

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

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



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrage d'Art

Présenté par : RAMDANI Mouchira

---

**Thème : Étude de Confortement d'un Talus Rocheux  
Contre la Chute de Pierres sur la RN80 du PK 66+800 Au  
PK 67+300, Wilaya de Guelma**

---

Sous la direction de : Dr. BENAMARA Fatima Zohra

Juin 2023

# Remerciment

*Tout d'abord, je remercie le Tout-Puissant Allah de m'avoir donné force et inspiration.*

*Ma sincérité de gratitude à mon encadreur Mme Benamarafatima Zohra Pour m'avoir accordé l'honneur de diriger ce travail, et pour ces courtoisies, accueil et efforts, j'aurais difficile de trouver les mots justes pour exprimer ma gratitude.*

*Mes remerciements vont également à Mr et Mme Pour avoir accepté d'être membre du jury pour ce modeste ouvrage.*

*Je tiens à remercier tous mes professeurs qui ont apporté une contribution particulière à ma formation.*

*Je remercie du fond du cœur, mes parents et mon mari pour leur soutien et leur patience durant mes études; et pour leur aide et leurs encouragements, Sont toujours ma source de tendresse et de volonté.*

*Un merci spécial à ma famille et plus particulièrement à mes frères et sœurs et leurs enfants.*

*Enfin, je remercie sincèrement mes amis et tous ceux qui m'ont soutenu dans ce travail.*

*je serais difficile de trouver les mots juste pour exprimer mon reconnaissance.*

## MERCI



## *Dédicaces*

*Je dédie cet humble travail*

*A ma mère et mon père pour leurs sacrifices, leur soutien et leurs encouragements A mes frères et sœur que j'adore et leurs enfants et à mon mari et ma deuxième famille*

*A mes meilleurs amis Dounia, Aya et Samah .*

*A toute ma famille*

**Résumé**

La route RN80 est dominée par des versants de dimensions relativement imposantes, générant des chutes de pierres ou de blocs occasionnelles, voire de façon plus exceptionnelles des éboulements d'ampleur limitée. L'impact sur la chaussée concerne généralement la voie amont. Les phénomènes sont suffisamment importants pour, le plus souvent, entièrement bloquer la route et endommager de façon significative la voirie. Le site de glissement objet de cette étude est localisé sur le tracé de la route nationale RN80 au PK 66+800, et PK 67+300. Pour remédier à ces instabilités. Un confortement du talus amont de cette section de la route a été proposé. Afin de juger de la faisabilité de la solution d'intervention au niveau des sections instables critiques. Une étude numérique par éléments finis de la stabilité du site est réalisée avant et après confortement. Les résultats obtenus vont être comparés et interprétés.

**Mots clés** : talus rocheux, confortement, ancrage, instabilité, modélisation

## **Abstract**

The RN80 road is dominated by slopes of relatively large dimensions, generating occasional falls of rocks or blocks, or even, more exceptionally, landslides of limited magnitude. The impact on the roadway generally concerns the upstream lane. The phenomena are significant enough to, most often, completely block the road and significantly damage the road network. The landslide site covered by this study is located on the route of the RN80 national road at PK 66+800, and PK 67+300. To remedy these instabilities. Reinforcement of the upstream embankment of this section of the road has been proposed. In order to judge the feasibility of the intervention solution at the level of the critical unstable sections. A numerical study by finite elements of the stability of the site is carried out before and after reinforcement. The results obtained will be compared and interpreted.

**Keywords:** rock slope, reinforcement, anchoring, instability, modeling

## المخلص

تهيمن المنحدرات الكبيرة نسبيا على الطريق الوطني رقم 80 (RN80) بين النقطة الكيلومترية 66+800 و PK 67+300 مما يولد سقوطا عرضيا من الحجارة او الكتل و بصفة استثنائية انهيارات ارضية محدودة الحجم . يتعلق التأثير على الطريق بشكل عام بمسار المنبع حيث أن الظواهر مهمة بما يكفي, في معظم الاحيان لسد الطريق تماما و الحاق اضرار كبيرة بالطريق . يقع موقع الانزلاق لهذه الدراسة على الطريق الوطني رقم 80 (RN80) بين النقطة الكيلومترية 66+800 و PK 67+300 . و لعلاج هذاته الاضطرابات تم اقتراح تعزيز منحدر المنبع لهذا الجزء من الطريق و هذا من أجل الحكم على جدوى حل التدخل على مستوى الاقسام الحرجة الغير المستقرة. سيتم اجراء دراسة رقمية للعناصر المحدودة لاستقرار الموقع قبل وبعد التعزيز. سيتم مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها وتفسيرها

الكلمات المفتاحية : المنحدر الصخري, التعزيز, التثبيت, عدم الاستقرار, النمذجة.



# SOMMAIRE

Remerciement	01
Dédicaces	02
Résumé	03
Abstract	04
ملخص	05
Sommaire	06
Liste des figures	07
Liste des tableaux	08
Introduction générale	16
<b>Chapitre I : Caractérisation et classification des massifs rocheux</b>	
I.1 Introduction	18
I.2 Caractérisation du massif rocheux	18
I.2.1 Discontinuités du massif rocheux	18
I.2.1.1 Typologie	18
I.3 Propriétés géométriques d'une discontinuité	19
I.3.1 Nombre de familles de joints	19
I.4. Orientation du plan des joints	20
I.5 Espacement des joints	21
I.6 Rugosité de la surface du joint	21
I.7 Imbrication des joints	22
I.8 Ouverture et remplissage du joint	23
I.9 Les différents systèmes de classification	23
I.9.1 Système du RQD (Rock Quality Designation)	24
I.9.2 Système du NGI (Rock Mass Quality)	24
I.9.3 La classification de Bieniawski RMR (Rock Mass Rating).	28
I.9.4 Système du GSI (Geological Strength Index)	30
I.9.5 Classifications de l'AFTES	32
I.9.5.1 Recommandation de L'AFTES	32
I.10 Conclusion	33
I.11 Références bibliographiques du premier chapitre	34
<b>Chapitre II : Instabilité des massifs rocheux</b>	
II.1 Introduction	36
II.2. Phénomène d'instabilité des massifs rocheux	36
II.3 Mécanismes de fragilisation des matériaux en Place	37
II.4 Classification des instabilités	38
II.4.1 Les chute de blocs	38
II.4.2 Les ruptures des massifs rocheux	38

II.4.3 Les très grands écroulements	39
II.4.4 Les coulées boueuses	40
II. 5 Les types des instabilités des talus rocheux	40
II.5.1 Les glissements de terrain	40
II.5.2 Le Fluage	41
II.5.3 La solifluxion	42
II.6 Les causes d'instabilités des talus rocheux	42
II.6.1 Les facteurs conditionnant	42
II.6.1.1 La lithologie	42
II.6.1.2 La pente	42
II.6.1.3 Le relief	43
II.6.1.4 La proximité du réseau de Draina	43
II.6.1.5 L'activité tectonique récente à Actuelle	43
II.6.2 Les facteurs déclenchants	43
II.6.2.1 Les précipitations	43
II.6.2.2 La sismicité	43
II.6.2.3 Les cours d'eaux et les Résurgences	43
II.6.2.4 Le couvert végétal	44
II.7 Les différents mécanismes de rupture.	44
II.7.1 Le Glissement plan	44
II.7.2 Le glissement dièdre	44
II.7.3 Le glissement rotationnel	45
II.7.4 La rupture de colonne	45
II.7.5 Rupture de surplomb	45
II.7.6 La rupture en basculement	46
II.7.7 Fauchage	46
II.7.8 Flambement	46
II.8 Conclusion	47
II.9 Référence bibliographique du deuxième chapitre	47

### **Chapitre III Méthodes de confortement des massifs rocheux**

III.1 Introduction	
III.2 Techniques de stabilisation contre les instabilités Rocheuses	48
III.2.1 Parades actives	48
III.2.1.1 Suppression de la masse	48
III.2.1.2 La purge	48
III.2.1.3 Le reprofilage	49
III.2.1.4 Béton projeté	49
III.2.1.5 l'ancrage	50
III.2.1.6 Filets et grillages plaqués	50
III.2.1.7 Le soutènement	51
	51
III.2.2 Parades passives	
III.2.2.1 L'éboulement	51

III.2.2.2 Ecrans	52
III.2.2.3 Structures rigides	52
III.2.2.4 Structures déformables – Ecrans	52
III.2.2.5 Grillage ou filet pendu	52
III.2.2.6 Casquette ou galerie pare- Blocs	53
III.2.2.7 Les barrières dynamiques	53
III.2.2.8 Les enrochements	54
III.3 Aoutes méthodes de confortement des talus Rocheux	55
III.3.1 Clous	55
III.3.2 Les micropieux	55
III.3.3 L'aplatissement des talus	56
III.3.4 L'injection	56
III.3.5 Le drainage	56
III.4 Conclusion	57
III.5 Références bibliographique du troisième chapitre I	57

## **Chapitre IV Présentation du projet concerné par l'étude**

IV.1 Introduction	58
IV.2 Aperçu géologique et géomorphologique	59
IV.2.1 Perçu géomorphologique	59
IV.2.2 Aperçu géologique	59
IV.2.2.1 Géologie de la zone	59
IV.2.2.2 Géologie de site	60
IV.3 Diagnostic géologique et géotechnique	62
IV.3.1 Diagnostic géologique	62
IV.3.1.1 Les facteurs permanents caractérisant la prédisposition de site instabilités	62
IV.3.1.2 Les facteurs du déclenchement variables dans le temps	62
IV.3.2 Diagnostic géotechnique	64
IV.3.3 Diagnostic géophysique	64
IV.4 Solution des confortements par section	67
IV.5 Références bibliographique du quatrième chapitre	68

## **Chapitre V : Etude numérique d'un talus rocheux**

V.1 Présentation du code PLAXIS	69
V.1.1 Le programme d'entrée des données (input)	69
V.1.2 Le programme de calcul	73
V.1.3 Le Menu De Calcul	73
V.1.4 Le programme de résultats (output)	74
V.1.5 Le programme courbe (curves)	75

---

V.1.6 Les modèles du comportement du sol	75
V.1.7 Modèle élastique linéaire	75
V.1.8 Modèle de Mohr-Coulomb	76
V.2 Étude numérique du glissement d'un talus rocheux	76
V.2.1 Introduction	76
V.2.2 Etude du profil de la section 03 avant confortement de la route	77
V.2.3 Présentation des résultats du calcul	80
V.2.4 Etude du profile de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage	83
V.2.4.1 Etude du profile de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage à sec	83
V.2.4.2 Etude du profile de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage avec nappe	87
V.3 Etude du profil de la section 01 avant confortement du talus à sec	88
V.3. Présentation des résultats	89
V.3.1 Etude du profil de la section 01 avant confortement du talus cas nappe phréatique	91
V.3.2 Etude du profil de la section 01 après confortement du talus	92
V.4 Interprétation des résultats	96
V.5 Références bibliographiques du cinquième chapitre	97
Conclusion générale	98

## Liste des figures

<b>Chapitre I : Caractérisation et classification des massifs rocheux</b>		<b>Page</b>
<b>Figure. I.1</b>	Les différentes découpes du massif rocheux en plaque	19
<b>Figure. I.2</b>	L'orientation du plan des joints	20
<b>Figure. I.3</b>	Espacement des joints	21
<b>Figure. I.4</b>	Description de la rugosité des joints	22
<b>Figure. I.5</b>	Imbrication des joints	23
<b>Figure. I.6</b>	Ouverture des joints	23
<b>Figure. I.7</b>	Estimation de la valeur RQD.	24
<b>Figure. I.9</b>	Déférents critères de classification selon AFTES	33
<b>Chapitre II : Instabilité des massifs rocheux</b>		
<b>Figure. II.1</b>	Influence du pendage sur le glissement	37
<b>Figure. II.2</b>	Chute de blocs.	38
<b>Figure. II.3</b>	Les grands écroulements	39
<b>Figure. II.4</b>	Les coulées boueuses	40
<b>Figure. II.5</b>	Glissements de terrain	41
<b>Figure. II.6</b>	Fluage	41
<b>Figure. II.7</b>	La solifluxion	42
<b>Figure. II.8</b>	Glissement plan	44
<b>Figure. II.9</b>	Glissement dièdre	44
<b>Figure. II.10</b>	Glissement rotationnel	45
<b>Figure. II.11</b>	Rupture de colonne	45
<b>Figure. II.12</b>	Rupture de surplomb	45

<b>Figure. II.13</b>	La rupture en basculement de blocs	46
<b>Figure .II.14</b>	Fauchage	46
<b>Figure .II.15</b>	Flambement	47
<b>Chapitre III : Méthodes de confortement des massifs rocheux</b>		
<b>Figure.III.1</b>	Purge par canne.	48
<b>Figure. III.2</b>	Purge par vérin plat.	48
<b>Figure. III.3</b>	Reprofilage mécanique	49
<b>Figure.III.4</b>	Travaux de réalisation de béton projeté	50
<b>Figure. III.5</b>	Boulons à ancrage ponctuel et à ancrage réparti	50
<b>Figure. III.6</b>	Travaux de pose de grillage	51
<b>Figure. III.7</b>	Travaux de soutènement	51
<b>Figure .III.8</b>	Eboulement à droite de route	51
<b>Figure .III.9</b>	Structures semi-rigides	52
<b>Figure .III.10</b>	Structures déformables – écrans	52
<b>Figure. III.11</b>	Filet pendu	53
<b>Figure.III.12</b>	Protection par galerie - Le Grand Rocher	53
<b>Figure .III.13</b>	Les barrières dynamiques	54
<b>Figure .III.14</b>	Les enrochements	54
<b>Figure .III.15</b>	Les clous	55
<b>Figure .III.16</b>	Les micropieux	56
<b>Figure .III.17</b>	L'aplatissement des talus	56
<b>Figure.III.18</b>	Action de drainage sur un talus soumis à une nappe	57
<b>Chapitre IV : Présentation du projet concerné par l'étude</b>		
<b>Figure IV.1</b>	Localisation du projet par apport au réseau routier de la RN80	58
<b>Figure .IV.2</b>	Localisation de pointe instable par rapport Au l'axe routier de la RN80	58
<b>Figure .IV.3</b>	Schéma morphologique des tracés selon au niveau de RN 80 PK	59

	66+800 –Pk 67+300.	
<b>Figure IV.4</b>	Carte géologique Au niveau de site (extrait de la carte géologique de Constantine à 1/200 000.	60
<b>Figure IV.5</b>	Eboulis de pente et des roches broyées et altérées.	61
<b>Figure IV.6</b>	Calcaires marneux grisâtre fracturés.	61
<b>Figure. IV.7</b>	Phénomène particulier (surplomb).	63
<b>Figure. IV.8</b>	Exemple de blocs effondrés du paquet rocheux et tombés sur la Plateforme	63
<b>Figure. IV.9</b>	Tomographie Profil 01	66
<b>Figure. IV.10</b>	Tomographie Profil 03	66
<b>Chapitre V : étude numérique d'un talus rocheux</b>		
<b>Figure V.1</b>	Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique	71
<b>Figure V.2</b>	Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol	71
<b>Figure V.3</b>	Tracé en plan du projet d'étude	77
<b>Figure V.4</b>	Profile de la section globale	77
<b>Figure V.5</b>	Profil de la section 03	77
<b>Figure V.6</b>	Modèle d'éléments finis du profil de la section 03	78
<b>Figure V.7</b>	La génération du maillage	79
<b>Figure V.8</b>	Contraintes initiales	79
<b>Figure V.9</b>	Les phases de calculs	80
<b>Figure V.10</b>	Maillage déformé du profil non conforté	80
<b>Figure V.11</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus rocheux cas sec	81
<b>Figure V.12</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus rocheux non conforté à sec	81
<b>Figure V.13</b>	Contraintes horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) du talus rocheux non conforté à sec	82
<b>Figure V.14</b>	Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus rocheux non conforté à sec	82
<b>Figure V.15</b>	Contraintes tangentielles ( $\tau_{xy}$ ) du talus rocheux non conforté à sec	83
<b>Figure V.16</b>	Le modèle du profil de la section 03 conforté par tirant d'ancrage	84

<b>Figure V.17</b>	La génération du maillage du profile 03 conforté	84
<b>Figure V.18</b>	Maillage déformé du profil conforté	85
<b>Figure V.19</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus rocheux cas renforcement par tirant d'ancrage à sec	85
<b>Figure V.20</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus rocheux cas confortement total à sec	86
<b>Figure V.21</b>	Contraintes horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) du talus rocheux cas conforté par rant d'ancrage à sec	86
<b>Figure V.22</b>	Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus rocheux cas conforté sec	87
<b>Figure V.23</b>	Contraintes tangentiellles ( $\tau_{xy}$ ) du talus rocheux conforté à sec	87
<b>Figure V.24</b>	Le modèle du talus section 03 avec nappe phréatique	87
<b>Figure V.25</b>	Déplacements horizontaux et verticaux du talus section 03 conforté avec nappe phréatique	88
<b>Figure V.26</b>	Le modèle du profil de la section 01 de la route	89
<b>Figure V.27</b>	Le maillage initial du modèle	
<b>Figure V.28</b>	Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus section 01 avant confortement à sec	89
<b>Figure V.29</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 avant confortement à sec	90
<b>Figure V.30</b>	Contraintes horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) du talus section 01 non conforté à Sec	90
<b>Figure V.31</b>	Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus section 01 non conforté à sec	91
<b>Figure V.32</b>	Contraintes tangentielle ( $\tau_{yy}$ ) du talus section 01 non conforté à Sec	91
<b>Figure V.33</b>	Le modèle du talus section 01 avec nappe phréatique	91
<b>Figure V.34</b>	Déplacements horizontaux et verticaux du talus section 01 avant avec nappe	92
<b>Figure V.35</b>	Le modèle du profil de la section 01 après confortement à sec	92
<b>Figure V.36</b>	Maillage initial du modèle et déforme du talus section 01	92

<b>Figure V.37</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 après confortement à sec	93
<b>Figure V.38</b>	Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 après confortement à sec	93
<b>Figure V.39</b>	Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) du talus section 01 conforté à sec	93
<b>Figure V.40</b>	Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus section 01 conforté à sec	94
<b>Figure V.41</b>	Contraintes tangentielle ( $\tau_{yy}$ ) du talus section 01 conforté à sec	94
<b>Figure V.42</b>	Déplacements horizontaux dans le talus section 03 : cas non conforté à sec et avec nappe	95
<b>Figure V.43</b>	Les déplacements verticaux dans le talus section 03 : cas non conforté à sec et avec nappe	95
<b>Figure V.44</b>	Les déplacements Total dans le talus section 01 : cas non conforté et non conforté nappe	96
<b>Figure V.45</b>	Force axiale dans le tirant d'ancrage	96
<b>Figure V.46</b>	déplacement total dans le tirant d'ancrage	96

## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b>	Tableau I.1 Classification AFTES selon le nombre de familles de discontinuités	20
<b>Tableau I.2</b>	Classification A.F.T.E.S selon l'intervalle entre les discontinuités de chaque famille	21
<b>Tableau I.3</b>	classification du roche en fonction du RQD	24
<b>Tableau I.4</b>	Paramètres de la classification du système Q	26
<b>Tableau I.5</b>	Valeur de Q et qualité du massif rocheux	28
<b>Tableau I.6</b>	Paramètres de classification des roches et notes de pondération	29
<b>Tableau I.7</b>	Note d'ajustement pour l'orientation des joints .	29
<b>Tableau I.8</b>	La classe et la qualité du massif selon RMR .	30
<b>Tableau I.9</b>	Qualité du massif selon la valeur du GSI .	30
<b>Tableau II.1</b>	Classement des éboulements en fonction de leur volume.	36
<b>Tableau IV.1</b>	description et classe d'altération du massif du talus étudié	62
<b>Tableau IV.2</b>	Sectionnement géographique de point instable	62
<b>Tableau IV.3</b>	Valeurs des principaux paramètres physiques et mécanique	64
<b>Tableau IV.4</b>	Classification AFTES-ISRM de la matrice rocheuse	64
<b>Tableau IV.5</b>	Valeurs des principaux paramètres géophysique	65
<b>Tableau IV.6</b>	Les caractéristiques géo-mécaniques retenues	67
<b>Tableau V.1</b>	profile de section 03	78
<b>Tableau V.2</b>	Propriétés des ancrages	83
<b>Tableau V.3</b>	Bilan des résultats de la section 03	88
<b>Tableau V.4</b>	profile de section 03	88
<b>Tableau V.5</b>	Bilan des résultats de la section 01	94



# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

La stabilité d'un massif rocheux dépend de plusieurs facteurs, tels que la géologie du site, les contraintes exercées sur le massif, les caractéristiques mécaniques de la roche, les conditions environnementales et les éventuelles actions anthropiques.

Le renforcement d'un massif rocheux est souvent nécessaire lorsque sa stabilité est compromise ou lorsque des activités humaines requièrent une meilleure résistance du site. Plusieurs méthodes de confortement sont appliquées tels que le l'ancrage, les filets et grillages, les barrières dynamiques et les enrochements.

Dans le cadre de la conjonction et l'assurance de la fluidité du trafic sur la RN 80 entre Khezaras et Sedrata, des sections du tracé de cette pénétrante passent par des masses rocheuses ce qui nécessite l'étude de leurs stabilités afin d'assurer d'une part l'avancement des travaux, et d'autre part pour garantir la protection des transporteurs

L'étude présentée dans ce mémoire avait pour finalité d'étudier la stabilité d'un glissement de terrain sur la RN 80 du PK 66+800 au PK67+300» situé à Khezara - Sedrata de la wilaya de Guelma. En ce qui concerne la méthodologie, on a analysé le mouvement du terrain, afin de localiser les zones instables et identifier les causes réelles de ce glissement.

Les solutions de stabilisation seront étudiées en détail à travers leur conception, calcul et vérification de stabilité. Il est également important d'identifier les facteurs déclenchants ou aggravants des mouvements afin de mettre en place des méthodes de surveillance et de confortement.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la caractérisation des massifs rocheux en présentant en bref les propriétés géométriques des discontinuités, ainsi que les méthodes de classification des massifs rocheux

Le second chapitre présente les différentes instabilités affectants les massifs rocheux. Ainsi que les facteurs peuvent contribuer à l'instabilité des massifs rocheux.

