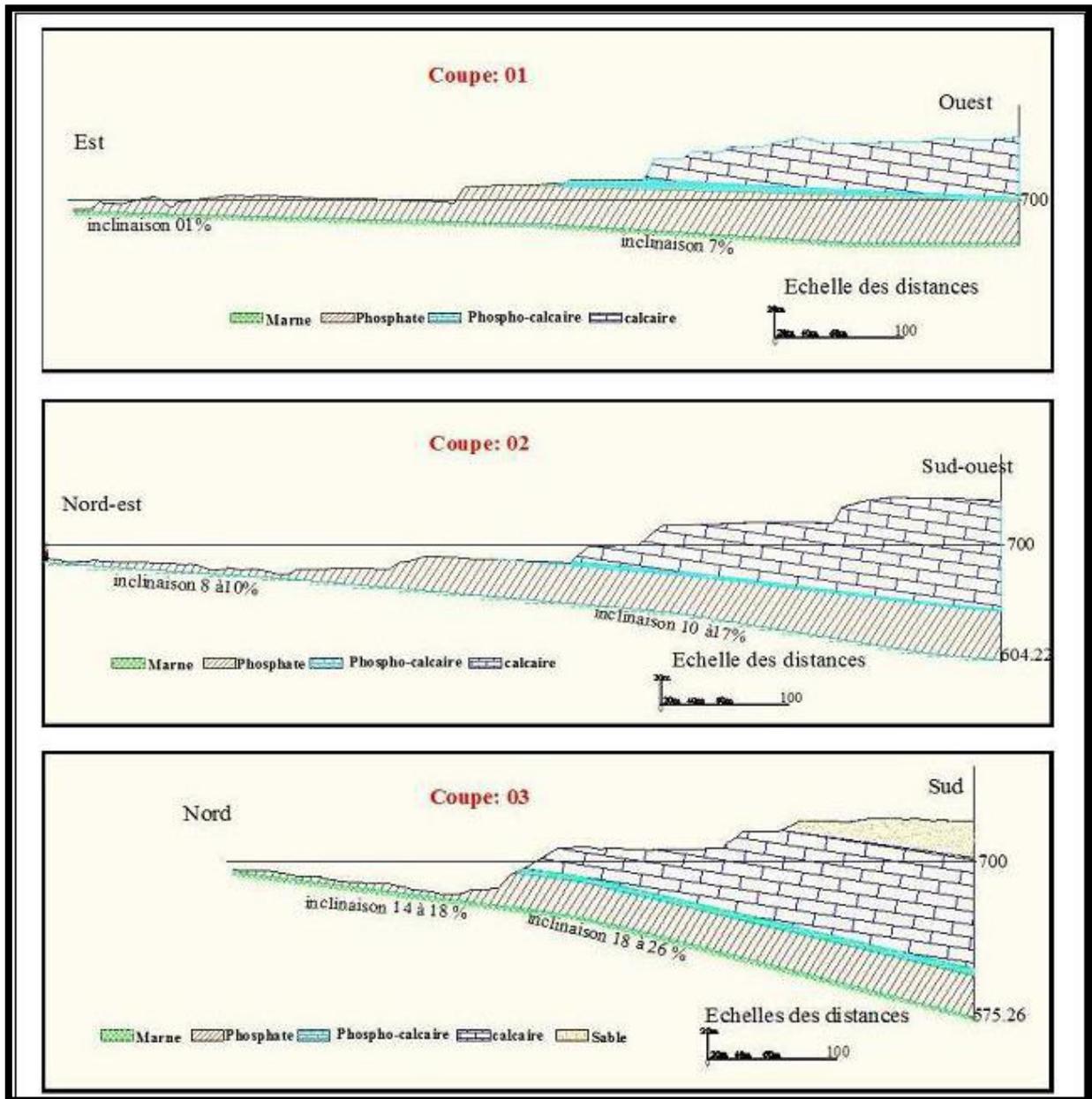


Figure 69 : « Coupes géologiques à travers le gisement de Kef Essnoun » (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020)

Tableau 08 : « Classification SMR des différents faciès » (Bekkar Hanane et Laouar Fouzia, 2020).