Le troisième chapitre résume l'ensemble des méthodes de confortement des massifs rocheux, ainsi que les techniques de renforcement des versants rocheux tels que des ancrages, des barres d'armature, des filets métalliques, des boulons d'injection ou des écrans pare-blocs.

Le quatrième chapitre présente l'objectif principal de ce projet en détail tels que l'emprise de l'instabilité sur terrain, les caractéristiques géologiques et géotechniques du talus rocheux en mouvement.

Dans le cinquième chapitre, une étude numérique en élément finis au moyen du logiciel Plaxis 8.6 est effectuée, afin d'étudier la stabilité du talus avant et après confortement.

A la fin de ce mémoire, une conclusion générale est présentée faisant ressortir les principaux points traités par cette étude, ainsi que les résultats obtenus. .

*Chapitre I*  
*Caractérisation et*  
*classification*  
*des massifs rocheux*

## **I.1 Introduction**

La caractérisation des massifs rocheux est une étape cruciale dans divers domaines tels que l'ingénierie géotechnique, la construction de tunnels et les travaux miniers. Elle consiste à comprendre les propriétés géologiques et mécaniques des roches qui composent un massif donné.

Cette caractérisation fait appel à différentes méthodes et techniques. Les études géologiques sur le terrain permettent de décrire les formations géologiques présentes dans le massif rocheux, ainsi que d'identifier les discontinuités géologiques telles que les failles, les fractures et les strates.

## **I.2 Caractérisation du massif rocheux**

Beaucoup de discontinuités sont le résultat d'une ou plusieurs actions mécaniques que le massif a subi au cours de son histoire tectonique. A chacune de ces actions, on peut associer une ou plusieurs familles de discontinuités. L'étude statistique fait apparaître généralement les familles de discontinuités qui existent dans le massif. Parfois, il est cependant nécessaire de renoncer à représenter le système de discontinuités par un ensemble de familles directionnelles. Les discontinuités sont toujours assimilées à des surfaces planes.

### **I.2.1 Discontinuités du massif rocheux**

#### **I.2.1.1 Typologie**

Tout massif rocheux, quelle que soit son histoire et sa localisation, possède des discontinuités. Celles-ci peuvent être prononcées, invisibles, cimentées ou bien ouvertes, mais elles existent. Elles possèdent en commun les caractéristiques suivantes : faible résistance au cisaillement, résistance à la traction négligeable et grande conductivité hydraulique, tout ceci en comparaison de la matrice rocheuse environnante. En géologie on les regroupe par catégories :

- Les diaclases : ce sont des fractures de la roche, issues d'une rupture par compression, traction ou cisaillement liées aux mouvements tectoniques. Les deux parties de la roche qui se sont constituées n'ont cependant pas bougé ;

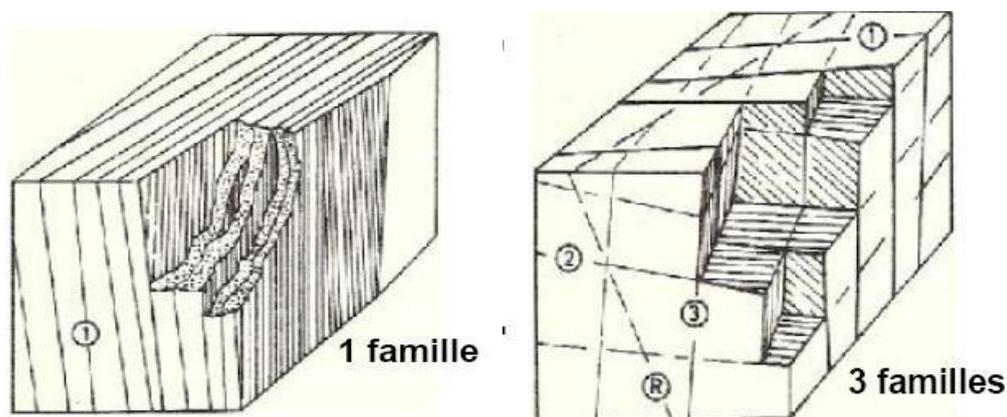
- Les failles : ce sont des fractures identiques aux diaclases mais qui ont entraîné un mouvement relatif des deux parties de la roche encaissante. Leur longueur varie d'une dizaine de centimètres à plusieurs centaines de kilomètres ;
- Les joints sédimentaires : dans les roches sédimentaires, ce sont les joints éparant deux couches d'époques et de conditions de dépôt différentes. Chaque couche (ou strate) constitue une "dalle" susceptible de se séparer de ses voisines ;
- La schistosité : dans les roches métamorphiques, la forte compression perturbe et transforme l'organisation des minéraux internes. Ceux-ci se sont alignés selon une direction orthogonale à la compression et ont entraîné la formation de plans de rupture préférentiels. L'ardoise, qui est fendue selon cette schistosité, en est une bonne illustration.

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. [1]

### I.3 Propriétés géométriques d'une discontinuité

#### I.3.1 Nombre de familles de joints

Les joints sont disposés généralement par familles, par ex des joints parallèles. Le nombre de familles de joints peut aller jusqu'à 5. Typiquement, une famille de joint découpe le massif rocheux en plaques, 2 familles perpendiculaires découpent la roche en colonnes et 3 en blocs (Fig. III.1). Plus de 3 familles découpent la roche en blocs de formes variées et de coins.



**Figure. I.1** Les différentes coupes du massif rocheux en plaque

Les propriétés mécaniques du massif rocheux sont influencées par les familles de joints. Plus le nombre de familles de joints est grand, plus les possibilités de glissements potentiels sur les joints sont grandes voir Tableau I.1.

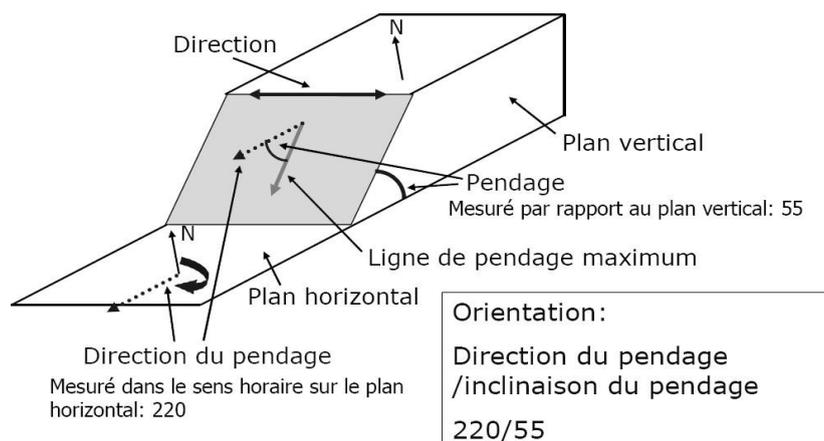
**Tableau I.1** Classification AFTES selon le nombre de familles de discontinuités

CLASSE		DESCRIPTION
N 1		Pas de discontinuité ou quelques discontinuités diffuses
N 2	a	Une famille principale
	b	Une famille principale et des discontinuités diffuses
N 3	a	Deux familles principales
	b	Deux familles principales et des discontinuités diffuses
N 4	a	Trois (et plus) familles principales
	b	Trois (et plus) familles principales et des discontinuités diffuses
N 5		Nombreuses discontinuités sans hiérarchisation ni constance dans la répartition

#### I.4 Orientation du plan des joints

L'orientation des familles de joints contrôle la possibilité de conditions instables ou de déformations excessives. L'orientation mutuelle des joints détermine la forme des blocs rocheux.

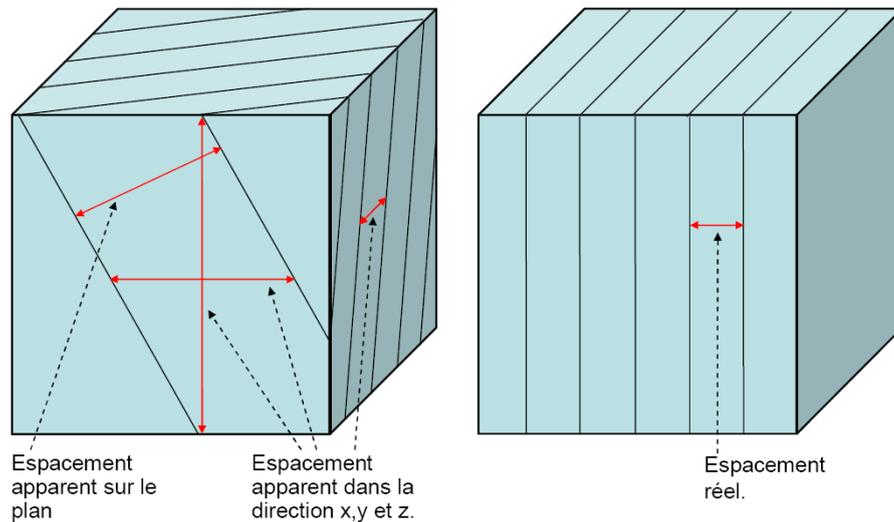
L'orientation est définie par le pendage (inclinaison) et la direction du pendage ou l'orientation du plan (Fig. I.2).



**Figure. I.2** L'orientation du plan des joints

Le pendage et la direction sont toujours perpendiculaires. On utilise généralement la notation direction du pendage/pendage (p. ex., 210/35),

### I.5 Espacement des joints



*Figure. I.3* Espacement des joints

*Tableau I.2* Classification A.F.T.E.S selon l'intervalle entre les discontinuités de chaque famille

ESPACEMENT	EPAISSEUR	(S) OU (E) EN CM	ESPACEMENT DES DISCON- TINUITES D'UNE FAMILLE	EPAISSEUR DES BANCS
S 1	E 1	>200 cm	discontinuités très espacées	bancs très épais
S 2	E 2	60 à 200 cm	discontinuités espacées	bancs épais
S 3	E 3	20 à 60 cm	discontinuités espacées	bancs moyenne- ment épais
S 4	E 4	6 à 20 cm	discontinuités rapprochées	bancs minces
S 5	E 5	<6 cm	discontinuités très rapprochées	bancs très minces

### I.6 Rugosité de la surface du joint

Un joint est une interface de deux surfaces en contact. Les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses ; elles peuvent être en bon contact et imbriquées, ou en mauvais contact et ne pas s'imbriquer. L'interface peut être remplie avec des matériaux intrusifs ou d'altération.

La rugosité de la surface du joint est une mesure des irrégularités et des ondulations de la surface du joint relativement à son plan moyen. La rugosité de la surface du joint est caractérisée par des ondulations à grande échelle et par des irrégularités à petite échelle. C'est le facteur principal qui régit la direction du cisaillement, la résistance au cisaillement, et en conséquence, la stabilité des blocs susceptibles de glisser.

Le coefficient de rugosité du joint (JRC) est une mesure quantitative de la rugosité, variant de 0 pour une surface plane et lisse à 20 pour une surface très rugueuse. La rugosité du joint est liée à une échelle géométrique.

Description of joint types		JRC <sub>20</sub>	JRC <sub>100</sub>
I	rough	20	11
	smooth		
	stepped		
II	rough	14	9
	smooth		
	slickensided		
III	rough	11	8
	smooth		
	slickensided		
IV	rough	14	9
	smooth		
	slickensided		
V	rough	11	8
	smooth		
	slickensided		
VI	rough	7	6
	smooth		
	slickensided		
VII	rough	2.5	2.3
	smooth		
	slickensided		
VIII	rough	1.5	0.9
	smooth		
	slickensided		
IX	rough	0.5	0.4
	smooth		
	slickensided		

**Figure. I.4** Description de la rugosité des joints

Le nombre JRC est obtenu en comparant directement le profil de la surface réelle avec le profil type dans le diagramme. JRC<sub>20</sub> est le profil pour 20 cm et JRC<sub>100</sub> pour 100 cm. La valeur du JRC décroît avec une taille croissante (Fig. I.4).

### I.5 Imbrication des joints

Les propriétés d'un joint sont également contrôlées par le positionnement relatif de deux surfaces, en plus des profils. Par exemple, des joints entièrement en contact et parfaitement imbriqués ont peu de possibilités de mouvement et il est aussi difficile de les cisailier, en comparaison à des joints de même rugosité avec des contacts ponctuels où le mouvement peut facilement avoir lieu. Souvent, les joints sont différenciés comme imbriqués ou pas. Un coefficient d'imbrication des joints (JMC) a été suggéré (Fig. I.5).

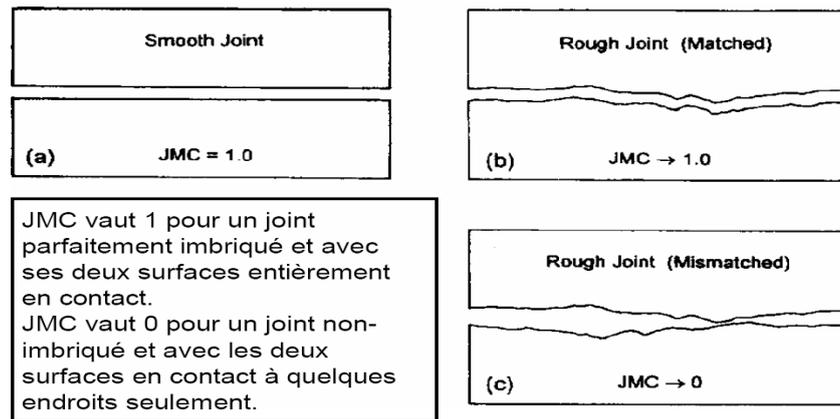


Figure. I.5 Imbrication des joints

### I.6 Ouverture et remplissage du joint

La distance perpendiculaire séparant les parois adjacentes des roches est appelé l'ouverture. L'ouverture du joint est soit remplie d'air et d'eau (joint ouvert), soit avec des matériaux de remplissage (joint rempli) voir Figure .III.5. Les joints ouverts ou remplis avec de grandes ouvertures montrent une faible résistance au cisaillement. L'ouverture est aussi associée à l'écoulement et à la perméabilité.

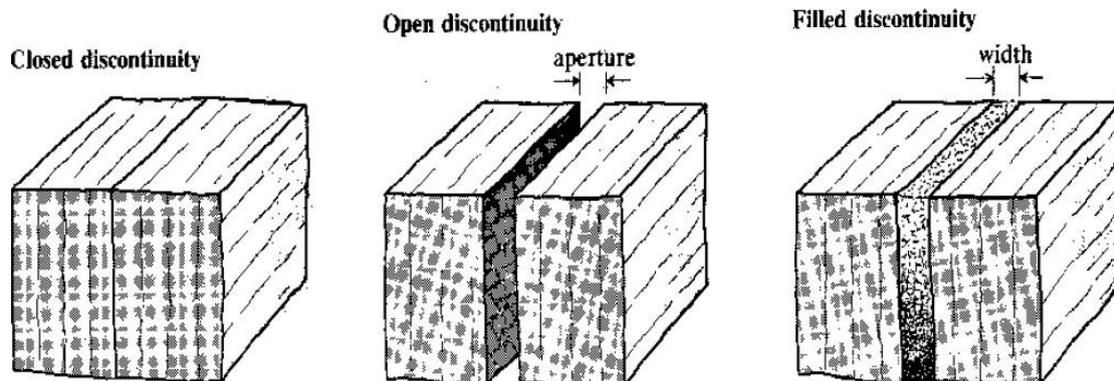


Figure.I.6 Ouverture des joints

### I.7 Les différents systèmes de classification

Des méthodes empiriques, basées sur une classification géotechnique du rocher, ont été mise au point et servent aux recommandations du soutènement : [13]

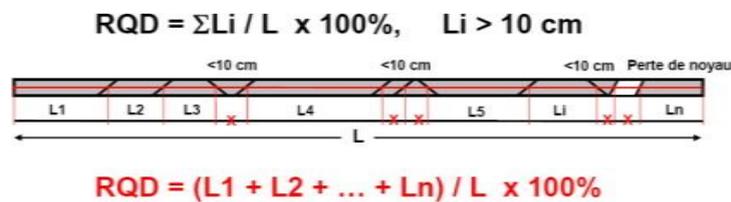
- RQD (Rock Quality Designation) d'après Deer (1967) ;
- RMR (Rock Mass Rating) d'après Bieniawski (1976) ;
- Q-system (Barton, 1974) ;

- GSI (Geological Strength Index) d'après Hoek- Brown (1995);
- SMR (Slop Mass Rating) d'après Romana (1985)

### I.7.1 Système du RQD (Rock Quality Designation)

Le Rock Quality Designation (RQD) a été développé par Deer et al (1967) afin de donner une estimation quantitative de la fracturation influence le comportement de la masse rocheuse à partir de l'examen de carottes obtenues par les forages.

$$RQD(\%) = \frac{\sum \text{longueurs des pièces} > 10\text{cm}}{\text{longueur totale de la course}} \times 100 \quad (\text{I.1})$$



*Figure. I.7 Estimation de la valeur RQD.*

*Tableau I.3 classification du roche en fonction du RQD [3]*

R.Q.D.	Qualité de Roche
R.Q.D. < 25 %	Très mauvaise
25 % < R.Q.D. < 50 %	Mauvaise
50 % < R.Q.D. < 75 %	Moyenne
75 % < R.Q.D. < 90 %	Bonne
90 % < R.Q.D. < 100 %	Très bonne

### I.3.2 Système du NGI (Rock Mass Quality)

Barton et al. (1974) introduit le système Q, un indice permettant de décrire la qualité de la masse rocheuse pour l'excavation de tunnels. Le système de classification se nomme Rock Mass Quality ou Tunnel ling Quality Index ou système Q ou tout simplement système du NGI en hommage de l'Institution Géotechnique Norvégienne. [3]L'indice Q est calculé à partir de six paramètres géotechniques d'après la formule suivante :

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{I.2})$$

Où :

- RQD = le Rock Quality Designation,
- $J_n$  = un nombre caractérisant l'ensemble formé par les familles de joints,
- $J_r$  = caractérise la rugosité des joints,
- $J_a$  = caractérise l'altération des joints,
- $J_w$  = le facteur de réduction hydraulique des joints,
- SRF = le facteur de réduction des contraintes (Stress Reduction Factor).

Le Tunnelling Quality Index Q peut alors être considéré comme une fonction de seulement trois paramètres, qui sont une mesure directe :

1.  $(RQD/J_n)$  = la taille des blocs,
2.  $(J_r/J_a)$  = la résistance au cisaillement inter-blocs,
3.  $(J_w/SRF)$  = des contraintes actives globales et hydrauliques.

Les tableaux suivants montrent les valeurs des paramètres de classification :

**Tableau I.4** Paramètres de la classification du système Q [4]

<b>Nombre de famille de diaclases</b>		<b><math>J_n</math></b>			
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 familles et diaclases aléatoires		6			
Trois familles de diaclases		9			
		1. Pour une intersection, utilisez $3 \times J_n$			
Trois familles et diaclases aléatoires		12			
Quatre familles et plus, diaclases aléatoires très nombreuses		15			
		2. Pour un portail, utilisez $2 \times J_n$			
Roche concassée, semblable à un sol		20			
<b>Rugosité des diaclases</b>					
<i>parois en contact</i>		<b><math>J_r</math></b>			
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 cisailé</i>		<b><math>J_r</math></b>			
Zones avec remplissage de minéraux argileux assez épais pour empêcher le contact des parois		1			
Zones sableuses, de gravier ou concassée assez épaisse pour empêcher le contact des parois		1			
<b>Altération des diaclases</b>					
<i>parois en contact</i>		<b><math>J_a</math></b>			
<i>parois en contact lorsque cisailées</i>		<b><math>J_a</math></b>			
<i>parois séparées lorsque cisailées</i>		<b><math>J_a</math></b>			
Dure, élastique, remplissage imperméable	0,75	Particules sableuses, sans argile	4	Zones de roche concassée	6
Non altérées, salissage de surface seulement	1	Minéraux argileux, sur-consolidés, épaisseur < 5 mm	6	Roche et argile	8-12
Légèrement altérées, minéraux non déformables, particules sableuses etc.	2	Minéraux argileux, moyennement sur-consolidés, épaisseur < 5 mm	8	Zones silteuses, sableuses, avec une faible fraction d'argile	5
Remplissage silteux, sableux, avec une faible fraction d'argile	3	Remplissage argileux gonflant, épaisseur < 5 mm	8-12	Zones ou bandes épaisses d'argile	10-13
Matériaux déformables, i.e kaolinite, mica etc, épaisseur < 1-2 mm	4				

<b>Infiltration d'eau</b>	<b>Jw</b>	<b>Pression d'eau (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>			
Sec ou infiltration mineure < 5 l/m	1	< 1,0			
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 exceptionnellement importante après sautage, réduction dans le temps	0,2-0,1	> 10			
Infiltration exceptionnellement importante	0,1-0,05	> 10			
<b>Facteur de réduction de contrainte</b>					
<b>Zone de faiblesse interceptant l'excavation</b>	<b>SRF</b>	<b>Roc compétant, problèmes de contraintes élevées</b>	<b><math>\alpha/\sigma</math></b>	<b><math>\alpha/\sigma</math></b>	<b>SRF</b>
Occurrences multiples de la zone, remplissage argileux, massif désenchevêtré	10	Faibles contraintes, près de la surface	> 200	> 13	2,5
Zone unique, profondeur de l'exc. < 50 m	5	Contraintes moyennes	10-200	0,66-13	1
Zone unique, profondeur de l'exc. > 50 m	2,5	Contraintes élevées	5-10	0,33-0,66	0,5-2
Zones multiples dans du roc compétant, sans argile	7,5	Coups de terrain faibles	< 2,5	< 0,16	10-20
Zone unique dans du roc compétant, sans argile, profondeur < 50 m	5				
Zone unique dans du roc compétant, sans argile, profondeur > 50 m	2,5				
Diaclases ouvertes, massif très fracturé	5				
<b>Roc comprimé, déformations plastiques, contraintes élevées</b>		<b>Roche gonflante</b>			
Pression de compression relativement faible	5-10	Pression de gonflement faible			5-10
Pression de compression élevée	10-20	Pression de gonflement élevée			10-15

La cote Q permet d'évaluer qualitativement la masse rocheuse selon neuf catégories de qualité pour la construction de tunnels. Le Tableau I.3 présente cette qualification.

**Tableau I.5** Valeur de Q et qualité du massif rocheux [5].

<b>Indice Q</b>	<b>Qualité de la masse rocheuse</b>
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 - 1000	Exceptionnellement bonne

### I.3.3 La classification de Bieniawski RMR (Rock Mass Rating).

Bieniawski entre 1972 et 1973. Il combine les paramètres d'influence géologiques les plus significatifs et les représente avec un seul indice global complet de la masse rocheuse. qualité, qui est utilisé pour la conception et la construction de fouilles dans la roche, telles que tunnels, mines, pentes et fondations. [6]

Cette méthode est basée sur cinq critères principaux :

- Résistance de la roche,- Fracturation : RQD,- Espacement des joints (tous types de discontinuités : diaclases, fractures, schistosité, stratification),
- Nature des joints,
- Venues d'eau,
- Ajustement pour tenir compte de l'orientation de la fracturation,
- Chaque critère reçoit une note,
- La somme de ces notes est la valeur de RMR.

**Tableau I.6** Paramètres de classification des roches et notes de pondération [6].

PARAMETRES			COEFFICIENTS						
1	Résistance de la roche	Indice Franklin	> 8 MPa	4 - 8 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	Indice Franklin non utilisable		
		Résistance à la compression	> 200MPa	100-200MPa	50-100MPa	25-50MPa	10-25 MPa	3-10 MPa	1-3 MPa
	Note	15	12	7	4	2	1	0	
2	R.Q.D.		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Note		20	17	13	8	3		
3	Espacement des joints		> 3 m	1 - 3 m	0,3 - 1 m	50 - 300 mm	< 50 m		
	Note		30	25	20	10	5		
4	Nature des joints		Surfaces très rugueuses non continues Epontes en contact Epontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes non altérées	Surfaces légèrement rugueuses Epaisseur < 1 mm Epontes altérées	Surfaces lustrées ou remplissage < 5 mm ou Joint ouvert 1 à 5 mm Joints continus	Remplissage mou > 5 mm Joints ouverts > 5 mm Joints continus		
	Note		25	20	12	6	0		
5	Venus d'eau	Débit sur 10 m	Aucune venue d'eau		< 25 l/min	25-125 l/min	> 25 l/min		
		Pression d'eau contrainte principale	0		0,0 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		Hydro-géologie	Complètement sec		suintements (eau interstitielle)	pression d'eau modérée	problèmes sérieux de venues d'eau		
	Note		10		7	4	0		

**Tableau I.7** Note d'ajustement pour l'orientation des joints [7].

Direction perpendiculaire à l'axe d'un tunnel				Direction parallèle à l'axe du tunnel		Pendage
Creusement du tunnel dans le sens du pendage		Creusement du tunnel dans le sens inverse du pendage		Pendage	Pendage	
Pendage 45-90°	Pendage 20-45°	Pendage 45-90°	Pendage 20-45°	45 – 90°	20 – 45°	0 – 20°
Très favorable	Favorable	Moyen	défavorable	Très défavorable	Moyen	défavorable

Orientation des joints	Très favorable	Favorable	Moyen	défavorable	Très défavorable
Note d'ajustement	0	-2	-5	-10	-12

Le tableau suivant montre les classes et la qualité du massif selon les notes de RMR

**Tableau I.8** La classe et la qualité du massif selon RMR [8].

RMR	Classe du massif	Qualité de la masse rocheuse
< 20	A	Très pauvre (très médiocre)
21 – 40	B	Pauvre (Mauvaise)
41 – 60	C	Moyenne
61 – 80	D	Bonne
81 – 100	E	Très bonne

### I.3.4 Système du GSI (Geological Strength Index)

Introduit par Hoek - Brown en 1995, le GSI est un nombre sans dimension, déterminé empiriquement, il varie entre 5 et 85, et qui peut être estimé à partir d'un examen de la qualité de la masse rocheuse in situ. La méthode GSI s'appuie donc sur une observation directe de la structure du massif rocheux. [15]

Ayant calculé le RMR de base et  $Q''$  le GSI peut être déterminé par les corrélations suivantes :

$$\text{GSI} = \text{RMR de base} - 5 \text{ si RMR de base} > 23 \quad (\text{I.3})$$

$$\text{GSI} = 9 (\text{Log } Q'' + 44) \text{ si RMR de base} < 23 \quad (\text{I.4})$$

**Tableau I.9** Qualité du massif selon la valeur du GSI [9].

Valeur du GSI	Qualité du massif
< 20	Très Mauvaise
21 – 40	Mauvaise
41 – 55	Moyenne
56 – 75	Bonne
76 – 95	Très bonne

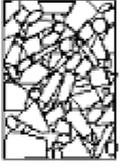
<p><b>CARACTERISTIQUES DE LA MASSE ROCHEUSE POUR L'ESTIMATION DE LA RESISTANCE</b></p> <p>A partir de l'apparence de la roche, choisir la catégorie qui donne, selon vous, la meilleure description des conditions moyennes de structure in situ. [...] Le critère de Hoek-Brown devrait uniquement être appliqué à des masses rocheuses dont la taille des blocs individuels est petite devant celle de l'excavation.</p>		<p><b>CONDITIONS DE SURFACE</b></p> <p>TRES BONNES Surfaces fraîches, non-altérées, très rugueuses</p> <p>BONNES Surfaces couleur de fer, rugueuses et légèrement altérées</p> <p>MOYENNES Surfaces lisses, altérées ou moyennement altérées</p> <p>PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérées avec enduit ou remplissage compact de fragments anguleux</p> <p>TRES PAUVRES Surfaces aux contours lisses, fortement altérés avec enduit ou remplissage d'argile plastique</p>				
<p><b>STRUCTURE</b></p>	<p><b>QUALITÉ DÉCROISSANTE</b></p>					
<p><b>AGENCEMENT DES BLOCS ROCHEUX DE CROISSANT</b></p>		80	70	60	50	40
	<p><b>FRACTURÉE</b> – masse rocheuse non perturbée, très bien assemblée, constituée de blocs cubiques formés par trois familles de discontinuités orthogonales</p>	<p>70</p> <p>60</p> <p>50</p> <p>40</p> <p>30</p> <p>20</p> <p>10</p>				
	<p><b>TRÈS FRACTURÉE</b> – masse rocheuse partiellement perturbée, bien assemblée, constituée de blocs anguleux à plusieurs facettes formés par au moins quatre familles de discontinuités orthogonales</p>					
	<p><b>FRACTURÉE/DESTRUCTURÉE</b> – blocs anguleux formés par plusieurs familles de discontinuités entrecoupées, avec plures et/ou failles</p>					
	<p><b>DÉSINTÉGRÉE</b> – masse rocheuse fortement broyée, mal assemblée, avec un mélange de blocs rocheux anguleux et arrondis</p>					

Figure I.8 Classification GSI modifiée, d'après Sonmez et Ulusay (1999).

---

### I.3.5 Classifications de l'AFTES

L'Association Française des Travaux en Souterrain (AFTES) a été créée en janvier 1972 pour répondre aux recommandations de la Conférence Internationale sur les travaux souterrains tenue à Washington en 1970 qui préconisaient la mise en place dans chaque pays d'un organisme regroupant les différents acteurs intervenant, à des titres divers, dans les travaux souterrains.

La principale activité de l'AFTES consiste à diffuser des recommandations techniques dans le domaine des travaux souterrains. Ces recommandations sont préparées au sein de Groupes de Travail qui ont permis de constituer une classification, dite de l'AFTES. Les paramètres à la description du massif :

- 1) Les conditions géologiques générales.
- 2) Les conditions hydrogéologiques.
- 3) Les discontinuités du massif rocheux.
- 4) Les caractéristiques mécaniques du terrain.
- 5) Les contraintes naturelles et la hauteur de couverture de l'ouvrage.
- 6) La déformabilité du massif.

En plus de ces critères relatifs au massif rocheux, l'AFTES prend en considération.

#### ➤ Des critères relatifs à l'ouvrage et à son mode d'exécution

Les dimensions et la forme de la cavité.

Le procédé d'excavation, qui peut être soit à l'explosif en utilisant ou non la technique du prédécoupage, soit purement mécanique.

#### ➤ Des critères relatifs à l'environnement

La sensibilité de l'environnement aux tassements.

Les effets d'une modification de l'équilibre hydrologique.

#### I.3.5.1 Recommandation de L'AFTES

Les groupe de travail n° 1 de l'AFTES (géologie-géotechnique) a établi en 1987 un texte pour chaque critère de classification et pour tous les types de soutènement un tableau indique en fonction de la valeur du paramètre qui caractérise le critère en question, mal adapté ou en principe impossible.

Utilisation de la classification AFTES pour le choix d'un soutènement Différents tableaux correspondants aux différents critères importants, et précisant si tel type de soutènement est plus ou moins bien adapté vis-à-vis de ce critère. [12].

- Soit particulièrement recommandé (nettement favorable)
- Soit possible à condition que d'autres critères soient particulièrement favorables (plutôt favorable)
- Soit très mal adapté bien qu'éventuellement possible (plutôt défavorable)
- Soit en principe impossible (nettement défavorable).

Exemple n° 1 Tunnel ø 12 m dans les schistes fracturés sous forte ouverture ( $\sigma_v/\sigma_0 < 2$ ) hors d'eau		Pas de soutènement	Béton projeté	Boulons			Cintres		Voussoirs		Tubes préforés	Bouclier ou pousse tube	Procédés spéciaux		
				à ancrage ponctuel	à ancrage réparti	barres foncées	lourds	légers coulissants	plaques métal assemblées	béton			injection	air comprimé	congélation
Critères	Classes														
1 Comportement mécanique	R3a		●	●	●	⊗		●	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	
2 Discontinuités	N3   S4	⊗	●	Gr ou Bp	Gr ou Bp	⊗	●	●				⊗		⊗	⊗
3 Altérabilité	Délitage	⊗	●	Gr ou Bp	Gr ou Bp	Gr ou Bp	●	●							
4 Hydrologie	Hors d'eau														
5 Couverture	CN3	⊗	⊗	●	●	⊗	⊗					⊗			
6 Dimensions	D > 10		●	●	●		⊗	Bo ou Rev				⊗			
<b>Synthèse</b>		⊗	⊗	●	●	⊗	⊗	Bo ou Rev	⊗	⊗	⊗	⊗		⊗	⊗

Figure I.9 Déficients critères de classification selon AFTES

### I.4 Conclusion

La caractérisation des massifs rocheux est un domaine en constante évolution. Les nouvelles méthodes d'investigation contribuent à améliorer la précision et la fiabilité des caractérisations, permettant ainsi une meilleure compréhension des massifs rocheux et une optimisation des projets liés à la construction et à garantir la durabilité des ouvrages dans des environnements géotechnique complexes.

En somme, la caractérisation des massifs rocheux joue un rôle crucial dans la planification et la réalisation de projets d'ingénierie géotechnique. Elle fournit des informations clés pour prendre des décisions éclairées, améliorer la stabilité des ouvrages et assurer la sécurité des structures construites dans des environnements rocheux.

### Référence bibliographique du premier chapitre

[1]. Martin, François, [2012], « Mécanique des roches et travaux souterrains », Cachan, huitième édition.

[2]. Porokhovoï, Evgueni, [1995], « Stabilité à long terme des talus de mines à ciel ouvert dans les massifs de roches basiques et ultrabasiques », Thèse doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées.

[3]. Deere, D. U., (1988), « The Rock Quality Designation (RQD) index in practice », In Rock classification systems for engineering purposes, édition Kirkaldie L., Philadelphia pp 91-101.

[4]. Barton N et al., (1974), « Engineering classification of Rock Masses for the Design, support ». Rock Mechanics, Vol 6, p.189-206.

[5]. Barton N. R. et Choubey V., (1977), « The shear strength of rock joints in theory and practice », édition RockMech, pp. 50-54.

[6]. Barton N. R. et Choubey V., (1977), « The shear strength of rock joints in theory and practice », édition Rock Mech, pp. 50-54.

[7]. Barton, N., R. Lien, et al., (1974), « Engineering classification of rock masses for the design of rock support ». Rock Mechanics 6, p.189-236.

[8]. Bieniawski, Z. T., (1973), « Engineering classification of jointed rock masses », Trans. S.Afr. Instn. Civil Engrs. 15(12): 335-344.

[9]. Françoise H et Pierre D., (2000), « Manuel de mécanique des roches. Tome 1 », Les presses de l'école des Mines, Paris. 88 p

[10]. [https://www.google.com/search?q=RQD&client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdfnm\\_rGtL0evGg\\_olEyKX9k0L81Q:1680988816227&source=lnms&tbn=i sch&sa=X&ved=2ahUKEwimw4yqm5vAhXDhP0HHewxBhkQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1440&bih=775&dpr=1#imgrc=3uuJsm5oJbodiM](https://www.google.com/search?q=RQD&client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdfnm_rGtL0evGg_olEyKX9k0L81Q:1680988816227&source=lnms&tbn=i sch&sa=X&ved=2ahUKEwimw4yqm5vAhXDhP0HHewxBhkQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1440&bih=775&dpr=1#imgrc=3uuJsm5oJbodiM)

[11] [https://pastel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/46627/filename/AnnexeD-methodes\\_de\\_classification.pdf](https://pastel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/46627/filename/AnnexeD-methodes_de_classification.pdf)

[12]. [https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/9404/mod\\_resource/content/2/ENPC\\_COTUN\\_M\\_ca\\_roche\\_partiel\\_4\\_2017\\_10\\_19.pdf](https://educnet.enpc.fr/pluginfile.php/9404/mod_resource/content/2/ENPC_COTUN_M_ca_roche_partiel_4_2017_10_19.pdf)

[13]. [https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20\(RQD\)%20in%20Practice.pdf](https://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge341/The%20Rock%20Quality%20Designation%20(RQD)%20in%20Practice.pdf)

**Chapitre II**  
**Instabilité des massifs**  
**rocheux**

## II.1. Introduction

L'instabilité des massifs rocheux est un phénomène géologique qui se produit lorsque les roches constituant un ensemble géologique donné perdent leur capacité à maintenir leur position et se déplacent de manière incontrôlée. Ce phénomène peut entraîner des conséquences désastreuses, telles que des glissements de terrain, des effondrements de falaises, des chutes de blocs rocheux ou des éboulements. Comprendre les causes de l'instabilité des massifs rocheux et être en mesure de l'évaluer est essentiel pour la gestion des risques naturels et la sécurité des populations vivant dans des zones exposées à de tels phénomènes. Plusieurs facteurs peuvent contribuer à l'instabilité des massifs rocheux. Parmi les causes les plus courantes, on trouve les processus géologiques tels que l'érosion, les cycles de gel-dégel, les variations de la pression hydrostatique ou la présence d'eau infiltrée. Les contraintes tectoniques, les mouvements sismiques, les variations de la charge ou les modifications de l'environnement naturel peuvent également jouer un rôle important dans l'instabilité des massifs rocheux.

## II.2. Phénomène d'instabilité des massifs rocheux

Il existe différents types de mouvements rocheux. Ils sont généralement classés en fonction des volumes en jeu au cours de leur propagation. Ainsi, un bloc rocheux correspond à un volume variant entre le décimètre cube et la centaine de mètre cube. Une classification des glissements de terrains rocheux est donnée dans le Tableau II.1 . [4]

**Tableau II.1** Classement des éboulements en fonction de leur volume. [1]

Phénomène d'instabilité	Volume en m <sup>3</sup>
Chute de pierres	$\leq 10^{-3}$
Chute de blocs rocheux	$10^{-3} - 10^2$
Eboulements	$10^2 - 10^5$
Eboulements majeurs	$10^5 - 10^7$
Eboulements catastrophiques	$\geq 10^7$

### II.3 Mécanismes de fragilisation des matériaux en place

Les instabilités sont dues à une fragilisation d'ensemble avant mobilisation. La phase de mobilisation se caractérise par la constitution d'un gisement de matériaux soumis à la dégradation sur place des roches. Elle commence par leur désagrégation (processus mécaniques) et/ou leur altération (processus chimiques).

La désagrégation provient de l'augmentation et de la multiplication des fissures existant dans la roche initiale (diaclasses). Toutes les masses rocheuses sont en effet prédécoupées par des systèmes de discontinuités, qui résultent de leur genèse, des phases tectoniques ultérieures et du façonnement des reliefs durant les ères géologiques.

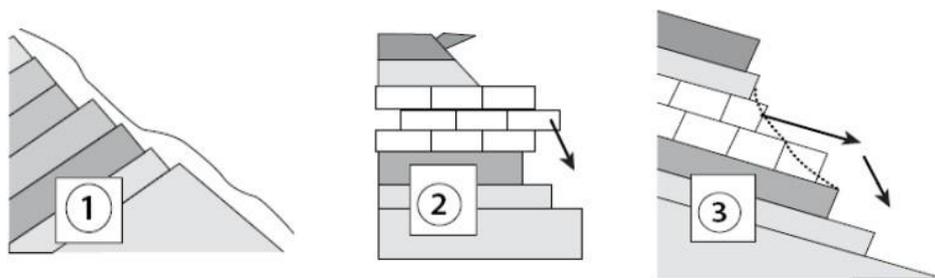
► Les masses rocheuses d'origine sédimentaire sont caractérisées par la présence de joints stratigraphiques de grande extension et de réseaux de diaclases perpendiculaires.

► Les masses rocheuses d'origine magmatique sont généralement prédécoupées par 3 familles directionnelles de discontinuités.

► Les masses rocheuses d'origine métamorphique sont affectées de systèmes de discontinuités plus complexes, hiérarchisés en fonction de phases tectoniques multiples. Une direction d'anisotropie majeure (schistosité, foliation) y est généralement présente.

Selon les versants, le façonnement du relief conduit à une décompression (par appel au vide) de ces masses rocheuses et à l'ouverture de leurs discontinuités. L'inclinaison des couches (le pendage) influence alors sur le détachement des blocs.

La désagrégation va favoriser l'altération par l'augmentation de la surface de contact entre la roche et les agents d'altération (surtout l'eau). Cette altération est en fait la solubilisation de certains sels et l'effondrement des structures cristallines. Ces déséquilibres vont donc favoriser l'écartement des diaclases et la création d'un nouveau réseau de fissuration (néo diaclases) indépendant du réseau initial et parallèle au versant.[7]



1 -Pendage favorable  
– pas de risque d'éboulement

2 -Pendage horizontal  
– risque d'écroulement

3- Pendage défavorable  
– risque d'écroulement

**Figure. II. 1** Influence du pendage sur le glissement

## II.4 Classification des instabilités

### II.4.1 Les chutes de blocs

Les chutes de blocs proviennent de la dégradation d'une falaise ou d'un versant rocheux. Selon le volume qui se détache, on leur donne un nom différent :

- Chutes de pierres
- Chutes de bloc
- Écroulement
- Écroulements majeurs
- Écroulements catastrophiques [2]



*Figure. II.2* Chute de blocs. [12]

### II.4.2 Les ruptures des massifs rocheux

Différents types de rupture peuvent se produire en fonction des conditions et de la configuration des fractures : glissement plan, rupture de surplomb, basculement, etc.

Après la rupture, le bloc va tomber et rouler et rebondir, couler le long du terrain. La trajectoire peut être complexe, elle diffère selon les qualités de sols rencontrées (rebonds différents) et des matériaux de glissement, de la présence d'obstacles, de la topographie, des interactions possibles avec d'autres blocs en mouvement, etc. [16]

La position d'arrêt du bloc ou de l'éboulis et la zone de propagation, restent relativement difficiles à évaluer avec précision. Les différents mouvements de terrains peuvent se classer en :

- ▶ instabilités locales de blocs indéformables, entraînés dans le sens de la plus grande pente sous l'effet de leur poids

► glissements de grands volumes sur un plan de glissement de moindre résistance dans les roches avec des familles de fissuration favorables au glissement sous l'effet de la pesanteur.

► glissements d'ensemble comme pour les sols, quand les roches sont broyées, altérées ou fortement tectonisées in situ, le long d'une surface de glissement quelconque (plane, circulaire, etc.)