Faciès	calcaires Yprésien-Lutétien	calcaires phosphate	phosphate	marne schistifiées	calcaire Danien-Montien
SMR	50	43	41	12	43
Classe	II	II	II	V	II
Description	Bien	Bien	Bien	Très Mauvais	Bien
	Description : Roche très mauvaise Stabilité : complètement instable. Rupture : rupture possible au niveau de la couche des marnes.				

I.3. Cas de mine Boukhadra :

Le troisième cas résume le mémoire de Mekki Yasmine et Zouai Aida intitulé « les causes des instabilités rocheuses de la mine de Boukhadra ».2020 sous la direction de monsieur Boumezbeur A Professeur à l'université Cheikh Larbi Tébéssi, Tébessa. Pour l'obtention d'un master en géologie de l'ingénieur,136p.

Ce travail, est consacré à l'aléatoire d'instabilités rocheuse de la mine de Boukhadra. La stabilité des bancs dans les mines est souvent un problème important qui doit être résolu, en particulier avec l'augmentation des profondeurs d'exploitation. L'estimation de la stabilité en appliquant le système SMR révèle que les glissements potentiels sont du type planaire et en coin.

Dans cette étude, nous avons d'abord étudié la géologie régionale et locale car une compréhension de la géologie permet l'établissement d'un modèle géologique et structurel correct.

L'analyse cinématique par le logiciel Dips 7.0 de Roc science a montré que des glissements de terrain potentiels de type plan coin et basculement peuvent se produire à tout moment et donc des mesures de stabilisation doivent être entreprises. Néanmoins, le degré de fracturation et les familles des joints présents et leurs orientations relatives nous ont amené à penser que les discontinuités sont-elles qui contrôlent la stabilité.

La stabilité des talus joue le rôle le plus important dans la productivité, l'économie et la longévité d'une mine est impératif avant d'ouvrir une mine d'étudier attentivement la stabilité du ben ches. Les pentes instables des fosses non seulement gênent la production mais peuvent causer des dommages importants tant au personnel qu'aux équipements.

Cette étape est suivie d'une caractérisation géomécanique du massif rocheux suivie d'une classification RQD, RMR et GSI.

La stabilité des gradins d'une mine a une influence directe sur la sécurité du personnel et des équipements ainsi que sur l'économie et le rendement du projet minier.

L'étude du cas d'instabilité qui s'est manifestée par un important glissement de terrain dans la mine de Boukhadra à montrer plus d'un type de rupture, la rupture planaire et la rupture du coin ont joué ensemble dans l'instabilité de ce glissement. Sur la base de ce qui précède, il a été constaté que l'étude était basée sur Plusieurs méthodes de programmes d'études. En premier lieu a été utilisé L'approche expérimentale par SMR a décrit la pente comme instable, et que La deuxième méthode, consistant en une analyse cinétique, a montré que Les glissements de terrain plats et en coin sont une menace potentielle de déclenchement en n'importe quel moment.



Figure 70 : « Rupture de coin typique impliquant un glissement sur deux joints persistants avec une ligne d'intersection coupant le talus au pied de la paroi rocheuse et un plan supérieur qui forme une surface de relâchement »



Figure 71 : « Rupture circulaire dans une roche granitique fortement altérée » (Duncan 2008, autoroute en Californie).

Selon les valeurs SMR, Romana (1985) a défini cinq classes de stabilité. Celles-ci sont décrites dans le tableau IV.3)

Il est déduit du tableau IV.3 que les pentes avec une valeur SMR inférieure à 20 peuvent échouer très rapidement. Aucune pente n'a été enregistrée avec une valeur SMR inférieure à 10, car de telles pentes n'existeraient pas physiquement. (Mekki.Y et Zouai.A, 2020)

Tableau 09 : « Différentes classes de stabilité selon la valeur SMR »

Class No.	V	IV	III	II	I
SMR value	0–20	21–40	41–60	61–80	81–100
Rock mass description	Very bad	Bad	Normal	Good	Very good
Stability	Completely Unstable	Unstable	Partially stable	Stable	Completely Stable
Failures	Big planar or soil-like or circular	Planar or big wedges	Planar along some joints and many wedges	Some block failure	No failure
Probability of failure	0.9	0.6	0.4	0.2	0

Source: Romana, 1985.