Devant la diversité et la complexité du phénomène de rupture potentielle, une description détaillée et une caractérisation du massif en place est nécessaire. Il s'agit d'un travail de géologie appliquée dans lequel divers aspects du massif sont à définir, comme :

- La pente naturelle.
- La hauteur.
- La succession des couches.
- L'état de décomposition de la matrice et des discontinuités.
- Le nombre et la nature des familles de fissuration.
- La nature et l'orientation des discontinuités.
- La présence d'eau et la sensibilité à l'eau.
- La nappe.
- Les écoulements superficiel et en profondeur

#### II.4.3 Les très grands écroulements

En géologie, un écroulement, éboulement ou effondrement est une désolidarisation soudaine d'une structure géologique sur une vaste surface et qui s'accompagne d'une chute massive de matériaux. Un effondrement souterrain massif est l'une des causes possibles de grands tsunamis. Les effondrements sont notamment étudiés par l'analyse de la stabilité des pentes.[6]



**Figure. II.3** grands écroulements [13]

#### II.4.4 Les coulées boueuses

Une coulée de boue est une coulée très rapide de débris partiellement ou complètement fluidisés par l'ajout de quantités importantes d'eau à la matière source. L'écoulement est dû à une instabilité gravitaire. [14]



*Figure. II.4* coulées boueuses [15]

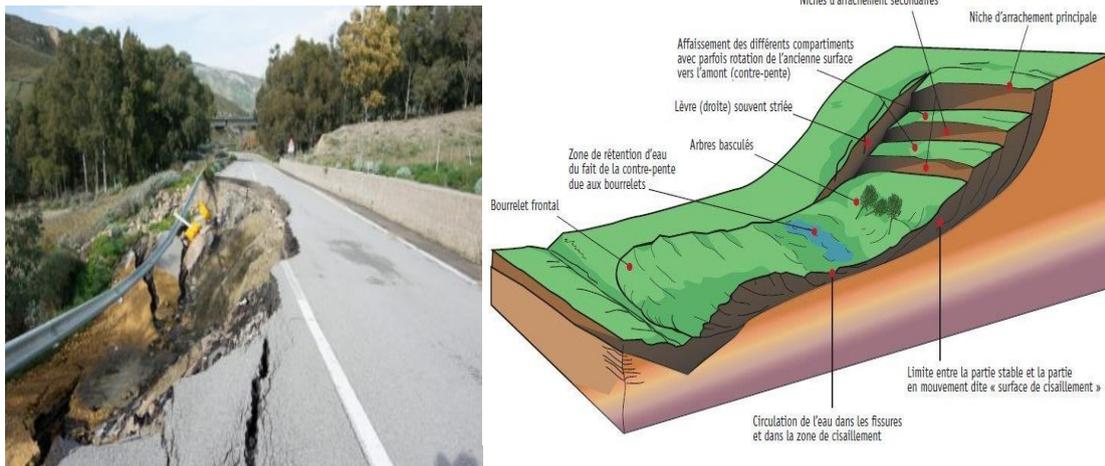
#### Les types des instabilités des talus rocheux

Les instabilités des talus rocheux sont des manifestations du déplacement gravitaire de masses de terrain déstabilisées sous l'effet de sollicitations naturelles ou anthropiques (terrassement, vibration, déboisement, exploitation de matériaux ou de nappes aquifères, etc.). Ils recouvrent des formes très diverses qui résultent de la multiplicité des mécanismes initiateurs (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique), eux-mêmes liés à la complexité des comportements géotechniques des matériaux sollicités et des conditions de gisement (structure géologique, géométrie des réseaux de fractures, caractéristiques des nappes aquifères, etc.) (Institut des Risques Majeurs, 2008). Les mouvements de terrains les plus fréquents dans la nature sont :

#### II.5.1 Les glissements de terrain

Un glissement de terrain ou éboulement est le mouvement de masse de roches, de débris, de terre ou de boue sur une pente. Si la plupart des glissements de terrain sont dus à la gravité, ils peuvent également être provoqués par les précipitations, les tremblements de terre, les éruptions volcaniques, la pression des eaux souterraines, l'érosion, la déstabilisation des pentes résultant de la déforestation, de la culture et de la construction, et la fonte des neiges

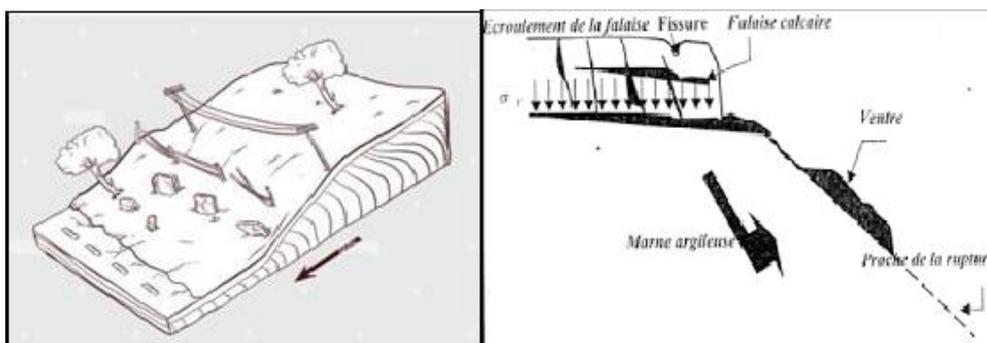
ou des glaciers. Les coulées de débris, ou coulées de boue, sont des glissements de terrain qui se déplacent rapidement et sont particulièrement dangereux en raison de leur vitesse et de leur volume. Certaines coulées de débris ont été enregistrées comme atteignant des vitesses de plus de 160 kilomètres par heure. [10]



**Figure. II.5** glissements de terrain [9]

### II.5.2 Le Fluage

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



**Figure. II.6** Fluage

### II.5.3 La solifluxion

Les phénomènes de solifluxion représentent un cas particulier de fluage. C'est un phénomène superficiel provoqué par la variation volumique du sol au cours des saisons : gel et dégel en montagne, alternance de saisons sèches et pluvieuses.



*Figure. II.7* Solifluxion

## II.6 Les causes d'instabilités des talus rocheux

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

### II.6 .1 Les facteurs conditionnant

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

#### II.6.1.1 La lithologie

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

#### II.6.1.2 La pente

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

### **II.6.1.3 Le relief**

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

### **II.6.1.4 La proximité du réseau de drainage**

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

### **II.6.1.5 L'activité tectonique récente à actuelle**

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

## **II.6.2 Les facteurs déclenchants**

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

### **II.6.2.1 Les précipitations**

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

### **II.6.2.2 La sismicité**

Elle ne peut déclencher un mouvement de masse qu'à partir d'une magnitude critique d'activation de l'ordre de  $M = 4$

### **II.6.2.3 Les cours d'eaux et les résurgences**

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

#### II.6.2.4 Le couvert végétal

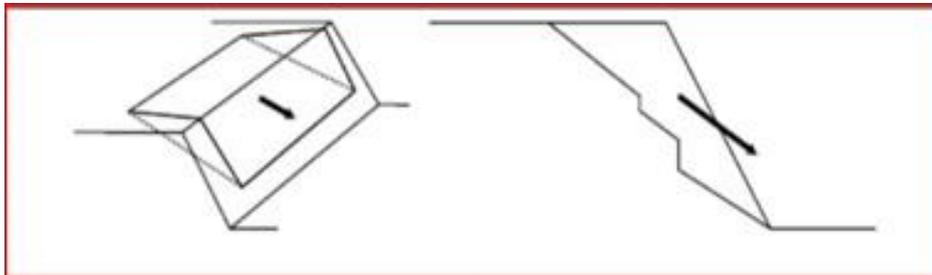
Il exerce essentiellement une action phyto stabilisante sur les versants à substrat argileux ou à rocheux développant une couverture d'altération argileuse peu épaisse. Son absence ou sa rareté sur des versants accélère l'effet érosif du ruissellement et des précipitations ; ce qui déclenche les mouvements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

### II.7 Les différents mécanismes de rupture

Les chutes de masses rocheuses sont des mouvements rapides, discontinus et brutaux. Les mécanismes d'instabilité seront différents suivant la configuration des versants rocheux qui vont présenter différents types de rupture possibles. a proposé de répertorier les principales configurations potentiellement instables. On distingue : [8]

#### II.7.1 Le Glissement plan

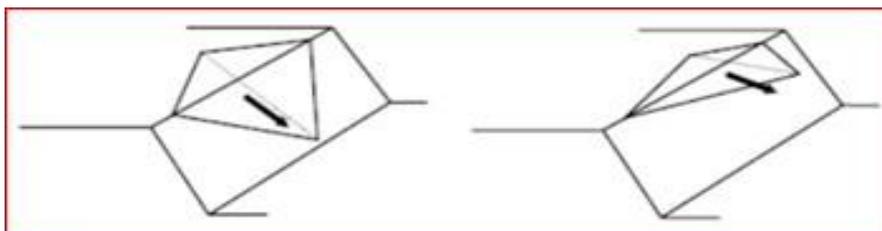
Il se produit suivant un plan au niveau d'une surface de discontinuité géologique (zone entre deux matériaux de nature différente, failles, joints de stratification,....etc). La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques mécaniques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon » [3]



*Figure. II.8* Glissement plan

#### II.7.2 Le glissement dièdre

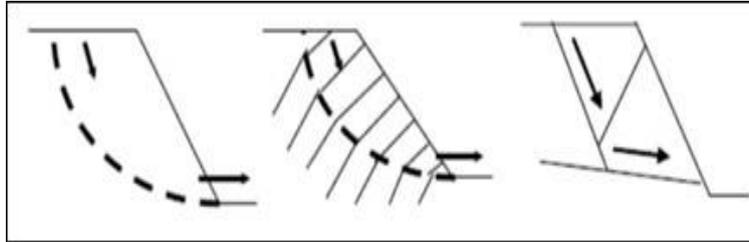
Le long de la ligne d'intersection de deux plans, qui est un mécanisme fréquent dans tous les types de roches.



*Figure. II.9* Glissement dièdre

### II.7.3 Le glissement rotationnel

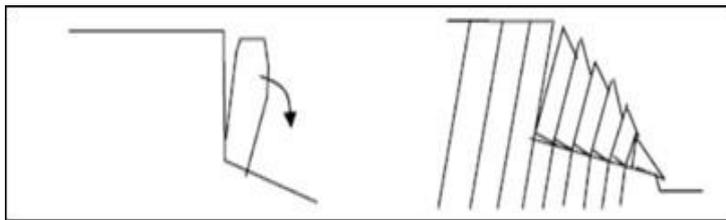
Le glissement rotationnel est caractérisé par une surface de rupture de forme circulaire qui peut se propager à quelques mètres de profondeur. Il est très souvent causé par l'érosion naturelle d'un cours d'eau à la base d'un talus. [15]



*Figure. II.10* Glissement rotationnel

### II.7.4 La rupture de colonne

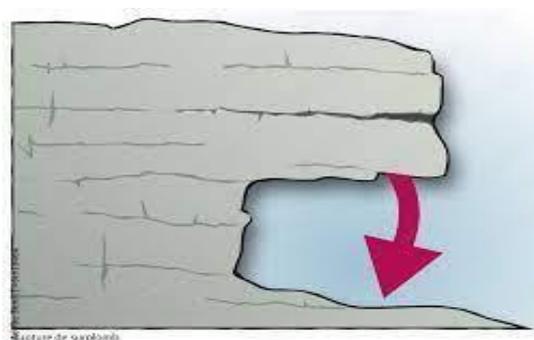
Par basculement ou par rupture en pied, qui se produisent lorsque des discontinuités verticales découpent le massif et isolent des colonnes de roche.



*Figure. II.11* Rupture de colonne

### II.7.5 Rupture de surplomb

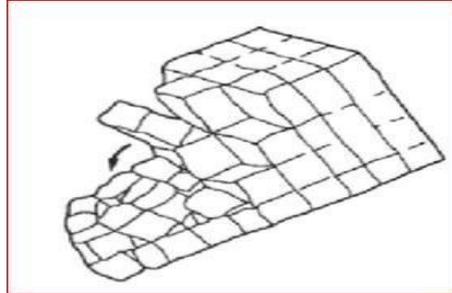
Le massif rocheux devient instable lorsque les efforts de traction, de flexion et de cisaillement ne peuvent plus être compensés par la résistance du matériau.



*Figure .II.12* Rupture de surplomb

### II.7.6 La rupture en basculement

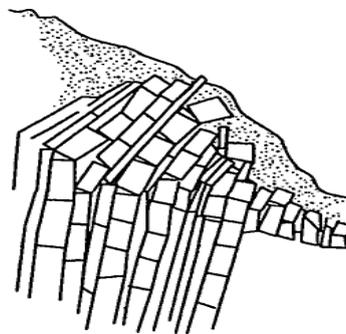
Elle se produit dans un massif présentant deux familles de discontinuités ayant la même orientation que celle du talus, et dont l'une d'elles a un pendage inférieur et de même sens que celui du talus, et l'autre famille possède un pendage opposé à celui du talus. Dans ce cas les familles subdivisent le massif en des blocs qui seront susceptibles de basculer. [12]



*Figure. II.13* Rupture en basculement de blocs

### II.7.7 Fauchage

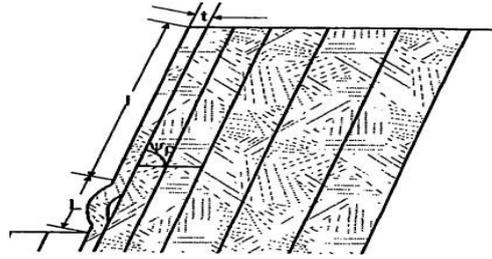
La plupart des auteurs assimilent le fauchage au basculement, mais, il se diffère par le basculement, en direction de la vallée, d'un ensemble d'écaillés séparées par des discontinuités à fort pendage, s'amortissent avec la profondeur. [5]



*Figure .II.14* Fauchage

### II.7.8 Flambement

Ce phénomène est trop souvent confondu avec le basculement. Le flambement est un phénomène purement gravitaire, la rupture étant provoquée généralement en pied de colonne par le seul effet du poids de l'écaillé rocheuse. [5]



**Figure II.15** Flambement

## II.8 Conclusion

L'instabilité des massifs rocheux est un problème géologique majeur qui peut entraîner des conséquences dommageables pour les populations et les infrastructures. Comprendre les causes de l'instabilité et être en mesure de l'évaluer de manière adéquate est essentiel pour la gestion des risques naturels et la sécurité des personnes vivant dans des zones exposées. L'instabilité des massifs rocheux peut être causée par divers facteurs tels que l'érosion, les processus géologiques, les contraintes tectoniques ou les changements environnementaux. La mise en place de méthodes d'analyse et de modélisation appropriées permet de caractériser les roches, d'identifier les zones de faiblesse et de prédire les mouvements potentiels. Cela permet ensuite de mettre en œuvre des mesures de prévention ou de stabilisation adaptées, telles que la construction de structures de soutènement ou la surveillance continue des mouvements.

## II.8 Référence bibliographique du deuxième chapitre

[1].Derradji A et Sahli M., (2012), « Elément de stabilité des pentes au rocher » , Ecole Hassania des travaux publics, Maroc. 162p.

[2]. Duncan C.W, Christopher W. Mah., (2004), « Rock Slope Engineering ». Taylor & Francis, Canada.

[3] .Hamidi M. (1994).Etude géotechnique de la stabilité des talus dans le quartier de Zerga de la mine d'Ouenza. Mémoires de Magistère. ENP. Alger. 162 p.

[4].Livre Sahli.M&Derradji.AAwww.adm.co.ma .Octobre (2012 ).

[5].Nedellec J L., et Cruchet M., (2003), «Typologie des éboulements rocheux et des modes de rupture associés», Projet de recherche BRGM RP 52909-FR. 44p

[6]. Stephen G. Evans et John J. Clague, « Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments », dans *Geomorphology and Natural Hazards*, Elsevier, 1<sup>er</sup> janvier 1994 (ISBN 978-0-444-82012-9, lire en ligne [archive]), p. 107–128

[7]. [https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdc1rrH14xF5TK\\_bDHRPG1xnte2mrg:1683317176183&q=Ph%C3%A9nom%C3%A9ne+d%27instabilit%C3%A9+des+massifs+rocheux&spell=1&sa=X&ved=2ahUK Ewi7kdKS\\_d7-AhVhhv0HHV7DC5cQBSgAegQIBxAB&biw=1440&bih=775&dpr=1](https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdc1rrH14xF5TK_bDHRPG1xnte2mrg:1683317176183&q=Ph%C3%A9nom%C3%A9ne+d%27instabilit%C3%A9+des+massifs+rocheux&spell=1&sa=X&ved=2ahUK Ewi7kdKS_d7-AhVhhv0HHV7DC5cQBSgAegQIBxAB&biw=1440&bih=775&dpr=1)

[8]. [https://elearn.univtlemcen.dz/pluginfile.php/107613/mod\\_resource/content/1/Chapitre%203.pdf](https://elearn.univtlemcen.dz/pluginfile.php/107613/mod_resource/content/1/Chapitre%203.pdf).

[9]. <https://www.ifrc.org/fr/notre-travail/catastrophes-climat-et-crisis/quest-ce-quune-catastrophe/les-glissements-terrain>

[10]. <https://www.google.com/search?q=sch%C3%A9ma+coul%C3%A9e+boueuse&tbm=isch&hl>.

[11]. [https://www.persee.fr/doc/edyte\\_1762-4304\\_2003\\_num\\_1\\_1\\_873](https://www.persee.fr/doc/edyte_1762-4304_2003_num_1_1_873).

[12]. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00574092/document>.

[13]. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Chute+de+blocs#imgcr=brbkLVOY2gUCBM>.

[14]. Article [https://fr.wikipedia.org/wiki/Coul%C3%A9e\\_de\\_boue](https://fr.wikipedia.org/wiki/Coul%C3%A9e_de_boue).

[15]. [http://www.irma-grenoble.com/photos/diaporama\\_phototheque.php?id\\_photos=2342&theme=9#image-10](http://www.irma-grenoble.com/photos/diaporama_phototheque.php?id_photos=2342&theme=9#image-10).

[16]. [https://www.google.com/search?q=LeS+glissementS+rotationnelES&client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdf2KmecV5Z3XvLmCELrgWuj2WYS2A%3A1684775880082&ei=yKNrZKvJBOL\\_7\\_UPmfeWuAw&ved=0ahUKEwirze6et4n\\_AhXi\\_7sIHZm7BccQ4dUDCA4&uact=5&oq=LeS+glissementS+rotationnelES&gs\\_lcp=Cgxn3Mtd2l6LXNlcnAQAzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQR0oECEYAFCHCli-oQFgg8MBaABwAngAgAEAiAEAkGEmAEAoAEByAEIwAEB&sclient=gws-wiz-serp](https://www.google.com/search?q=LeS+glissementS+rotationnelES&client=firefox-b-d&sxsrf=APwXEdf2KmecV5Z3XvLmCELrgWuj2WYS2A%3A1684775880082&ei=yKNrZKvJBOL_7_UPmfeWuAw&ved=0ahUKEwirze6et4n_AhXi_7sIHZm7BccQ4dUDCA4&uact=5&oq=LeS+glissementS+rotationnelES&gs_lcp=Cgxn3Mtd2l6LXNlcnAQAzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQRzIECAAQR0oECEYAFCHCli-oQFgg8MBaABwAngAgAEAiAEAkGEmAEAoAEByAEIwAEB&sclient=gws-wiz-serp).

**Chapitre III**  
**Méthodes de**  
**confortement des**  
**massif rocheux**

### III. 1 Introduction

Le confortement des massifs rocheux fait référence à l'ensemble des techniques et des méthodes utilisées pour renforcer et stabiliser les formations rocheuses afin de prévenir les chutes de blocs, les glissements de terrain ou d'autres phénomènes géologiques dangereux. Ces mesures de confortement sont souvent mises en œuvre dans le cadre de projets de génie civil tels que la construction de routes, de voies ferrées, de tunnels ou d'ouvrages de protection contre les risques naturels.

Il existe plusieurs techniques de confortement des massifs rocheux, adaptées en fonction des caractéristiques géologiques et des contraintes spécifiques de chaque situation. Les techniques couramment utilisées sont : l'ancrage ; le boulonnage ; les filets et grillages ; les barrières dynamiques ; les enrochements.

### III. 2 Techniques de stabilisation contre les instabilités rocheuses

Ces techniques se divisent en deux familles :

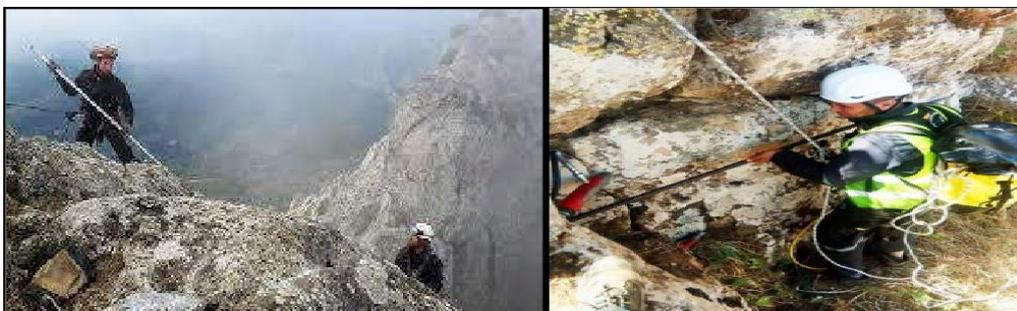
**Parades actives** : consistent à éviter que le phénomène se manifeste en supprimant les masses rocheuses, en les fixant ou en évitant leur altération.

**Parades passives** : consistent à diminuer les conséquences du phénomène une fois qu'il s'est déclenché.

#### III.2.1 Parades actives

##### III.2.1.1 La purge

La purge consiste à éliminer les pierres, blocs et masses les plus instables. C'est une technique efficace à court terme seulement qui doit être renouvelée périodiquement.



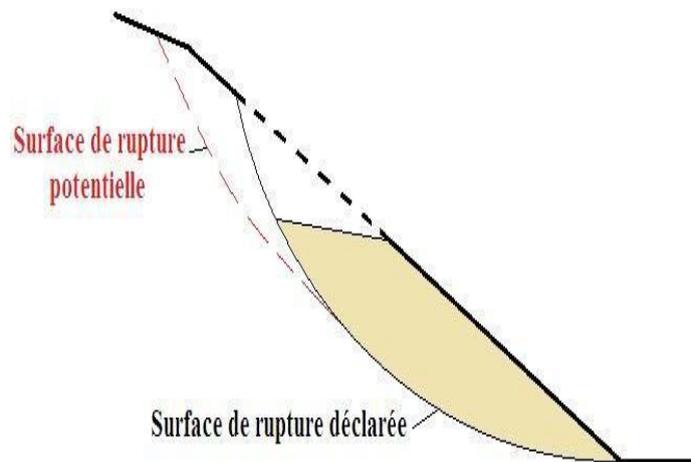
*Figure.III.1* Purge par canne.

*Figure. III.2* Purge par vérin plat.

### III.2.1.2 Le reprofilage

Le reprofilage est le fait de mettre en œuvre une solution technique en vue de changer le profil d'une zone donnée. Différentes raisons peuvent amener à ce besoin : [1]

- Elargissement de voirie : obligation de reprofilage par terrassement (pelle mécanique) ou minage
- Présence en falaise de masses rocheuses proéminentes pouvant générer du risque : reprofilage nécessaire par principe de sécurité par purges manuelles mécanisées, mécanique ou à l'explosif
- Présence de cavités en pied de falaise générant surplombs et appel au vide : confortements rendus difficiles en conception par des zones surplombantes à traverser, orientation des clous difficiles sur profil actuel...Terrassements par découpage mécanique (pelle mécanique) ou à l'explosif
- Présence d'épaisseur de matériaux (meubles ou rocheux) instables devant être retirés d'une zone avant confortement. [14].



**Figure. III.3** Reprofilage mécanique [1]

### III.2.1.3 Béton projeté

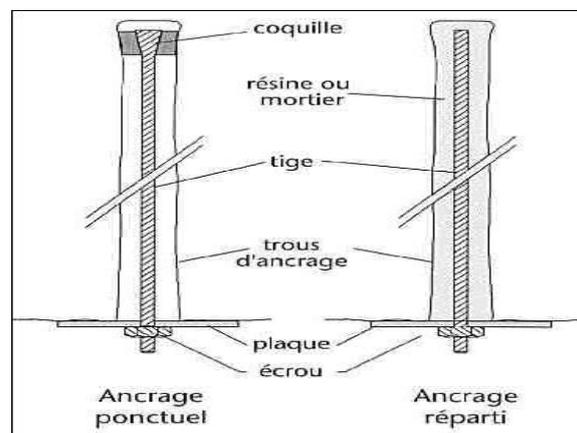
Ce dispositif consiste à projeter à la surface d'une paroi rocheuse, protégés ou non par un grillage ou un treillis soudé, une coque de béton. Le béton projeté (appelé également "gunitage") est utilisé en protection sur les talus rocheux très fracturés.



**Figure.III.4** Travaux de réalisation de béton projeté

### III.2.1.4 L'ancrage

Cette méthode consiste à insérer des barres d'acier ou des câbles dans la roche et à les ancrer solidement à l'aide de résine ou de ciment. Cela renforce la résistance de la roche en créant une tension qui contrebalance les forces exercées sur elle.



**Figure. III.5** Boulons à ancrage ponctuel et à ancrage réparti

### III.2.1.5 Filets et grillages plaqués

Le principe consiste à plaquer une natte de filets ou de grillages contre la paroi à l'aide de câbles et d'ancrages répartis sur le pourtour de la zone instable. Un placage efficace permet de retenir les blocs en place ou d'enrayer rapidement le mouvement suivant la rupture. [15].



*Figure. III.6 Travaux de pose de grillage*

### III.2.1.6 Le soutènement

Il s'agit d'une structure massive consistant à maintenir en place une masse instable bien délimitée. C'est la solution retenue lorsqu'il apparaît difficile de purger ou d'ancrer la masse instable.



*Figure. III.7 Travaux de soutènement*

### III.2.2 Parades passives

#### III.2.2.1 L'éboulement



*Figure .III.8 Eboulement à droite de route*

### III.2.2.2 Ecrans

### III.2.2.3 Structures rigides



*Figure .III.9 Structures semi-rigides*

### III.2.2.4 Structures déformables - écrans



*Figure .III.10 Structures déformables - écrans*

### III.2.2.5 Grillage ou filet pendu

Il s'agit d'une nappe de grillage ou de filet suspendue contre la paroi et assurant ainsi le guidage des chutes de pierres jusqu'à son pied. Ce type de protection est utilisé sur tous les types de pentes (parois fracturées, talus altérés, zones d'éboulis) et permet d'enrayer des chutes fréquentes d'éléments de faible volume (jusqu'à 100 dm<sup>3</sup>). Le grillage peut être ancré en pied de paroi ou simplement suspendu et lesté en pied.



*Figure. III.11 Filet pendu*

### III.2.2.6 Casquette ou galerie pare-blocs

Cette technique protège les routes des chutes de gros blocs voire de grandes masses. Elle est mise en place lorsque toute autre parade serait inefficace. L'efficacité de telles parades est très bonne mais leur mise en œuvre est très coûteuse et implique de lourds travaux pouvant nécessiter l'interruption au moins partielle de la circulation



*Figure.III.12 protection par galerie - Le Grand Rocher [3]*

### III.2.2.7 Les barrières dynamiques

Quand le risque à couvrir sont de grands rochers ou avalanches ou éboulements, et il est nécessaire d'absorber une grande énergie dans un espace court de temps, Solutioma Département Technique conseille l'utilisation d'écrans dynamiques. Ces écrans absorbent l'énergie cinétique des masses qui se détachent, avec déformation de la barrière elle-même et des éléments dissipateurs d'énergie.

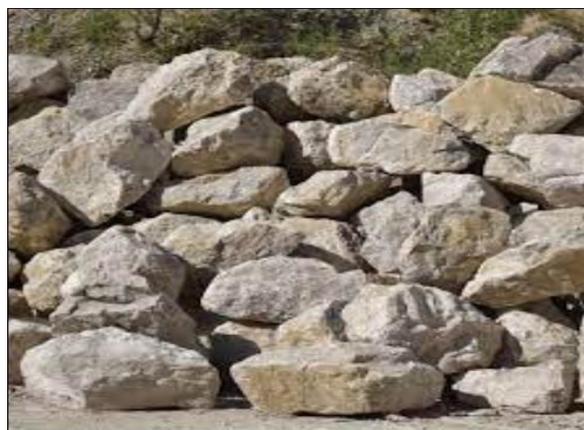
On étudie les points les plus appropriés pour installer les barrières dynamiques selon les trajectoires possibles des matériaux qui se détachent. On tient également compte des impacts qu'elles devront supporter, et on calcule leurs dimensions afin d'obtenir la résistance et le coût des meilleurs. [16].



*Figure .III.13 Les barrières dynamiques*

#### **III.2.2.8 Les enrochements**

Il s'agit de disposer des blocs de roche de taille variable le long des pentes ou des falaises pour stabiliser le terrain. Les blocs sont souvent empilés de manière stratégique pour créer une structure solide. Il est important de noter que le choix des techniques de confortement des massifs rocheux dépend de nombreux facteurs, tels que la géologie locale, le degré de stabilité nécessaire, le budget disponible et les contraintes environnementales. Dans tous les cas, il est essentiel de réaliser une étude approfondie du site et de faire appel à des experts en géotechnique pour déterminer la meilleure approche de confortement à mettre en place.



*Figure .III.14 Les enrochements*

---

### III.3 Aoutes méthodes de confortement des talus rocheux

#### III.3.1 Clous

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



*Figure .III.15 Les clous*

#### III.3.2 Les micropieux

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



*Figure .III.16 Les micropieux*

### **III.3.3 L'aplatissement des talus**

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



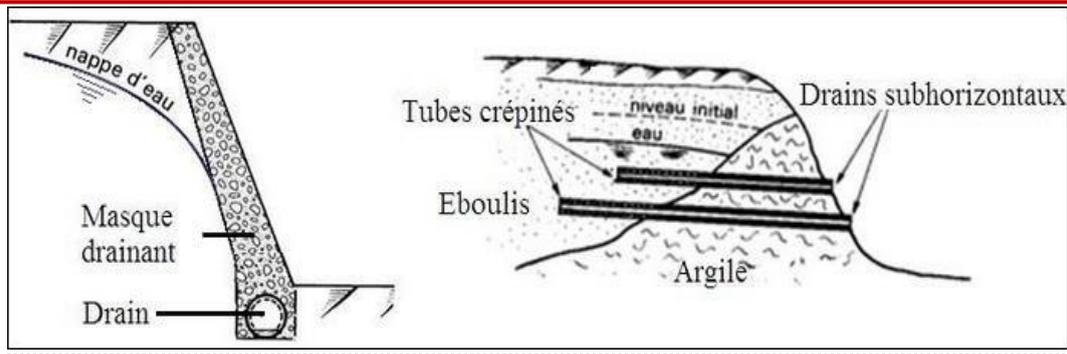
*Figure .III.17 L'aplatissement des talus*

### **III.3.4 L'injection**

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

### **III.3.5 Le drainage.**

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



**Figure.III.18** Action de drainage sur un talus soumis à une nappe [5]

### III.4 Conclusion

Le confortement des massifs rocheux est une approche essentielle pour renforcer la stabilité des massifs rocheux dans différents contextes, tels que la construction d'infrastructures, l'exploitation minière, l'aménagement de carrières ou la prévention des risques naturels. Il vise à améliorer la résistance et la sécurité des massifs rocheux en utilisant diverses techniques et mesures de stabilisation. Le confortement des massifs rocheux peut impliquer différentes méthodes et techniques en fonction des caractéristiques du site et des objectifs spécifiques. Cela peut inclure l'installation de systèmes de soutènement tels que des ancrages, des barres d'armature, des filets métalliques, des boulons d'injection ou des écrans pare-blocs. Ces systèmes aident à renforcer la cohésion et la résistance des roches en créant une interaction entre les blocs rocheux et en redistribuant les contraintes. D'autres techniques de confortement des massifs rocheux comprennent l'injection de résine ou de coulis de ciment pour remplir les fissures et renforcer la structure.

### III.5 Références bibliographique du troisième chapitre

[1] [https://www.researchgate.net/figure/Allegement-en-tete-dun-talus-naturel\\_fig42\\_340226339](https://www.researchgate.net/figure/Allegement-en-tete-dun-talus-naturel_fig42_340226339)

[2] <http://www.pentes-tunnels.eu/didact/didactu/tunnel/realisation/soutenement/Technologiedeboulonnage.html>

[3]. <https://www.stabilisationprotection.fr/grillage-double-torsion.html>

[4]. [https://www.google.com/search?q=Le+sout%C3%A8nement+du+talus+rocheux&tbm=isch&ved=2ahUKEwixwcmAl7T\\_AhVamycCHT1eBDUQ2cCegQIABAA&oeq=Le+sout%C3%A8nement+du+talus+rocheux&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoHCAAQGBCABFDQA1jeqQFggr8BaABwAHgAgAG5A4gBCGSAQkwLjkuNS4yLjKYAQCgAQQgAQQnd3Mtd2l6](https://www.google.com/search?q=Le+sout%C3%A8nement+du+talus+rocheux&tbm=isch&ved=2ahUKEwixwcmAl7T_AhVamycCHT1eBDUQ2cCegQIABAA&oeq=Le+sout%C3%A8nement+du+talus+rocheux&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJzoHCAAQGBCABFDQA1jeqQFggr8BaABwAHgAgAG5A4gBCGSAQkwLjkuNS4yLjKYAQCgAQQgAQQnd3Mtd2l6)

LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=Vw2CZPG5Ftq2nsEPvbyRqAM&bih=775&biw=1440&client=firefox-b-d&hl=fr#imgrc=05AT\_rb4lqDhNM

[5]. <https://www.aquaportail.com/definition-7728-eboulement.html>

[6]. <https://acrobatx.fr/travaux-publics-et-risques-naturels/protection-de-falaises-et-talus/grillage-pendu/>

[7]. <https://acrobatx.fr/travaux-publics-et-risques-naturels/protection-de-falaises-et-talus/grillage-pendu/>

[8]. [https://www.google.com/search?q=Casquette+ou+galerie+pare-blocs++++&tbm=isch&ved=2ahUKEwi-t6GNkLH\\_AhXNpicCHeTmBQsQ2-cCegQIABAA&oq=Casquette+ou+galerie+pare-blocs++++&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoHCCMQ6gIQJ1AAWPxtYPV-aAFwAHgAgAHjB4gB4weSAQM2LTGYAQCgAQQgAQtnD3Mtd2l6LWltZ7ABCsABAQ&sclient=img&ei=c3OAZP6xK83NnsEP5M2XWA&client=firefox-b-d#imgrc=puZmtbiyxNa9NM](https://www.google.com/search?q=Casquette+ou+galerie+pare-blocs++++&tbm=isch&ved=2ahUKEwi-t6GNkLH_AhXNpicCHeTmBQsQ2-cCegQIABAA&oq=Casquette+ou+galerie+pare-blocs++++&gs_lcp=CgNpbWcQAzoHCCMQ6gIQJ1AAWPxtYPV-aAFwAHgAgAHjB4gB4weSAQM2LTGYAQCgAQQgAQtnD3Mtd2l6LWltZ7ABCsABAQ&sclient=img&ei=c3OAZP6xK83NnsEP5M2XWA&client=firefox-b-d#imgrc=puZmtbiyxNa9NM)

[9]. [https://www.google.com/search?q=les+barri%C3%A8res+dynamiques+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjWrqT8h7H\\_AhVPpCcCHfcbB0sQ2cCegQIABAA&oq=les+barri%C3%A8res+dynamiques+&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoHCCMQ6gIQJ1COEFj-jgFg6gBaAFwAHgBgAHDN4gB5TqSAQc0LTEuOS0xmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=7GqAZNaIJs\\_InsEP97-c2AQ&client=firefox-bd#imgrc=\\_XO6qUzfN3A9dM&imgdii=RWb5LyIbttkpiM](https://www.google.com/search?q=les+barri%C3%A8res+dynamiques+&tbm=isch&ved=2ahUKEwjWrqT8h7H_AhVPpCcCHfcbB0sQ2cCegQIABAA&oq=les+barri%C3%A8res+dynamiques+&gs_lcp=CgNpbWcQAzoHCCMQ6gIQJ1COEFj-jgFg6gBaAFwAHgBgAHDN4gB5TqSAQc0LTEuOS0xmAEAoAEBqgELZ3dzLXdpei1pbWewAQrAAQE&sclient=img&ei=7GqAZNaIJs_InsEP97-c2AQ&client=firefox-bd#imgrc=_XO6qUzfN3A9dM&imgdii=RWb5LyIbttkpiM)

[10]. [https://www.google.com/search?q=les+enrochements&client=firefox-b-d&hl=fr&sxsrf=APwXEdelIL82a9ED1f\\_zsgi4WBgFADDr2MA:1686252474352&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiv2fD9s7T\\_AhUDzqQKHUYIBbgQ\\_AUoAXoECAEQAw&biw=1440&bih=775&dpr=1#imgrc=O9zLzPXMdcxxEM](https://www.google.com/search?q=les+enrochements&client=firefox-b-d&hl=fr&sxsrf=APwXEdelIL82a9ED1f_zsgi4WBgFADDr2MA:1686252474352&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiv2fD9s7T_AhUDzqQKHUYIBbgQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1440&bih=775&dpr=1#imgrc=O9zLzPXMdcxxEM)

[11]. [https://www.google.com/search?q=Les+micropieux+des+talus+rocheux&tbm=isch&ved=2ahUKEwiU1ca2lLH\\_AhWmricCHWrYBPYQ2-cCegQIABAA&oq=Les+micropieux+des+talus+rocheux&gs\\_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1CBDVi\\_Y2DRdmgBcAB4AIABwgaIAZcRkgEFNS0yLjGYAQCgAQQgAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=\\_HeAZJTnAqbdnsEP6rCTsA8&client=firefox-b-d#imgrc=65RfLB08hXkt\\_M](https://www.google.com/search?q=Les+micropieux+des+talus+rocheux&tbm=isch&ved=2ahUKEwiU1ca2lLH_AhWmricCHWrYBPYQ2-cCegQIABAA&oq=Les+micropieux+des+talus+rocheux&gs_lcp=CgNpbWcQAzoECCMQJ1CBDVi_Y2DRdmgBcAB4AIABwgaIAZcRkgEFNS0yLjGYAQCgAQQgAQtnD3Mtd2l6LWltZ8ABAQ&sclient=img&ei=_HeAZJTnAqbdnsEP6rCTsA8&client=firefox-b-d#imgrc=65RfLB08hXkt_M)

---

[12]. [https://www.researchgate.net/figure/Action-de-drainage-sur-un-talus-soumis-a-une-nappe\\_fig44\\_340226339](https://www.researchgate.net/figure/Action-de-drainage-sur-un-talus-soumis-a-une-nappe_fig44_340226339)

[13]. <https://www.encyclopedie-environnement.org/sol/glissement-eboulement-rocheux-fatalite/>

[14]. <https://acrobatx.fr/travaux-publics-et-risques-naturels/minage-purge-reprofilage/reprofilage/>

[15]. [https://www.google.com/search?q=%2Bd%C3%A9finition+les+filets+et+grillages+plaqu%C3%A9s&client=firefox-b-d&bih=775&biw=1440&hl=fr&sxsrf=APwXEdeUbq3hywLnEsGTn9Lpop0X4fh0vQ%3A1686309766332&ei=hguDZKPjE\\_zr7\\_UPrswRiAY&ved=0ahUKEwujvum0ibb\\_AhX89bsIHa5iBGEQ4dUDCA4&uact=5&oq=%2Bd%C3%A9finition+les+filets+et+grillages+plaqu%C3%A9s&gs\\_lcp=Cgxnd3Mtd2l6LXNlcnAQAzIFCAAQogQyBQgAEKIEMgUIABCiBDoICAAQogQQsAM6BwghEKABEApKBAhBGAFQ8OcBWMz1AmD9hwNoA3AAeACAAdADiAHYGJIBCTAuMi4yLjQuMpgBAKABAqABAcABAcgBBA&sclient=gws-wiz-serp](https://www.google.com/search?q=%2Bd%C3%A9finition+les+filets+et+grillages+plaqu%C3%A9s&client=firefox-b-d&bih=775&biw=1440&hl=fr&sxsrf=APwXEdeUbq3hywLnEsGTn9Lpop0X4fh0vQ%3A1686309766332&ei=hguDZKPjE_zr7_UPrswRiAY&ved=0ahUKEwujvum0ibb_AhX89bsIHa5iBGEQ4dUDCA4&uact=5&oq=%2Bd%C3%A9finition+les+filets+et+grillages+plaqu%C3%A9s&gs_lcp=Cgxnd3Mtd2l6LXNlcnAQAzIFCAAQogQyBQgAEKIEMgUIABCiBDoICAAQogQQsAM6BwghEKABEApKBAhBGAFQ8OcBWMz1AmD9hwNoA3AAeACAAdADiAHYGJIBCTAuMi4yLjQuMpgBAKABAqABAcABAcgBBA&sclient=gws-wiz-serp)

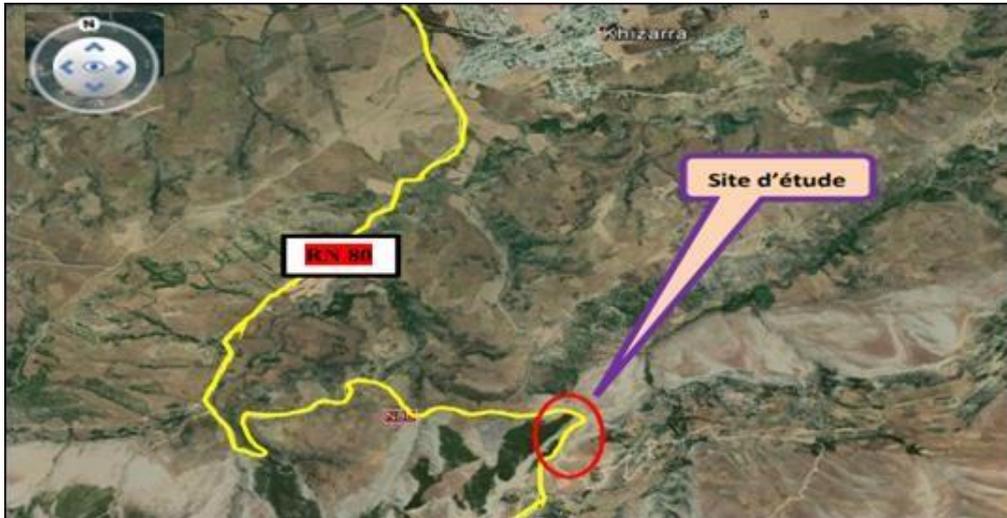
[16]. <https://solutioma.com/fr/barrieres-dynamiques/>

# **Chapitre IV**

## **Présentation du projet concerné par l'étude**

## IV.1 Introduction

L'objectif de ce projet consiste à l'étude d'un talus rocheux pour la protection contre la chute de pierres sur la RN 80 AU PK 66+800, et PK 67+300 entre Khezaras et Sedrata et de proposer des solutions de confortement adéquate.



**Figure IV.1** Localisation du projet par rapport au réseau routier de la RN80

Le site de glissement objet de notre étude est localisé sur le tracé de la route nationale RN80 au PK 66+800, et PK 67+300. Elle est située en Sud-Est loin de 22 km au chef-lieu. L'emprise de l'instabilité a été rapportée sur un plan de situation (Fig.IV.2).



**Figure.IV.2** localisation de pointe instable par rapport Au l'axe routier de la RN80

## IV.2 Aperçu géologique et géomorphologique

### IV.2.1 Aperçu géomorphologique

La région se caractérise par des reliefs très élevés et des falaises abruptes, très escarpées et dentelées. Les altitudes varient de 450 m jusqu'à 800 m. Sur le plan hydrologique, le réseau hydrographique est assez dense. L'analyse des M.N.T (Model Numérique de Terrain) et les D.E.M (Digital Élévation Model) permettent de voir clairement les formes morphologiques du relief de la zone d'étude, l'altitude par rapport au niveau de la mer de la zone d'étude est de l'ordre de 450 à 800 m.

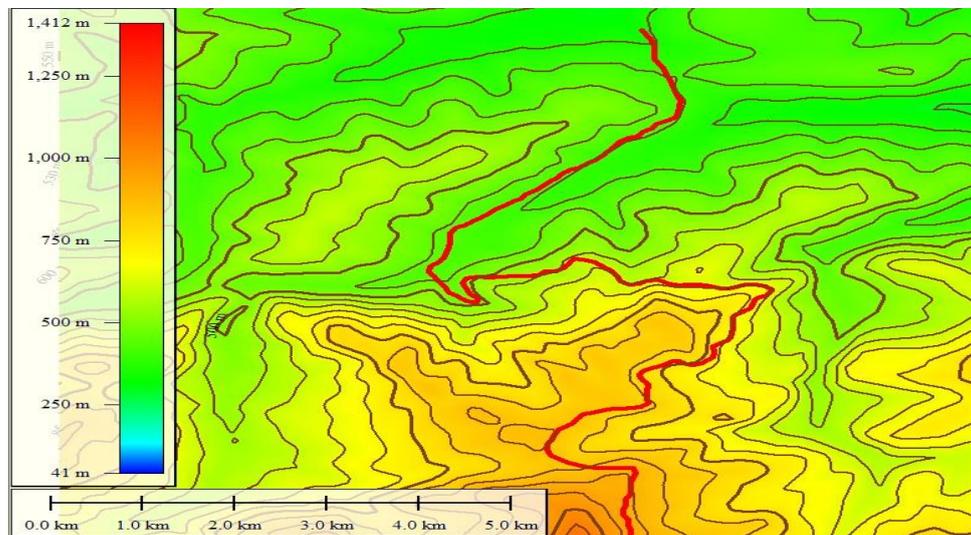


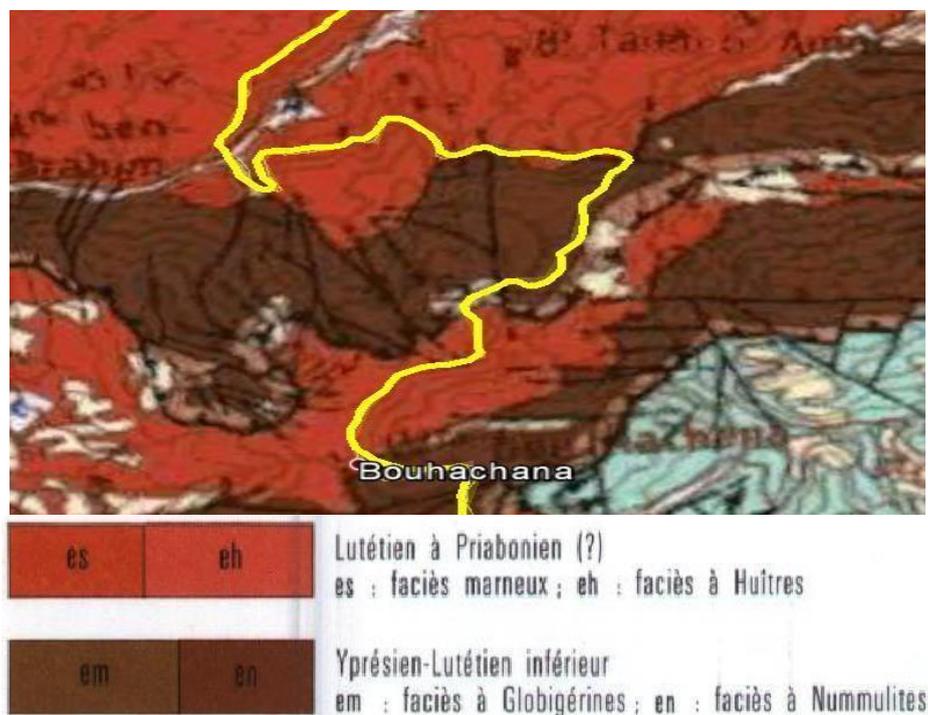
Figure.IV.3 Schéma morphologique des tracés selon au niveau de RN 80 PK 66+800 -Pk 67+300.