Une fois que le type de rupture de bloc a été identifié sur le stéréo net, le même diagramme peut également être utilisé pour examiner la direction dans laquelle un bloc glissera et donne une indication des conditions de stabilité. Cette procédure est connue sous le nom d'analyse cinématique. Une application de l'analyse cinématique est montrée sur la paroi rocheuse où deux plans de joint forment un coin qui a glissé hors de la face et vers le photographe. (Mekki.Y et Zouai.A, 2020)

Sur le terrain, on a pu observer au moins quatre familles de discontinuités dont les joints et les failles. Ses discontinuités sont classées en quatre familles (Mekki.Y et Zouai.A, 2020)

Pour remédier à ce type de problème il est recommandé de faire un levé très détaillé des discontinuités et faire une simulation par des logiciels tels que Dips de Roc science pour faire ressortir les zones instables. Les mesures de confortement (Boulonnage, encrage, retalutage...) seront ensuite choisies en fonction du type de rupture potentielle. (Mekki.Y et Zouai.A, 2020)

Conclusion générale :

Avec l'achèvement des éléments de recherche liés à la stabilité des massifs rocheux que nous avons préféré choisir parmi les sujets, en raison de la grande importance du matériel scientifique pour ceux qui ont une spécialisation et une connaissance du sujet dans tous ses aspects. Nous avons discuté dans cette recherche scientifique les différentes causes de la chute de blocs de roche et l'effondrement des pentes, problème qui nécessite d'étudier les caractéristiques du phénomène et de chercher comment le traiter, et l'accent a été mis sur la relation entre les caractéristiques des discontinuités et le risque d'instabilité des massifs rocheux.

Nous avons essayé, dans la mesure du possible, de décrire et de détailler le phénomène et d'identifier certains des résultats qui ont été atteints sur le terrain à travers les expériences précédentes.

Grâce à la collecte du matériel scientifique, nous avons atteint de nombreux résultats, notamment :

La relation entre les propriétés des discontinuités dans les massifs rocheux et le risque de leur instabilité sur plusieurs critères dont : la résistance à la compression, les fractures, le type de roche, la méthode d'excavation du talus, les eaux souterraines et la résistance au cisaillement. L'angle de frottement affecte la stabilité des pentes par son degré entre l'angle de frottement de la rupture et l'angle de frottement de la roche intacte, et le glissement peut être de type rotationnel ou transitionnel, et les glissements de terrain sont classés selon le degré de leur activité et leur profondeur. Tout cela pour déterminer les différentes méthodes de renforcement. On peut aussi résoudre le problème d'instabilité des massifs rocheux en connaissant les facteurs à l'origine du phénomène.

A travers notre étude, un certain nombre de propositions peuvent être présentées concernant cette recherche, représentées dans l'élaboration d'une stratégie de travail, définissant la liste des risques attendus en prenant les mesures nécessaires en temps opportun pour éviter les dommages et en fixant des calendriers qui permettent la mise en œuvre de plans pratiques face aux risques naturels et les traiter selon les capacités et les moyens disponibles.

La recherche scientifique est principalement constructive, et c'est pourquoi nous demandons aux chercheurs de continuer à aborder les sujets liés à cette question d'une nouvelle manière pour suivre le rythme des changements du temps.

Bibliographie :

1-Livres et ouvrages :

- (Adashi T., Ohnishi Y., Arai K. (1991) – Investigation of toppling slope failure at Route 305 in Japan, In : proceedings of the 7th International congress on rock mechanics, 1991, Aachen, Germany, Vol. 3, p.843-846).
- (Barnes P., Lewi B. (1991) — Sheet slides and rotational failures on a convergent margin : the Kidnappers Slide, New Zealand , In : Sedimentology vol. 38, p. 205-221)(Sharp JC (1996) — Present understanding and predictive capability of the stability for very high rock cuts, In : Eurock 96, Balkema ed. , p. 1541-1551)
- (Bruno G., Zezza F., (1992) — Typologies of instability and method of stability verification for the coastal cliffs of Salento (Apulia, Italy) — In: Bolletino di oceanologia teorica ed applicata, vol 10, n° 2-3-4, october 1992, p. 123-131)
- (Calvino A. Dumont P., Durville JL et al. (2001) — Parades contre les instabilités rocheuses, éd. LCPC, 143 p.)
- (Fleurisson J.A. (2001) — Structures géologiques et stabilité des pentes dans les massifs rocheux : description, analyse et modélisation, In : Revue Française de Géotechnique n°95-96 — ed. Presses des Ponts et Chaussées — p. 103-116)
- (Hoek E., Bray J.W. (1973) — Rock slope engineering — Spon Press ed. 1974, 358 p.) (Homand F. (1983) — Stabilité des pentes rocheuses — cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy — n° 3308/2 — 51 p.)
- (Homand F. (1983) — Stabilité des pentes rocheuses — cours de l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy — n° 3308/2 — 51 p18)
- (Houpert R. (1991) — Le comportement à la rupture des roches, In: proceedings of the the International congress on rock mechanics, 1991, Aachen, Germany vol. 3, p. 115-122)
- (Houpert R. (1991) — Le comportement à la rupture des roches, In: proceedings of the the International congress on rock mechanics, 1991, Aachen, Germany vol. 3, p. 115-122)
- (Kerle N., Van Wyk de Vries B. (2001) — The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua, Investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing, In: Journal of Volcanology and geothermal research vol. 105, p. 49-63)
- (Leroueil S. (2001) — Natural slopes and cuts: movements and failure mechanisms, In Géotechnique vol. 51, n°3, p. 197-243)
- LCPC, 1994. Surveillance des pentes instables, Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées.
- (Leroueil S. (2001) — Natural slopes and cuts: movements and failure mechanisms, In Géotechnique vol. 51, n°3, p. 197-243)
- (Lo K Y., Lukajic B., Yuen C.M.K. et a/. (1979) — In-situ stresses in a rock overhang ay the Ontario power generating station, Niagara Falls, In : proceedings of the 4th International congress on rock mechanics, 1979, Montreux, Switzerland , p. 343-352)(Sharp JC (1996) — Present understanding and predictive capability of the stability for very high rock cuts, In : Eurock 96, Balkema ed. , p. 1541-1551)

- (Nédellec JL, Cruchet M. (2003) - Etude bibliographique de la typologie des boulements rocheux et des modes de rupture associés — Applications au contexte de l'île de La Réunion. BRGM RP-52909-FR —25, p.19,28)
- (Norrish N, Willy W. (1999) — Rock slope stability analysis, In: Landslides Investigation and Mitigation, chap. 15, p. 391-425)
- (Panet M. (1991) — Rapport general: les talus rocheux, In: proceedings of the 1^h International congress on rock mechanics, 1991, Aachen, Germany, vol. 3, p. 1577-1585)
- (Pothérat P., Alfonsi P. (2001) — Les mouvements de versant de Séchilienne (Isère), prise en compte de l'héritage structural pour leur simulation numérique, In : Revue Française de Géotechnique n°95-96 — ed. Presses des Ponts et Chaussées — p. 117-131)
- (Sharp JC (1996) — Present understanding and predictive capability of the stability for very high rock cuts, In: Eurock 96, Balkema ed, p. 1541-1551).
- (Williams A.T., Davies P., Bomboe P. (1993)—Geometrical simulation studies of coastal cliff failures in liassic strata, South Wales, UK. In: Earth surface processes and landform, vol 18, p. 703-720)

2-Thèse et mémoire :

- Mémoire de Master (Caractérisation et classification du massif rocheux du Djebel de Boukhadra -Tébessa Melle SADEK Kahina. Melle CHAOUCH Ibtissem.2016 univ de Bejaia)
- Mémoire, MODIFICATION DES CLASSIFICATIONS GÉOTECHNIQUES POUR LES MASSIFS ROCHEUX SCHISTEUX. ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL, Maciej Armatys, Avril 2012, p 163
- Mémoire de Master stabilité des massifs rocheux, BENMARCE Abdelhakim, univ de Guelma -2019- p 98.
- Mémoire, classification géométrique des massifs rocheux et application au cas du tunnel d'Ait Yahia Moussa, Kharfallah Aabdessamed et Kherrat Abdallah, 2020 Univ Abderrahmane Mira de Bejaia-p 51
- Méthode et outils pour l'auscultation et la surveillance des instabilités gravitaires par Phillips Mourot le 8 juin 2013 UNIV de Savoie France
- Michel CHALHOUB, Thèse de Doctorat, APPORTS DES METHODES D'HOMOGENEISATION NUMERIQUES A LA CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX FRACTURES ,2006. L'école Nationale Supérieure des Mines de Paris- p 193
- Rochet L., 1992. Auscultation ; diagnostic ; surveillance, Bull. Int. Assoc. Eng. Géol., (45, 43–57).
- Thèse de doctorat et l'influence des caractères mécaniques géométrique et hydraulique des discontinuités Mr : Ahmari Hakim univ de Montréal (Québec) 2021.
- Thèse de doctorat Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts, Abdelouahed Tahiri 1992, ENPC PARIS / MARNE LA VALLEE, 1992. Français. P 202