### IV.2.2 Aperçu géologique

Le point instable concerné par notre étude se développe, principalement sur la partie de la nappe tellienne. L'examen détaillé de la carte géologique de Constantine à 1/200 000 (Fig.IV7) permet de signaler l'existence de cinq époques géologiques sur le secteur étudié :

- ▶ **Le Quaternaire** : peu développés et composés de cailloux roulés, limons et graviers. Le fond de la dépression et des thalwegs est couvert d'alluvions et de colluvions, par des Bloc et Eboulis, d'argile limoneuse à quelques graviers et cailloutis.
- ▶ **Moi – Pliocène** : Composé d'argile, limon et sable, des matériaux avec des quantités importantes de cailloux et des calcaires lacustres.

- ▶ **Miocène** : C'est une puissante série de marnes gris foncé à bancs minces de grès calcareux ou des calcaires marneuses.
- ▶ **Oglio-miocène** : Matériaux flysch appartenant à numidienne. Composé principalement de Grès et des argiles.
- ▶ **L'éocène (lutétien, yprésien)** : caractérisé par des formations marneuses et calcaires marneux parfois à silex montre des calcaires rouges, gris clairs, compacts en bancs épais.
- ▶ **Le crétacé supérieur** : caractérisé par Un complexe de marnes, marno -calcaire ou calcaire marneux généralement noires, jaunâtres à grisâtres. Dans le secteur d'étude, la tectonique a peu influencé les paysages ; on note toutefois la présence de quelques failles principalement liées à la remontée du substratum calcaires et la nappe numidienne.



**Figure IV.4** Carte géologique Au niveau de site (extrait de la carte géologique de Constantine à 1/200 000. [2])

#### IV.2.2.1 Géologie de site

L'examen visuel détaillé, permet de signaler l'existence de quatre unités lithologiques sur le site étudié (Figs.IV.5 et IV.6):

**1-**Eboullis de pente et des roches broyées et altérées (Paquets de brèches).**2-**Alternance Calcaires marneux grisâtre fracturés et des calcaires altérées et fracturées. **3-** Calcaires sain à nodules des silex avec des fractures et des discontinuités remplis par la calcite et la silice.



**Figure IV.5** Eboulis de pente et des roches broyées et altérées.



**Figure IV.6** Calcaires marneux grisâtre fracturés.

Les plans de stratification sont observés sur le talus amont de la RN80, ils ont des directions allant de NE40 à NE 45° et des pendages allant de 40 à 45° NW et sont parfois soulignés au niveau de leurs interfaces par des joints de stratification. La plupart des affleurements montre une intense déformation qui s'exprime par des fractures plus au moins fermées tapissées de calcite, d'argiles et de dépôt d'oxydes de fer. Le relevé de terrain a permis de mettre en évidence des discontinuités (diaclasses, plans de stratification, failles, etc.), l'étude stéréographique a permis de mettre en évidence la présence de plusieurs familles de discontinuités sur les talus ;

**Tableau.IV.1** description et classe d'altération du massif du talus étudié

Unité lithologique	Famille de discontinuités principales	Matériau de remplissage	Classe GSI	Classe d'altération (AFES)
1	Structure chaotique (fortement broyée)	Argiles et sables	TRES PAUVRES GSI =10	Roche complètement Décomposé (AM6)
2	plusieurs familles de discontinuités entrecoupées	Argiles, oxyde de fer	PAUVRES GSI =20	Roche complètement Altéré (AM5)
3	04 familles de discontinuités orthogonales	Calcite, oxyde de fer	MOYENNES GSI =45	Roche légèrement Altéré (AM2)
4	3 familles de discontinuités orthogonales	Calcite et silice	BONNES GSI =65	Roche sain (AM1a)

### IV.3 Diagnostic géologique et géotechnique

#### IV.3.1 Diagnostic géologique

La synthèse des informations collectées a été retranscrite sur une carte informative des phénomènes naturels (fond de plan utilisé : carte géologique ; échelle : 1 / 200 000ème).

**Tableau.IV.2** Sectionnement géographique de point instable [2]

Section N°	Extension Pk	Type d'instabilité	Degré de risque
01	66+800 - 66 +900	blocs massif mis en surplombe et glissement banc sur banc	faibles
02	66+900 – 67+200	Chute des pierres	moyen
03	67+200 - 67+100	Chute des pierres et blocs	fort

#### IV.3.1.1 Les facteurs permanents caractérisant la prédisposition de site aux instabilités

- Les pentes élevées.
- Le massif rocheux a subi de fortes sollicitations tectoniques au cours de leur histoire géologique. Les discontinuités d'origine tectonique (fractures, failles, diaclases) affectent essentiellement la roche.
- La stratification défavorable, elle est inclinée vers l'intérieur du versant.
- Les discontinuités structurales découpent le massif en un agencement de blocs plus ou moins instables en fonction de l'orientation, de l'espacement et de la continuité des familles de discontinuités. La géométrie des différentes discontinuités détermine une orientation défavorable à la stabilité du massif.

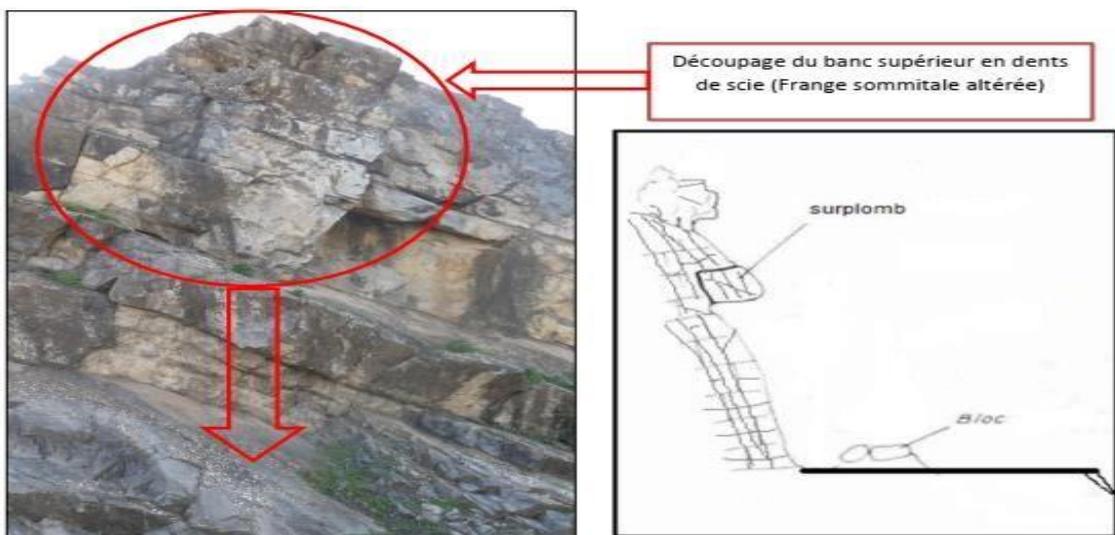
#### IV.3.1.2 Les facteurs du déclenchement variables dans le temps

Les facteurs ci-dessous sont souvent considérés comme responsables du déclenchement de l'instabilité. On peut distinguer :

- L'eau, qui détermine l'hydrogéologie de massif.
- La sismicité locale ; peuvent être à l'origine de la propagation des fractures, de la mobilisation de blocs instables.
- Les actions anthropiques comme les vibrations dues à l'usage d'explosifs (tirs de carrières), et les modifications de l'équilibre naturel des pentes comme l'excavation en pied de pente qui réduit les forces résistantes (déblais, creusement de route).

Les instabilités répertoriées au droit de l'ensemble de ce secteur sont :

- Les chutes de pierre et blocs (<1/2 m<sup>3</sup>)
- Les chutes de masses rocheuses (>1/2 m<sup>3</sup>)
- Des effondrements de paquets rocheux plurimétriques (plusieurs m<sup>3</sup>).



*Figure.IV.7 phénomène particulier (surplomb).*



*Figure.IV.8 Exemple de blocs effondrés du paquet rocheux et tombés sur la plateforme*

### IV.3.2 Diagnostic géotechnique

Cinq (05) échantillons sur talus ont été prélevés pour la réalisation des essais mécanique sur roche, Les valeurs des principaux paramètres physiques et mécaniques mesurés pour les formations rencontrées sont représentées dans le tableau suivant :

**Tableau .IV.3** Valeurs des principaux paramètres physiques et mécanique [2]

SECTION Pk	ECH N°	$\gamma_h$ (T/m <sup>2</sup> )	Etat d'échantillon	Résistance à la compression simple
			CALCAIRE	RC (MPa)
66+800 - 66 +900	01	2.58	Etats rocheux	86.40
66+900 – 67+200	02	2.51	Etats rocheux	54.09
	03	2.65	Etats rocheux	68.97
67+200 - 67+100	04	2.44	Etats rocheux	41.39
	05	2.65	Etats rocheux	67.56

Il en ressort de ces résultats que :

- Les poids spécifiques indiquent que les roches testées sont denses à très denses.
- Les résultats de la compression simple réalisés sur les échantillons prélevés sur les formations calcaires indiquent une roche de résistance moyenne à élevée de classe RC04 à RC03. On représente ci-après une classification de la matrice rocheuse donnée selon Résistance à la Compression simple.

**Tableau.IV.4** Classification AFTES-ISRM de la matrice rocheuse [2]

Classe	Rc (Mpa)	Description de la résistance
Rc 1	> 200	Extrêmement élevée
Rc 2	100-200	très élevée
Rc 3	50-100	élevée
Rc 4	25-50	moyenne
Rc 5	5-25	faible
Rc 6	1-5	très faible
Rc 7	<1	Extrêmement faible

### IV.3.3 Diagnostic géophysique

Le programme d'intervention préétabli était la réalisation de trois (03) profils de la sismique réfraction dans le but de :

1- Détermination des vitesses sismiques des ondes de compression, afin d'en déduire l'état décompacté des différentes couches ; et les moyens à mettre en œuvre pour les travaux de terrassement (engins de terrassement : brise roche, explosifs...)

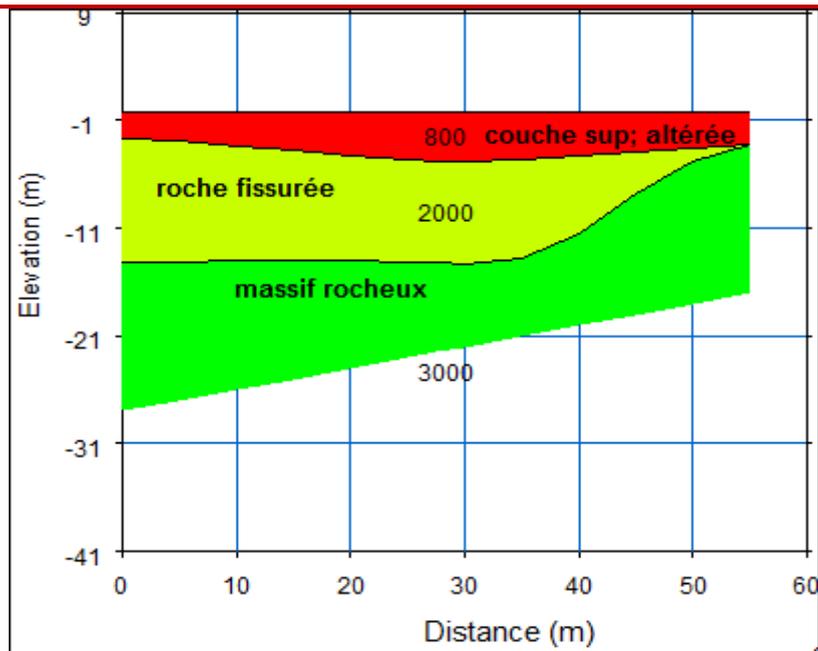
2- Calcul des épaisseurs des différentes formations en place.

3- Détermination de l'interface du sol support.

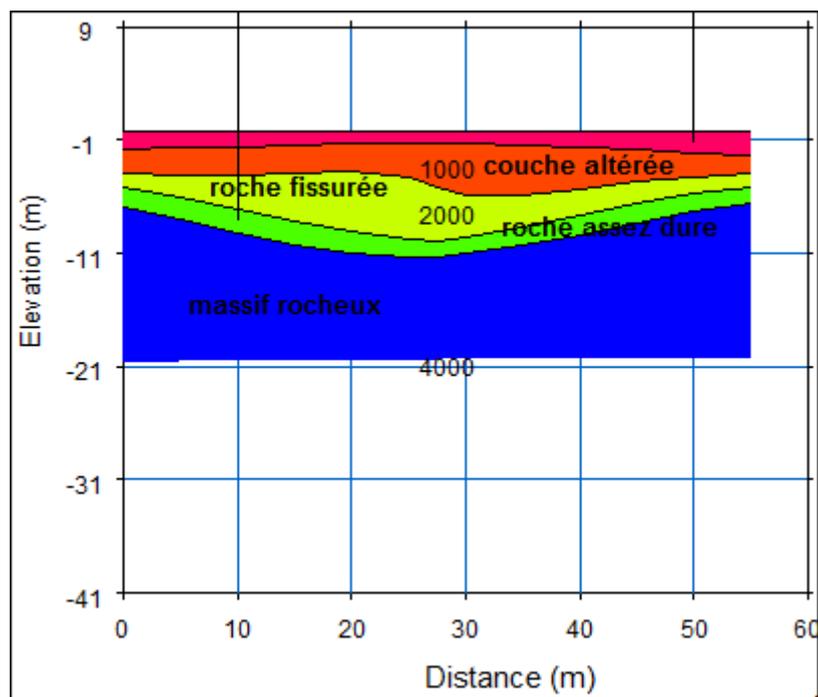
4- Classification selon les tables de Caterpillar des sols. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.5 Valeurs des principaux paramètres géophysique [2]**

Profil sismique	Couche N°	Vp (m/s)	Epaisseur moyenne (m)	Observation
PS1	01	800	03	Couche superficielle altérée
	02	2000	8	Roche fissurée
	03	3000	profond	Massif rocheux
PS2	01	1000	1	Couche altérée
	02	1400	3	Roche très fissurée
	03	2000	3	Roche fissurée
	04	2800	profond	Massif rocheux
PS3	01	600	2.5	Couche superficielle
	02	1000	2.5	Roche tendre
	03	2000	2	Roche fissurée
	04	2500	1	Roche assez dure
	05	4000	profond	Massif rocheux



*Figure.IV.9* Topographie profil 01



*Figure.IV.10* Tomographie Profil 03 [2]

Vu les coupes de terrains obtenues, les différentes couches sont parfois continues parfois discontinues plissées. Le toit du substratum rocheux est situé à 8 m de profondeur. La classification est basée sur les considérations suivantes :

- ✓ Vitesse inférieures à 750 m/s : terrain meuble .
- ✓ Vitesse comprise entre 750 et 1500 m/s : terrain du rippable.
- ✓ Vitesse comprise entre 1500 et 2250 m/s : terrain à la limite du rippable.

✓ Vitesse supérieure à 2250 m/s : terrain rocheux.

Plusieurs auteurs ont proposé des relations entre les paramètres mécaniques du massif rocheux et la valeur du RMR. Nous avons retenu les relations suivantes qui permettent d'estimer une cohésion et un angle de frottement, ainsi qu'un module d'Young [1] :

$$C_{\text{éq}} \text{ (kPa)} = 5 \text{ RMR.} \quad (\text{V.1})$$

$$\varphi_{\text{éq}} = 0,5 \text{ RMR} + 8,3 \pm 7,2. \quad (\text{V.2})$$

$$E_{\text{éq}} \text{ (GPa)} = 10^{(\text{RMR}-10)/40}. \quad (\text{V.3})$$

L'application des relations susmentionnées donnent des caractéristiques mécaniques suivantes :

**Tableau .IV.6** Les caractéristiques géo-mécaniques retenues [2]

Section N°	Couche N°	GSI	RMR	C éq KPA	$\Phi$ éq
01	01	10	15	75	8,6
	02	45	50	250	26,1
	03	67	72	360	37,1
02	01	10	15	75	8,6
	02	20	25	125	13,6
	03	45	50	250	26,1
	04	67	72	360	37,1
03	01	10	15	75	8,6
	02	20	25	125	13,6
	03	45	50	250	26,1
	04	65	70	350	36,1
	05	67	72	360	37,1

#### IV .4 Solution des confortements par section

---

L'ensemble des résultats et les propositions de traitements, qui correspondent l'observation de 0.5 km : de la RN 80, répartis sur 03 Section ;

Des solutions ont été établies par la société d'études techniques de setif (**S.E.T.S.**)

suivant la section considéré et le contexte qui le caractérise, elle constitue ;

- ✚ **En section 01** (Pk 66+800 - PK66 +900) ; modifier le talus par la technique de talutage avec des banquettes (Allègement en tête) avec la purge des éléments instables détectés en amont de la falaise.
- ✚ **En section 02** (Pk 66+900 - PK67 +200) ; la solution proposé pour ce tronçonassocient des travaux classiques de nettoyage, élagage et purge du talus amont avecdes travaux de mis en place de grillage double torsion (DT) pendu constitués par une natte amarrée en tête de falaise ou quelques mètres en retrait de celle-ci et suspendue contre la paroi de la falaise. Son rôle est de dévier les blocs se détachant directementde la paroi ou en amont de celle-ci et de les guider le long de la falaise. Les blocs, qui ne peuvent ni prendre de la vitesse ni rebondir, sont collectés au bas de la paroi.
- ✚ **En section 03** (Pk 67+200 - PK67 +300) ; la solution proposé pour ce tronçonassocient des travaux classiques de nettoyage, élagage et du talus amont avec des travaux de mis en place des tirants d'encrages constitués par un bar d'acier HA 25 longueur de 05 mètre espacés de 3 mètre associé de béton projeté et treillis soudé. Son rôle est d'empêcher (ou limiter) l'altération due à l'action des agents atmosphériques (érosion) et les chutes de blocs superficielles dans le massif rocheux.

#### **IV.5 Références bibliographique du quatrième chapitre**

[1].Bieniawski, Z. T., (1973), «Engineering classification of jointed rock masses», *Trans.S.Afr. Instn. Civil Engrs.* 15(12): 335-344.

[2].*Rapport technique de la société d'études techniques de setif (S.E.T.S)*

**Chapitre V**  
**Etude numérique du**  
**talus rocheux sur la RN**  
**80**

## V.1 Présentation du code PLAXIS

PLAXIS est un programme d'éléments finis en deux dimensions spécialement conçu pour réaliser des analyses de déformation et de stabilité pour différents types d'applications géotechniques. Les situations réelles peuvent être représentées par un modèle plan ou axisymétrique. Le programme utilise une interface graphique pratique permettant aux utilisateurs de générer rapidement un modèle géométrique et un maillage d'éléments finis basés sur la coupe verticale de l'ouvrage à étudier. Les utilisateurs sont supposés être capables de travailler dans un environnement Windows. L'interface d'utilisation de PLAXIS se compose de quatre sous-programmes (Input, Calculations, Output et Curves).

### V.1.1 Le programme d'entrée des données (input)

Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales.

Le menu principal du programme d'entrée des données contient des menus déroulant relatifs à la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, afficher des graphiques, créer un modèle géométrique, générer des maillages d'éléments finis et entrer des données en général. Une distinction peut être faite entre le menu du mode de création de la géométrie et le menu des conditions initiales. Le premier est composé des menus File, Edit, View, Geometry, Loads, Materials, Mesh, Initial et Help [1].

Le second est composé des menus File, Edit, View, Geometry, Generate et Help.

**Le menu File:** Permet de créer un nouveau projet, d'ouvrir un projet existant, de sauver le projet en cours sous le nom existant, d'imprimer le modèle géométrique sur une imprimante choisie et permet de quitter le programme Input....

**Le menu Edit:** Permet de restaurer l'état précédent du modèle géométrique et Permet de copier le modèle géométrique dans le presse-papiers de Windows.

**Le menu View:** Permet de zoomer sur une zone rectangulaire (Le programme agrandira la surface sélectionnée), de restaurer la vue précédant l'agrandissement le plus récent, de voir le tableau des coordonnées x et y de tous les points de la géométrie et Permet de montrer ou cacher les flèches indiquant les axes x et y.