- Thèses de doctorat Contribution à l'étude de la stabilité des massifs rocheux fracturés : caractérisation de la fracturation in situ, géostatistique et mécanique des milieux discrets, Ali Rafiee 2008 université de Montpellier II (p 273).

3-Article :

- Barton et al, 1974 chapitres Rock mass classification.
- Comportement mécanique des roches : du laboratoire à l'ouvrage. Muriel Gasc-Barbier 2011 Université Bordeaux I
- Fonction de charge générale en géomécanique : application aux travaux souterrains. Siegfried Maiolino, 2006.
- International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, p (203-212).
- JNGG JNGG : Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, 2002
- Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 389-397
- Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, pp.555-557.
- Lianyang Zhang, 2016: Determination and applications of rock quality designation (RQD),
- SACSIR: South African Council of Scientific and Industrial Research, 1973
- Sen Z, Kazi A., 1984: Discontinuity spacing and RQD estimates from finite length scanlines.
- Sen Z., 1993: RQD-fracture frequency chart based on a Weibull distribution. International
- Stille et Palmström, 2003 in Maciej Armatys, Mémoire, MODIFICATION DES CLASSIFICATIONS GÉOTECHNIQUES POUR LES MASSIFS ROCHEUX SCHISTEUX. ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL, Avril 2012-p 180
- V. Marinos, P. Marinos and E. Hoek, 2005: Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunneling, Original Paper, Bull Eng. Géol. Env.

3-les sites internet :

- <http://d1n7iqsz6ob2ad.cloudfront.net/pdf>, PDF Méthode de confortement
- http://geo.univ-batna2.dz/sites/default/files/geo/files/cours_mdr_chapitre_vi.pdf
- http://www.grr.ulaval.ca/gae_3001/Documents/Notes_2012/CH_06_K.pdf
- <https://doi.org/10.1051/geotech/2001095133> ,2001 publié en ligne 9 octobre 2017
- https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/9404/mod_resource/content/2/ENPC_COTUN_M_ca_roche_partie1_4_2017_10_19.pdf
- <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00002418> Submitted on 28 Jul 2010
- <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00574092/document>
- <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00771338/document>

Liste des figures :

Figure 01 : Roche plutonique.....	3
Figure 02 : Roche volcanique.....	3
Figure 03 : Les principales phases de formation des roches sédimentaires.....	4
Figure 04 : Roches Détritiques.....	4
Figure 05 : Roches sédimentaires chimiques et biochimiques.....	5
Figure 06 : Roche Métamorphisme régional.....	5
Figure 07 : Stratification.....	7
Figure 08 : Les diaclases.....	7
Figure 09 : les contacts lithologiques.	8
Figure 10 : Plans de schistosité.	8
Figure 11 : Les couloirs de fracturation.	9
Figure 12 : Les failles.	9
Figure 13 : Extension d'une discontinuité.....	9
Figure 14 : Fissure ouverte	10
Figure 15 : Orientation d'un plan de discontinuité.....	10
Figure 16 : Espacement dans un massif rocheux avec trois familles de discontinuités.....	10
Figure 17 : Rigidités normale et tangentielle des discontinuités.....	11
Figure 18 : Profils de rugosité typiques et valeur correspondante du JRC Proposés.....	11
Figure 19 : Fissure remplie.....	12
Figure 20 : Angle de dilatance.....	12
Figure 21 : La quantité de débit.	13
Figure 22 : La conductivité hydraulique.	13
Figure 23 : Exemple de joint de calcaire scellé en place, essai réalisé au LRPC de Toulouse	14
Figure 24 : Comportement à la compression simple d'une discontinuité naturelle de gneiss	15
Figure 25 : critère de rupture.....	16
Figure 26 : Approximation du critère de Mohr-Coulomb ($\varphi = 35^\circ$).....	17
Figure 27 : Forme approchée du critère de Høek-Brown	18
Figure 28 : LS de Høek-Brown (pointillé) et LS approché.....	18

Figure 29 : Valeurs pour $g_p(\theta) = g_{WW} p(\theta)$	19
Figure 30 : Illustration graphique des paramètres de caractérisation du RMR.....	27
Figure 31 : Glissement plan blanc sur blanc	35
Figure 32 : Rupture de pied (guide technique, 2004)	36
Figure 33 : Schéma de Rupture de pied (guide technique,2004)	36
Figure 34 : Rupture en dièdre.....	37
Figure 35 : Photo real et un schéma de Rupture de surplomb.....	38
Figure 36 : Basculement par défaut d'assise.....	39
Figure 37 : Fissures de décompression du massif et basculement.....	39
Figure 38 : Basculement par flexion.....	40
Figure 39 : Basculement par développement de pressions en arrière d'écailles	40
Figure 40 : basculement par développement de dévers	41
Figure 41 : Basculement secondaire par le pied.....	41
Figure 42 : Basculement secondaire par la tête.....	42
Figure 43 : Basculement de blocs.....	42
Figure 44 : Figure montrant le phénomène de fauchage.....	43
Figure 45 : Figure montrant le phénomène de flambement.....	43
Figure 46 : Glissement pseudo-circulaire.....	44
Figure 47 : Relation contrainte-déformation en fonction de la vitesse de déformation : Essai sur de la Laurvikite de Scandinavie.....	44
Figure 48 : Évacuations des eaux superficielles dans le déblai.....	55
Figure 49 : a : éperon drainant b : masque drainant.....	55
Figure 50 : coupe type d'une tranchée Drainante.....	56
Figure 51 : a : Drains subhorizontaux. b : Colmatage d'un drain.....	56
Figure 52 : Galerie drainante.....	57
Figure 53 : Réalisation d'une butée de pied (par plots)	58
Figure 54 : Allègement en tête.....	58
Figure 55 : Photo montrant le cas où le purge peut être réalisé.....	58
Figure 56 : Reprofilage.....	59

Figure 57 : Substitution partielle.....	59
Figure 58 : Les ouvrages de soutènement rigides	60
Figure 59 : Ouvrages de soutènements souples	60
Figure 60 : Pieux et barrettes.....	61
Figure 61 : Clous et micropieux	61
Figure 62 : Tirants d’ancrages	61
Figure 63 : a : Renforcement par geosynthétique b : le pneusol.....	61
Figure 64 : l’angle du mur.....	66
Figure 65 : Localisation du couloir de joints.....	67
Figure 66 : Stéréogramme représentant le secteur Nord-Ouest	68
Figure 67 : Modèle représentant le cas d'une rupture planaire le long du joint no3	69
Figure 68 : Modèle de rupture planaire avec boulonnage.....	69
Figure 69 : Coupes géologiques à travers le gisement de Kef Essnoun	73
Figure 70 : « Rupture de coin typique impliquant un glissement sur deux joints persistants avec une ligne d'intersection coupant le talus au pied de la paroi rocheuse et un plan supérieur qui forme une surface de relâchement ».....	75
Figure 71 : « Rupture circulaire dans une roche granitique fortement altérée »	76

Liste des tableaux :

Le tableau 01 : Valeurs de mi pour différents types de roches.....P19
Le tableau 02 : Système de classification des massifs rocheux.....P24
Le tableau 03 : Corrélation entre l'indice RQD et la qualité du massif rocheux.....P25
Le tableau 04 : Classification du massif rocheux selon RMR.....P28
Le tableau 05 : Valeur des différents paramètres de la classification Q-Système.....P30
Le tableau 06 : Evaluation de la cote Q et de la qualité du massif.....P31
Le tableau 07 : « Résumé du résultat de l'analyse réalisée par le logiciel *ROCPLANE* sur les
possibilités de ruptures planaires déterminées par l'analyse cinématique. ».....P70
Le tableau 08 : « Classification SMR des différents
faciès ».....P74
Tableau 09 : « Différentes classes de stabilité selon la valeur SMR ».....P76

ملخص:

تبدأ هذه الدراسة بتوصيف وتصنيف كتل الصخور، وتحديد الأنواع المختلفة من الكسور ومقاربات تحليل عدم الاستقرار، وعرض طرق مراقبة وتثبيت الكتلة الصخرية. حيث تشكل الانقطاعات مناطق ضعف في الكتلة الصخرية؛ إنها تلك التي تحدد بشكل أساسي سلوك الكتلة الصخرية .