**Le menu Geometry:** Le menu Geometry contient les options de base permettant de fabriquer un modèle géométrique.

**Le menu Loads:** Le menu Loads contient les options qui permettent d'ajouter des charges et des conditions aux limites au modèle géométrique.

**Le menu Materials:** Le menu Materials est utilisé pour activer la base de données de création et de modification des propriétés des matériaux pour les sols et les interfaces, les plaques, les géo grilles et les ancrages.

**Le menu Mesh:** Le menu Mesh contient les options permettant de définir le type d'éléments (6 ou 15 nœuds), générer un maillage d'éléments finis ou appliquer un raffinement local ou global du maillage.

**Le menu Initial:** Le menu Initial permet d'accéder au menu des conditions initiales du programme Input.

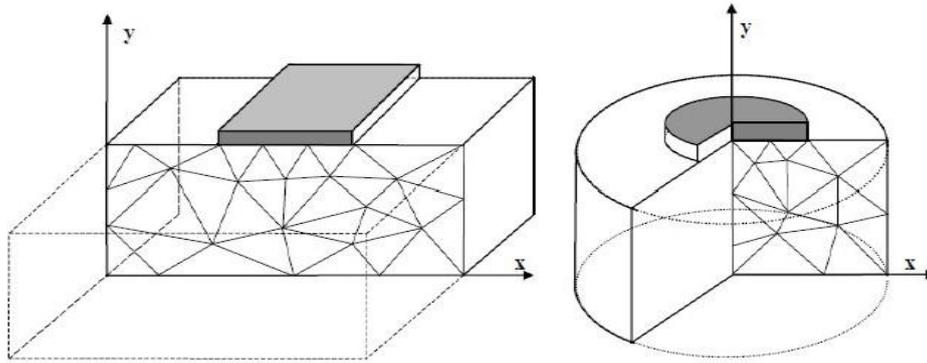
#### **a) Réglages généraux**

La fenêtre des réglages généraux (General settings) apparaît lors de la création d'un nouveau projet et peut ensuite être ouverte depuis le menu File.

**Le type de modèle (Model) :** PLAXIS Version 8 peut être utilisé pour réaliser des analyses par éléments finis en deux dimensions. Les modèles d'éléments finis peuvent être soit plans (Plane strain), soit axisymétriques (Axisymmetry).

Les modèles en déformations planes (Plane strain) sont utilisés pour des structures ayant une section (plus ou moins) uniforme, et avec un état de contraintes et un schéma de chargement uniformes sur une longueur suffisante perpendiculairement à la section (direction z).

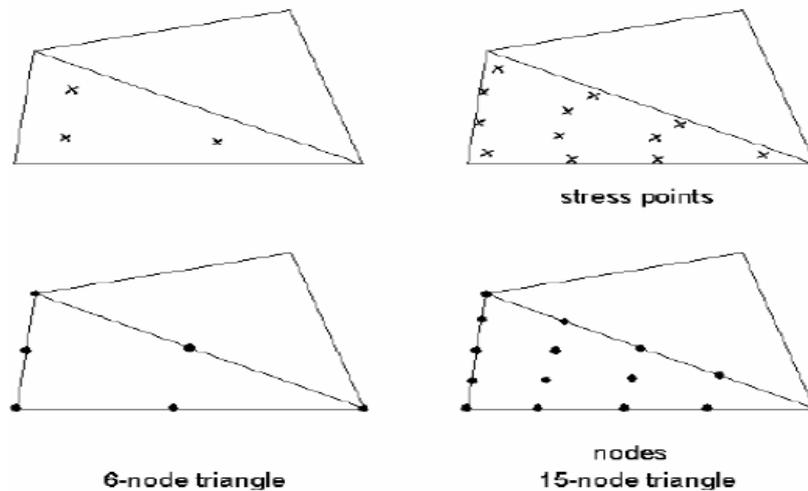
Les modèles axisymétriques (Axi symmetry) sont utilisés pour des structures circulaires ayant une section radiale (plus ou moins) uniforme, avec un schéma de chargement réparti autour de l'axe central et des états de contrainte et de déformation identiques selon les directions radiales. Pour un modèle d'éléments finis à deux dimensions, le choix de Plane strain ou de Axisymmetry a pour conséquence de ne laisser que deux degrés de liberté en translation par nœud dans les directions x et y[1].



**Figure V.1** Exemples de problèmes en déformations plane et axisymétrique.

**Les éléments :** L'utilisateur doit sélectionner des éléments triangulaires à 6 ou 15 nœuds pour modéliser les couches de sol et autres éléments de volume. Le triangle à 15 nœuds est un élément très précis qui a produit des résultats en contraintes de haute qualité sur différents problèmes, comme par exemple le calcul de la rupture de sols incompressibles.

Le triangle à 6 nœuds est un élément relativement précis donnant de bons résultats pour les analyses standards en déformations, à condition d'utiliser un nombre suffisant d'éléments.



**Figure V.2** Position des nœuds et des points de contrainte dans les éléments de sol [1].

**Les unités :** Les unités de longueur, force et temps à utiliser dans l'analyse sont définies lorsque les données d'entrées sont spécifiées. Ces unités fondamentales sont à définir dans l'onglet Dimensions de la fenêtre de réglages généraux (General settings).

**Les dimensions:** l'utilisateur doit spécifier les dimensions de la planche à dessin.

#### b) Blocages:

Les blocages sont des déplacements imposés nuls. Ces conditions peuvent être appliquées sur des lignes géométriques comme sur des points. Les blocages peuvent être sélectionnés à partir

du menu Loads. Dans le modèle géométrique, une distinction peut être faite entre les blocages horizontaux (Horizontal fixity) ( $u_x = 0$ ) et les blocages verticaux (Vertical fixity) ( $u_y = 0$ ). On peut également choisir un blocage total (Total fixity) qui est la combinaison des deux précédents ( $u_x = u_y = 0$ )

### **c) Propriétés des matériaux**

Dans PLAXIS, les propriétés du sol et les propriétés des matériaux des structures sont toutes stockées dans une base de données. Il y a quatre types différents de matériaux :

Sols et interfaces (Soil & Interfaces), plaques (Plates), géogrilles (Geogrids) et ancrages (Anchors). A partir de la base de données, ces paramètres peuvent être assignés à des Couches de sol, ou aux éléments de structure dans le modèle géométrique.

### **d) Modélisation du comportement d'un sol**

Le modèle bien connu de Mohr Coulomb peut être considéré comme une approximation au premier ordre du comportement réel du sol. Ce modèle, élastique parfaitement plastique, nécessite cinq paramètres fondamentaux qui sont : le module d'Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la cohésion  $c$ , l'angle de frottement  $\phi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ . PLAXIS contient également des modèles de sols plus avancés

### **e) Génération du maillage**

Lorsqu'un modèle géométrique est entièrement défini et que les propriétés des matériaux sont assignées à toutes les couches et à tous les éléments de structure, la géométrie doit être divisée en éléments finis afin de réaliser le calcul par éléments finis. Une composition d'éléments finis s'appelle un maillage d'éléments finis. PLAXIS permet une génération automatique des maillages d'éléments finis.

### **f) Conditions initiales**

Une fois le modèle géométrique créé et le maillage d'éléments finis généré, l'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent être spécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

### **g) Calculs**

Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type des calculs à réaliser

Ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (Calculation).

### V.1.2 Le programme de calcul

Après la sélection (automatique) d'un projet, la fenêtre principale du programme de calcul apparaît ; elle comporte les points suivants :

**Le menu de calcul:** Le menu de calcul permet l'accès à toutes les options du programme de calcul. La plupart des options sont également accessibles par des icônes situées dans la barre d'outils.

**La barre d'outils:** La barre d'outils contient les icônes qui peuvent être utilisées comme raccourci pour les options du menu.

**Les onglets (partie supérieure de la fenêtre):** Les onglets permettent de définir et de visualiser une phase de calcul.

**Liste des phases de calcul (partie inférieure de la fenêtre):** Cette liste donne une vue d'ensemble de toutes les phases de calcul d'un projet. Chaque ligne correspond à une phase particulière.

### V.1.3 Le Menu De Calcul

La fenêtre du programme de calcul contient des menus déroulants relatifs à l'ensemble des options de manipulation de fichiers, de définition des phases de calcul et d'exécution des calculs. Le menu de calcul est composé des sous-menus File, Edit, View, Calculate and Help.

**a) Types de calculs** Il y a trois types de types de calcul fondamentaux distincts : un calcul plastique (Plastic), une analyse de consolidation (Consolidation) et un calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction). Un calcul dynamique (Dynamic) est disponible en option dans le menu déroulant, mais il requiert le module PLAXIS Dynamics, qui est une extension de la Version 8 [1].

**Calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction):** Un calcul de coefficient de sécurité dans PLAXIS peut être effectué en réduisant les paramètres de résistance du sol. Ce processus est appelé Phi-c réduction et constitue un type de calcul à part entière. Le calcul de coefficient de sécurité (Phi-c réduction) doit être sélectionné lorsque l'utilisateur souhaite calculer un coefficient de sécurité global pour une situation donnée. Une analyse de sécurité peut être réalisée après chaque phase de calcul individuelle et donc pour chaque étape de construction.

Cependant, notons qu'une phase Phi-c réduction ne peut être utilisée comme condition de départ pour une autre phase de calcul car elle se termine sur une situation de rupture. Il est donc conseillé de définir toutes les analyses de sécurité à la fin de la liste des phases de calcul et d'utiliser le paramètre (Start from phase) pour définir la phase de référence de chaque phase d'analyse de coefficient de sécurité.

Lors d'un calcul de coefficient de sécurité, aucune charge ne peut être augmentée. En fait, le calcul Phi-c réduction est un type particulier de calcul plastique. La saisie d'un incrément de temps n'a en général pas de signification dans ce cas.

#### **V.1.4 Le programme de résultats (output)**

Le programme de résultats (Output) contient tous les éléments qui permettent de visualiser les résultats des calculs aux éléments finis. Le menu programme Output contient des menus déroulants qui couvrent la plupart des options pour manipuler des fichiers, transférer des données, et voir des graphiques et des tableaux. Les principaux types de résultats d'un calcul aux éléments finis sont les contraintes et les déformations. Par conséquent, ces deux aspects constituent la majeure partie du menu des résultats.

Lorsqu'un modèle géométrique complet est affiché, le menu principal est constitué de différents menus: File, Edit, View, Geometry, Deformations, Stresses, Window et Help.

**Le menu File :** Permet d'ouvrir le projet dont les résultats vont être affichés, Permet de fermer la fenêtre de résultats active, définir le répertoire où les fichiers de projet de PLAXIS seront stockés par défaut et Permet de quitter le programme....

**Le menu Edit :** Permet de copier les résultats en cours dans le presse-papiers de Windows, Permet de modifier l'échelle de la valeur présentée et Permet de modifier les intervalles choisis pour représenter le résultat avec des contours ou des dégradés iso valeurs.

**Le menu View :** Permet de zoomer sur une partie rectangulaire pour avoir une vue plus détaillée, Permet de restaurer la représentation d'origine, Permet de voir un tableau de valeurs numériques pour le résultat affiché et Permet de voir les informations de calcul relatives au pas de calcul présenté....

**Le menu Géométrie :** Permet d'afficher tous les éléments de structure dans le Modèle, afficher les couleurs des matériaux dans le modèle et Permet d'afficher les éléments de sol dans le modèle....

**Le menu Déformations :** contient diverses options qui permettent de visualiser les déplacements et les déformations du modèle aux éléments finis

**Le menu Stresses** : Le menu Stresses contient diverses options qui permettent de visualiser l'état de contraintes du modèle aux éléments finis.

### V.1.5 Le programme courbe (curves)

Ce programme contient toutes les options nécessaires pour générer des courbes charge déplacement, des chemins de contrainte et des courbes contraintes-déformations.

Après la sélection d'un projet existant, le graphique correspondant apparaît dans la fenêtre principale. La fenêtre principale du programme Curves contient les éléments suivants :

**Le menu des courbes** : Le menu des courbes contient toutes les options et les outils du programme Curves. Certaines options sont aussi accessibles par des boutons placés dans la barre d'outils.

**Les fenêtres des graphiques** : Ce sont les fenêtres dans lesquelles les graphiques sont affichés. Plusieurs fenêtres de graphiques peuvent être ouvertes simultanément et chaque graphique peut contenir jusqu'à un maximum de dix courbes.

**La barre d'outils** : Cette barre contient des boutons qui peuvent être utilisés comme raccourci des options du menu.

**Génération des courbes** : Une nouvelle courbe peut être générée en lançant le programme Curves ou en sélectionnant l'option New depuis le menu File. Le gestionnaire de fichiers apparaît alors et le projet pour lequel la courbe doit être générée doit être sélectionné.

Deux boîtes semblables avec différents éléments sont affichées, l'une pour l'axe x et l'autre pour l'axe y. En général, l'axe x correspond à l'axe horizontal et l'axe y à l'axe vertical.

### V.1.6 Les modèles du comportement du sol

Le comportement du sol est représenté par une loi qui l'assimile à un milieu continu. Cette loi souvent appelée « loi de comportement » décrit la relation entre les contraintes et les déformations provoquées par ces contraintes. Elle traduit, lorsqu'on passe d'un matériau à un autre, les différences de comportement constatées expérimentalement sous l'effet d'actions extérieures. PLAXIS 8.6 propose différents modèles, qui permettent de simuler le comportement d'un sol. Un commentaire rapide sur les modèles qu'on va utiliser dans cette étude.

### V.1.7 Modèle élastique linéaire

Ce modèle représente la loi de *Hooke* pour l'élasticité linéaire et isotrope. Il comporte deux paramètres de rigidité élastique, le module d'*Young*  $E$ , et le coefficient de *Poisson*  $\nu$ . Le

modèle linéaire élastique est très limité pour simuler le comportement d'un sol. Il est utilisé principalement pour des structures rigides massives placées dans le sol [3].

### V.1.8 Modèle de Mohr-Coulomb

Ce modèle bien connu est utilisé généralement comme une première approximation du comportement d'un sol. Il comporte cinq paramètres : le module d'Young  $E$ , le coefficient de Poisson  $\nu$ , la cohésion  $c$ , l'angle de frottement  $\varphi$ , et l'angle de dilatance  $\psi$ .

La dilatance d'un sable dépend de sa densité et de son angle de frottement. Pour des sables siliceux, un ordre de grandeur est  $\psi = \varphi - 30^\circ$ . Dans la plupart des cas, l'angle de dilatance est nul pour des valeurs de  $\varphi$  inférieures à  $30^\circ$ . Une valeur négative faible pour  $\psi$  n'est réaliste que pour des sables extrêmement lâches [1].

## V.2 Étude numérique du talus rocheux sur la RN 80 AU PK 66+800, et PK 67+300 entre Khezaras et Sedrata- Wilata de Guelma

### V.2.1 Introduction

Le diagnostic géologique et géotechnique mené par (SETS) [2] a permis d'analyser les phénomènes d'instabilités localisées et de recenser un nombre important d'évènements.

La synthèse des informations collectées a permis de diviser cette zone en trois sections. Il s'agit d'un talus rocheux sub vertical de 5 à 40 m de hauteur et d'une centaine de mètres de longueur (500 m). Il a été divisé en trois zones :

- 1 - la zone aval, de 5 à 15 m de hauteur sur environ 100 m de longueur, qui est très fracturée,
- 2 - la zone médiane, de 13 à 39.5 m de hauteur sur environ 300 m de longueur ; cette zone est fracturée et altérée,
- 3- la zone amont, de 11.08 à 39 m de hauteur sur environ 100 m de longueur, qui est inclinée à plus de  $45^\circ$  par rapport à l'horizontal ; cette zone est très fracturée et altérée

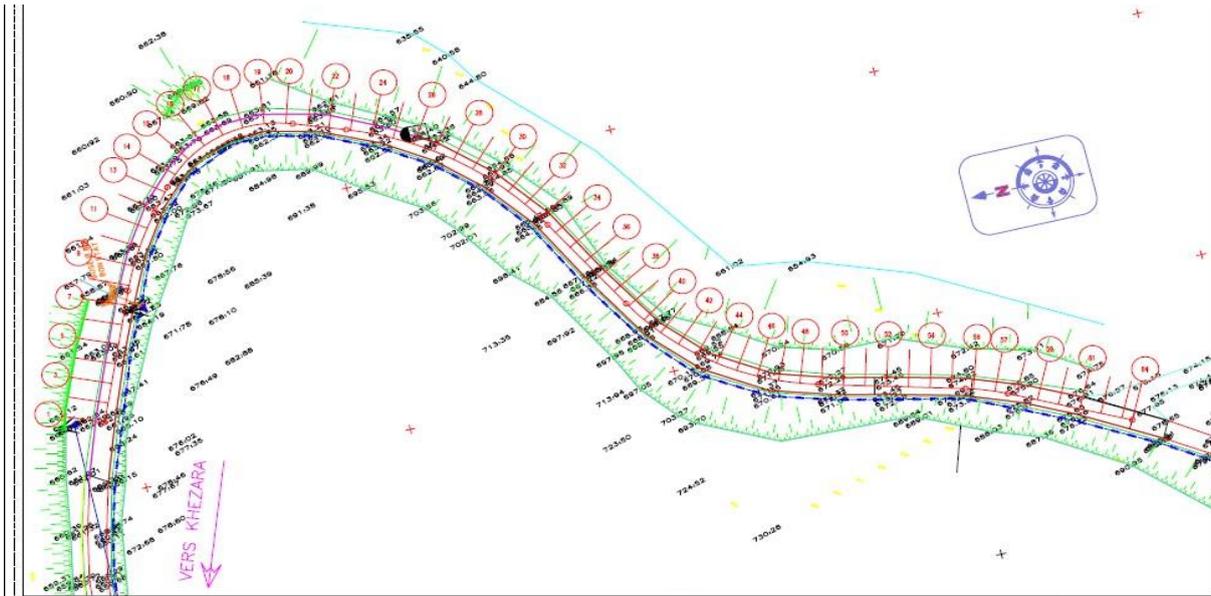


Figure V.3 Tracé en plan du projet d'étude [2].

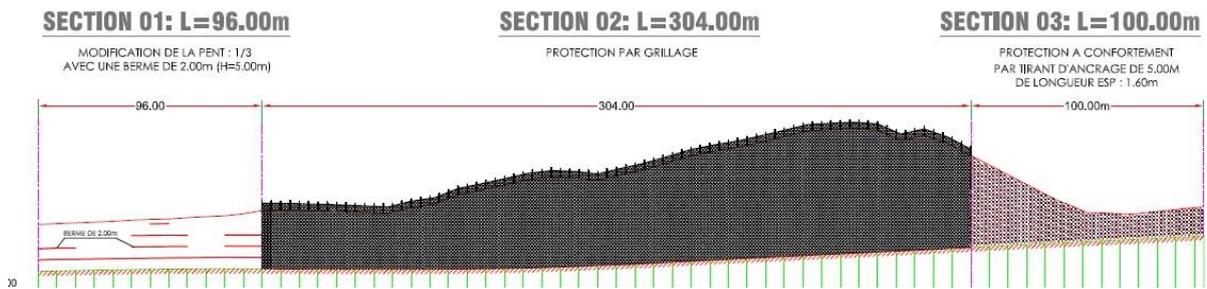


Figure V.4 profile de la section globale

V.2.2 Etude du profil de la section 03 de la route avant confortement

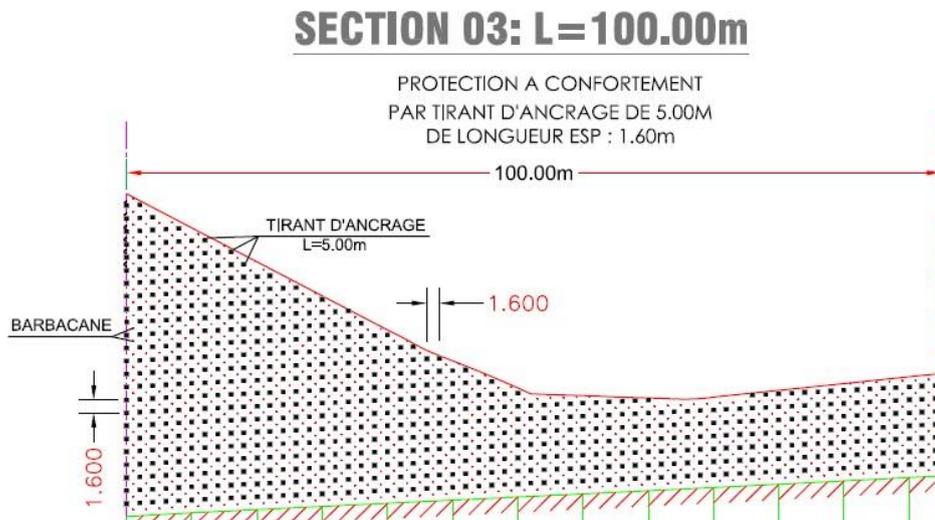
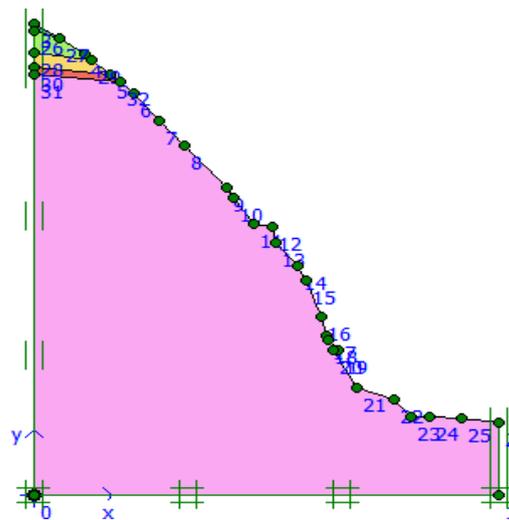


Figure V.5 Profil de la section 03 [2].

L'étude numérique a été effectuée au moyen du code Plaxis 8.6 [1]. Le profil de la section 03 a été modélisé avec des éléments triangulaire à 15 nœuds. Les différentes couches de sol constituant le profil a été modélisé avec le modèle élasto-plastique de Mohr-Coulomb (Tableau.V.1).