يختلف عدم استقرار الصخور بسبب تنوع صلابة المواد الصخرية والمنحدرات .

يتم تحديد النتائج التي تم الحصول عليها لاستهداف العوامل الرئيسية المسؤولة عن عدم استقرار كتل الصخور بشكل أفضل. وبالتالي اختيار أفضل طريقة للتدعيم والتي تؤدي الى اقصى حد من الاستقرار.

الكلمات المفتاحية: الصخور، الانقطاع، التصنيف، الاستقرار، المنحدر.

Résumé :

Cette étude débute par la caractérisation et la classification des massifs rocheux, l'identification des différents types de fractures et des approches d'analyse d'instabilité, et la présentation des méthodes de suivi et de stabilisation des massifs rocheux. Dans les massifs rocheux, les discontinuités forment des zones de faiblesse du massif ce sont elles qui déterminent principalement le comportement du massif. L'instabilité des roches varie en raison de la variété de dureté des matériaux rocheux et des pentes. Les résultats obtenus sont définis pour mieux cibler les principaux facteurs responsables de l'instabilité des massifs rocheux et de prévoir les méthodes de confortation les plus adéquats en fonction du type de rupture concerné.

Mots clés : Massifs rocheux, Discontinuités, Classification, Stabilité, Pente.

Abstract:

This study begins with the characterization and classification of rock massifs, the identification of the different types of fractures and instability analysis approaches, and the presentation of the massifs monitoring and stabilization methods. In the rocky massifs, the discontinuities form zones of weakness of the massif, they are the ones which mainly determine the behavior of the massif. Rock instability varies due to the variety of hardness of rock materials and slopes. The results obtained are defined to better target the main factors responsible for the instability of rock massifs and to provide the most appropriate reinforcement methods depending on the type of failure concerned.

Key words: Rock massifs, Discontinuity, Classification, Stability, Slope.

المكتبة الجامعية المركزية
معلومات حول الأطروحة أو المذكرة

الاسم: نادية

اللقب: بوعبيدة

الكلية: **Faculté des Sciences exactes et des sciences de la nature et de vie**

القسم: **Département des sciences de la terre de l'univers**

التخصص: **option: Géologie de l'ingénieur et Géotechnique**

المستوى: **السنة الثانية ماستر 2**

عنوان المذكرة أو الأطروحة: **THEME: STABILITE DES MASSIFS ROCHEUX (CAUSES ET REMEDES)**

« RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE »

المؤطر: **د. عون منيرة Dr. Aoun Mounira**

الكلمات المفتاحية: **الصخور، الانقطاع، التصنيف، الاستقرار، المنحدر.**

Mots clés : Massifs rocheux, Discontinuités, Classification, Stabilité, Pente.

Key words: Rock massifs, Discontinuity, Classification, Stability, Slope.

تاريخ المناقشة للأطروحة: **(اليوم والشهر والسنة): 2021/06/16**

السنة الجامعية: **2021/2020.**

ملخص:

تبدأ هذه الدراسة بتوصيف وتصنيف كتل الصخور، وتحديد الأنواع المختلفة من الكسور ومقاربات تحليل عدم الاستقرار، وعرض طرق مراقبة وتثبيت الكتلة الصخرية. حيث تشكل الانقطاعات مناطق ضعف في الكتلة الصخرية؛ إنها تلك التي تحدد بشكل أساسي سلوك الكتلة الصخرية.

يختلف عدم استقرار الصخور بسبب تنوع صلابة المواد الصخرية والمنحدرات.

يتم تحديد النتائج التي تم الحصول عليها لاستهداف العوامل الرئيسية المسؤولة عن عدم استقرار كتل الصخور بشكل أفضل. وبالتالي اختيار أفضل طريقة للتدعيم والتي تؤدي الى أقصى حد من الاستقرار.

Résumé :

Cette étude débute par la caractérisation et la classification des massifs rocheux, l'identification des différents types de fractures et des approches d'analyse d'instabilité, et la présentation des méthodes de suivi et de stabilisation des massifs rocheux. Dans les massifs rocheux, les discontinuités forment des zones de faiblesse du massif ce sont elles qui déterminent principalement le comportement du massif. L'instabilité des roches varie en raison de la variété de dureté des matériaux rocheux et des pentes. Les résultats obtenus sont définis pour mieux cibler les principaux facteurs responsables de l'instabilité des massifs rocheux et de prévoir les méthodes de confortation les plus adéquats en fonction du type de rupture concerné.

Abstract:

This study begins with the characterization and classification of rock massifs, the identification of the different types of fractures and instability analysis approaches, and the presentation of the massifs monitoring and stabilization methods. In the rocky massifs, the discontinuities form zones of weakness of the massif, they are the ones which mainly determine the behavior of the massif. Rock instability varies due to the variety of hardness of rock materials and slopes. The results obtained are defined to better target the main factors responsible for the instability of rock massifs and to provide the most appropriate reinforcement methods depending on the type of failure concerned.

المكتبة الجامعية المركزية
معلومات حول الأطروحة أو المذكرة

الاسم: كريم

اللقب: بلغار

الكلية: **Faculté des Sciences exactes et des sciences de la nature et de vie**

القسم: **Département des sciences de la terre de l'univers**

التخصص: **option: Géologie de l'ingénieur et Géotechnique**

المستوى: **السنة الثانية ماستر 2**

عنوان المذكرة أو الأطروحة: **THEME: STABILITE DES MASSIFS ROCHEUX (CAUSES ET REMEDES)**

« RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE »

المؤطر: **د. عون منيرة Dr. Aoun Mounira**

الكلمات المفتاحية: **الصخور، الانقطاع، التصنيف، الاستقرار، المنحدر.**

Mots clés : Massifs rocheux, Discontinuités, Classification, Stabilité, Pente.

Key words: Rock massifs, Discontinuity, Classification, Stability, Slope.

تاريخ المناقشة للأطروحة: **(اليوم والشهر والسنة): 2021/06/16**

السنة الجامعية: **2021/2020.**

ملخص:

تبدأ هذه الدراسة بتوصيف وتصنيف كتل الصخور، وتحديد الأنواع المختلفة من الكسور ومقاربات تحليل عدم الاستقرار، وعرض طرق مراقبة وتثبيت الكتلة الصخرية. حيث تشكل الانقطاعات مناطق ضعف في الكتلة الصخرية؛ إنها تلك التي تحدد بشكل أساسي سلوك الكتلة الصخرية.

يختلف عدم استقرار الصخور بسبب تنوع صلابة المواد الصخرية والمنحدرات.

يتم تحديد النتائج التي تم الحصول عليها لاستهداف العوامل الرئيسية المسؤولة عن عدم استقرار كتل الصخور بشكل أفضل. وبالتالي اختيار أفضل طريقة للتدعيم والتي تؤدي الى أقصى حد من الاستقرار.

Résumé :

Cette étude débute par la caractérisation et la classification des massifs rocheux, l'identification des différents types de fractures et des approches d'analyse d'instabilité, et la présentation des méthodes de suivi et de stabilisation des massifs rocheux. Dans les massifs rocheux, les discontinuités forment des zones de faiblesse du massif ce sont elles qui déterminent principalement le comportement du massif. L'instabilité des roches varie en raison de la variété de dureté des matériaux rocheux et des pentes. Les résultats obtenus sont définis pour mieux cibler les principaux facteurs responsables de l'instabilité des massifs rocheux et de prévoir les méthodes de confortation les plus adéquats en fonction du type de rupture concerné.

Abstract:

This study begins with the characterization and classification of rock massifs, the identification of the different types of fractures and instability analysis approaches, and the presentation of the massifs monitoring and stabilization methods. In the rocky massifs, the discontinuities form zones of weakness of the massif, they are the ones which mainly determine the behavior of the massif. Rock instability varies due to the variety of hardness of rock materials and slopes. The results obtained are defined to better target the main factors responsible for the instability of rock massifs and to provide the most appropriate reinforcement methods depending on the type of failure concerned.