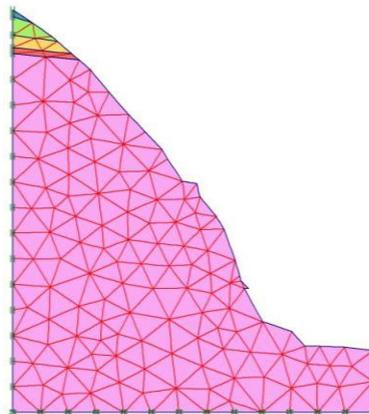
**Tableau.V.1** Profil de section 03

Couches de sol	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$E_M$ (MPa)	$\nu$
<b>Profond massifs rocheux</b>	26	360	37.1	$3.271 \cdot 10^4$	0.286
<b>Roche Assez dure</b>	26	350	36.1	$1.277 \cdot 10^4$	0.286
<b>Roche fissuré</b>	26	25	26.1	$8.177 \cdot 10^3$	0.286
<b>Roche tendre</b>	26	125	13.6	$1.356 \cdot 10^3$	0.387
<b>Couches sup</b>	26	75	8.6	$7.353 \cdot 10^2$	0.287



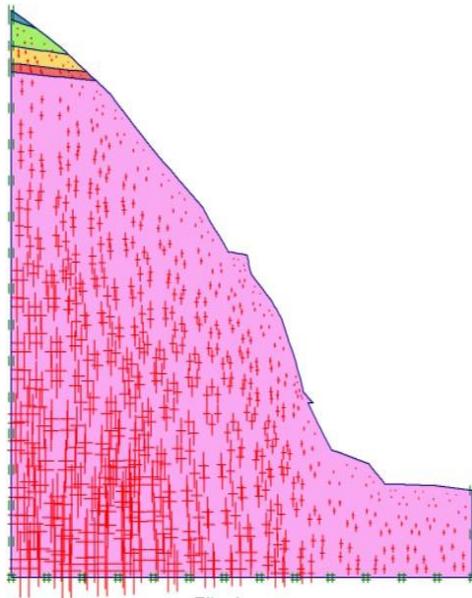
**Figure V.6** Modèle d'éléments finis du profil de la section 03

- **Le Maillage**



**Figure. V.7** La génération du maillage

- **Conditions initiales**



*Figure. V.8 Contraintes initiales*

- **Les phases de calcul**

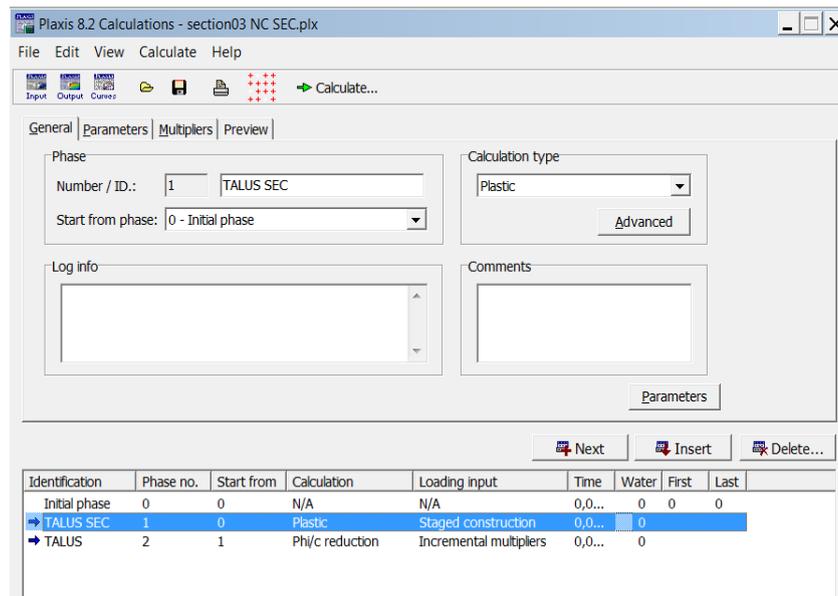


Figure. V.9 Les phases de calculs

### V.2.3 Présentation des résultats du calcul du talus section 03

- Maillage déformé

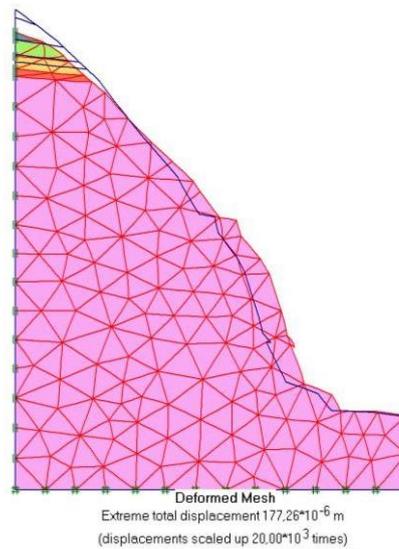
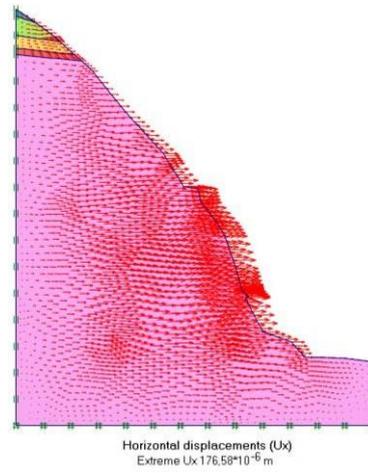
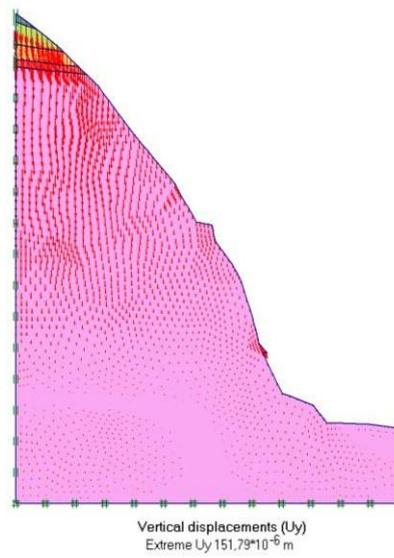


Figure. V.10 Maillage déformé du profil non conforté

- Les déplacements



**Figure V.11** Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus rocheux cas sec



**Figure V.12** Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus rocheux non conforté à sec

- Les contraintes

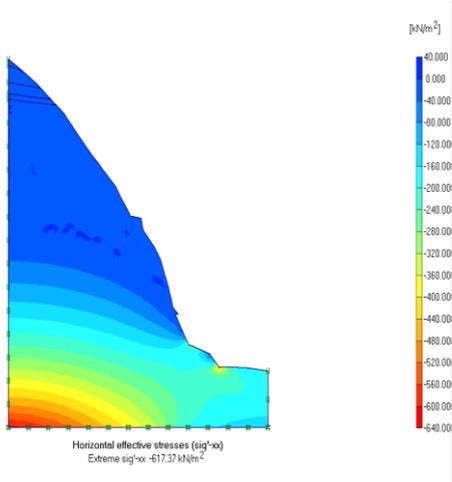


Figure V.13 Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) du talus rocheux non conforté à sec

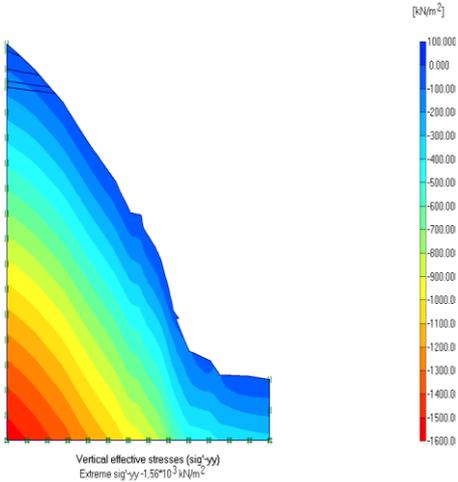


Figure V.14 Contraintes verticales ( $\sigma_{yy}$ ) du talus rocheux non conforté à sec

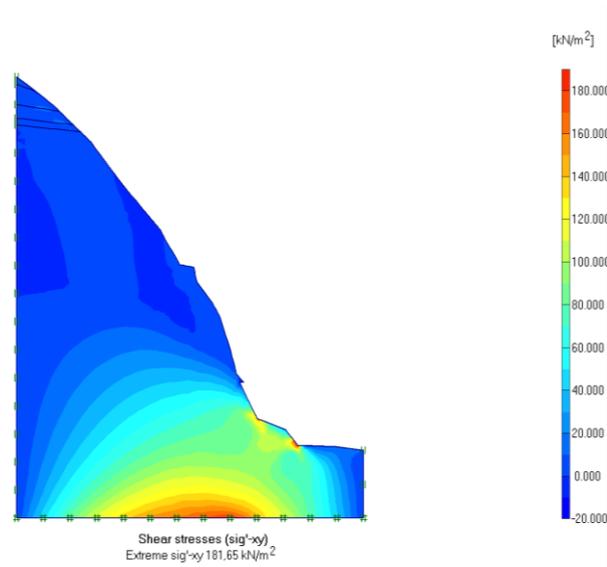


Figure V.15 Contraintes tangentielles ( $\tau_{xy}$ ) du talus rocheux non conforté à sec

## V.2.4 Etude du profil de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage

### V.2.4.1 Etude du profil de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage à sec

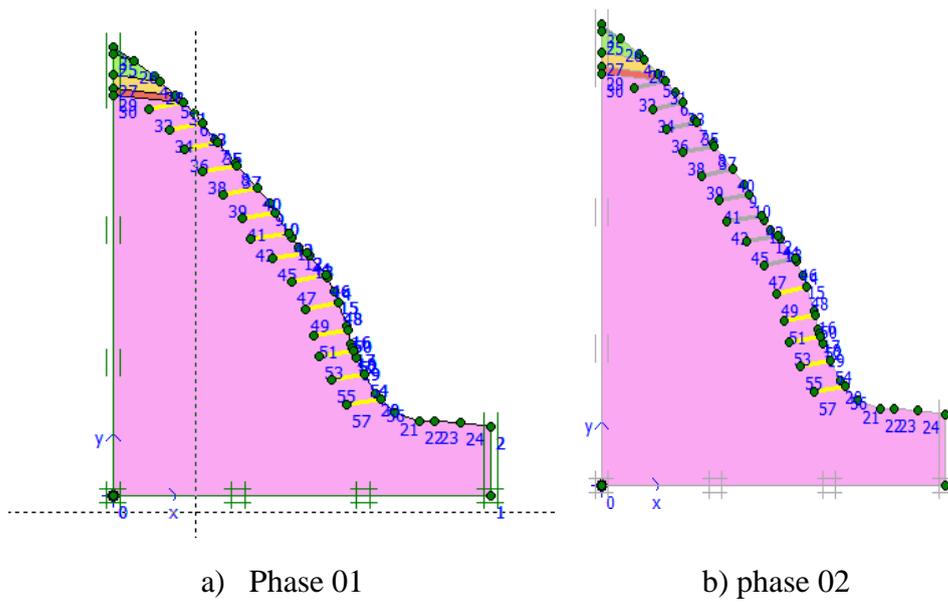
L'ensemble des propositions de traitements, associés à un descriptif détaillé, sont présentés ci après :

1. **Purge légère (P.L)** ; elle s'effectue à la main sur 0.5 m d'épaisseur.
2. **Purge mécanique (P.L.)** ; elle consiste à faire tomber une masse rocheuse importante (de 1 à plusieurs m)
3. **Béton projeté (BP)** ; Ecran de béton projeté pour empêcher l'altération des roches sur une épaisseur de 12 cm (trois couche ; 3/6/6)
4. **Treillis soudé (TRs)** ; Ce treillis est constitué de fil 05 mm en maille de 100 par 100 mm
5. **Boulonnage (ancrages passifs B)** ; Il consiste à insérer dans le massif rocheux une barre d'acier HA de longueur 5m incliné de 10°. les ancrages sont représentés dans plaxis par des géogrilles dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau V.2
6. **Drainage par barbacane** ; en PVC DE 60 mm longueur de 1.00 mètre

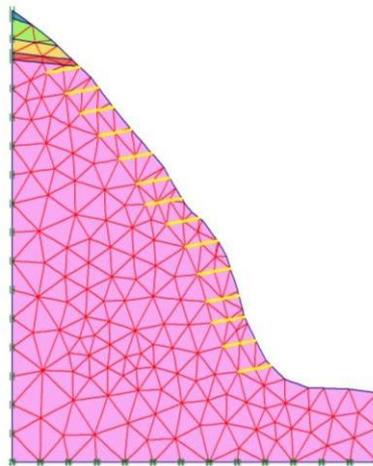
Tableau V.2 Propriétés des ancrages

Paramètre	Symbole	valeur	Unite
Type de comportement	type de matériaux	Elastique	-
Rigidité normale	EA	9.088*10 <sup>5</sup>	[kN/m]

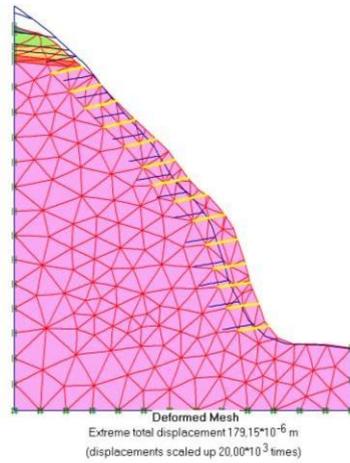
## Présentation du modèle conforté par phase



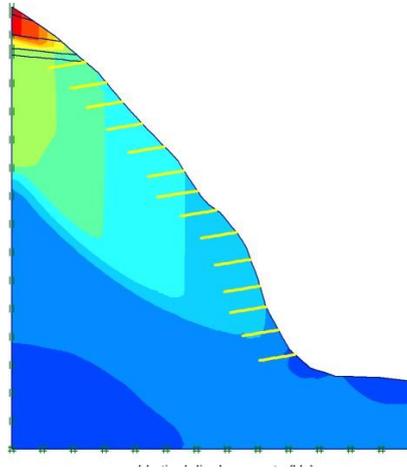
**Figure V.16** Le modèle du profil de la section 03 conforté par tirant d'ancrage



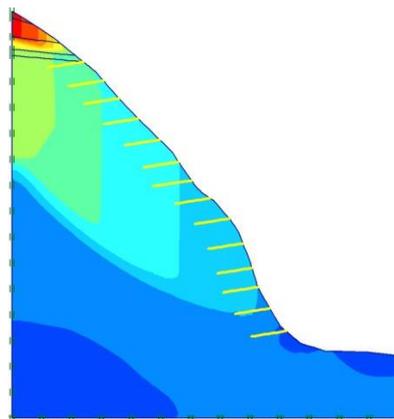
**Figure. V.17** La génération du maillage du profil 03 conforté



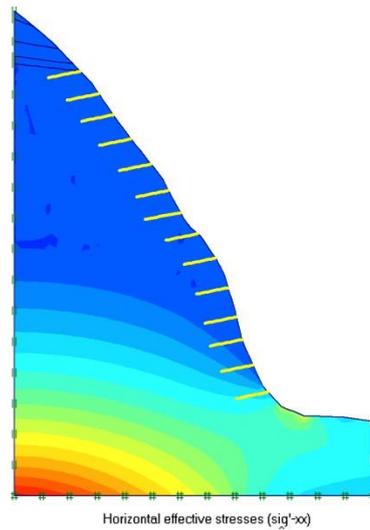
**Figure. V.18** Maillage déformé du profil conforté



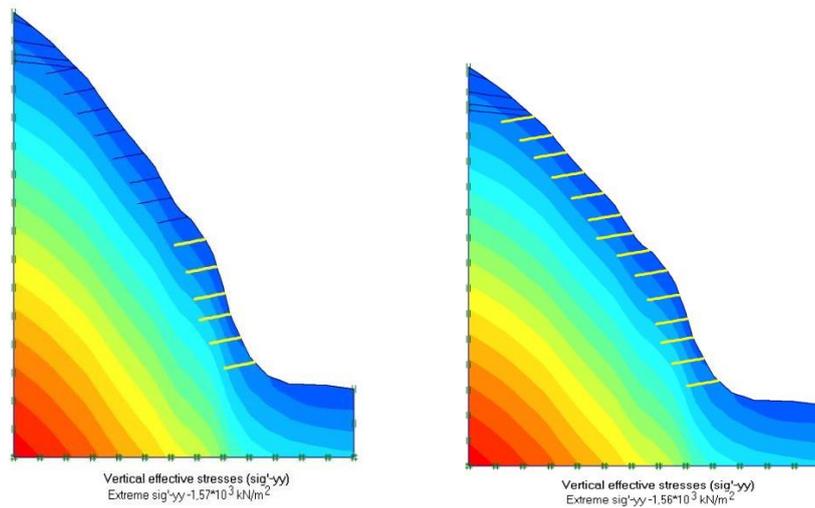
**Figure V.19** Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus rocheux cas renforcement par tirant d'ancrage à sec



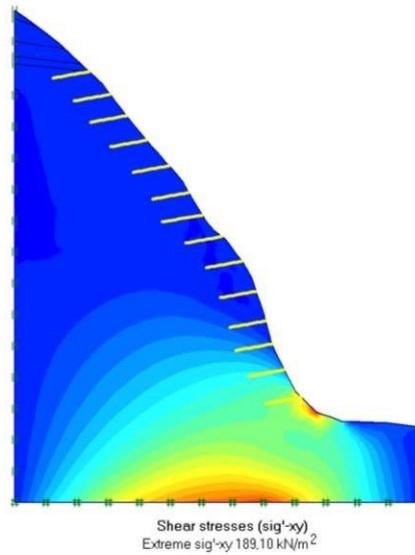
**Figure V.20** Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus rocheux cas confortement total à sec



**Figure V.21** Contraintes horizontal ( $\sigma_{xx}$ ) du talus rocheux cas conforté par tirant d'ancrage à sec

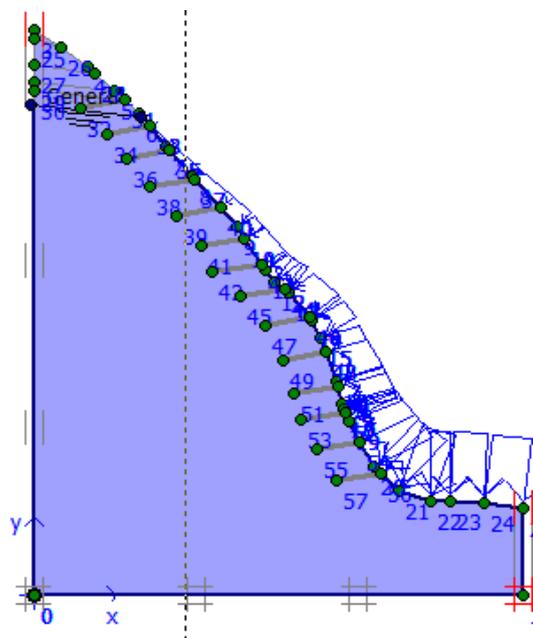


**Figure V.22** Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus rocheux cas conforté sec  
 a) Renforcement par tirant phase 01b) Renforcement par tirant phase 02



**Figure V.23** Contraintes tangentielles ( $\tau_{xy}$ ) du talus rocheux conforté à sec

**V.2.4.2 Etude du profil de la section 03 après renforcement par tirant d'ancrage avec nappe**



**Figure V.24** le modèle du talus section 03 avec nappe phréatique

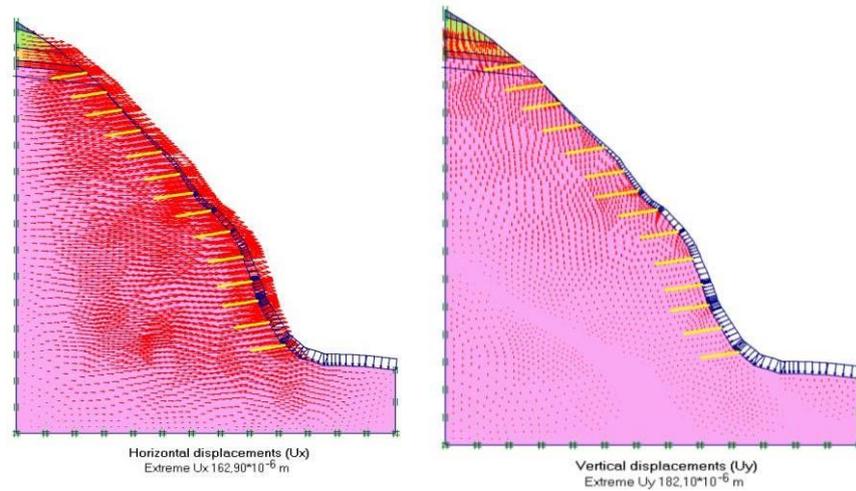


Figure V.25 Déplacements horizontaux et verticaux du talus section 03 conforté avec nappe phréatique

Tableau V.3 Bilan des résultats de la section 03

Talus Résultats	$U_x$ (m) *10 <sup>-6</sup>	$U_y$ (m) *10 <sup>-6</sup>	$\sigma_{xx}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{yy}$ (kN/m <sup>2</sup> ) *10 <sup>3</sup>	$\tau_{xy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fs
Non conf sec	176.58	151.79	2.36*10 <sup>-3</sup>	1.28	2.46*10 <sup>-3</sup>	0.7006
Phase 01 conf sec	176.47	146.25	617.72	1.57	187.70	2.453
Phase final conf sec	176.59	149.71	617.64	1.57	187.78	2.456
Conforté avec nappe	162,9	182,1	430,13	1,09* 10 <sup>3</sup>	167 ,27	2,361

V.2.4.3 Etude du profil de la section 01 avant confortement du talus à sec

En section 01 (Pk 66+800 - PK66 +900) ; il a été proposé de modifier le talus par la technique de talutage avec des banquettes (Allègement en tête) avec la purge des éléments instables détectés en amont de la falaise.

Tableau.V.4 profile de section 03

Couches de sol	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\varphi'$ (°)	$E_M$ (MPa)	$\nu$
Massif Rocheux	26	36	37.1	1.860*10 <sup>4</sup>	0.286
Roche fissure	26	25	26	8.132*10 <sup>3</sup>	0.288
Couche superficielle	26	75	8.6	1.307*10 <sup>3</sup>	0.287

## V.3 Présentation des résultats

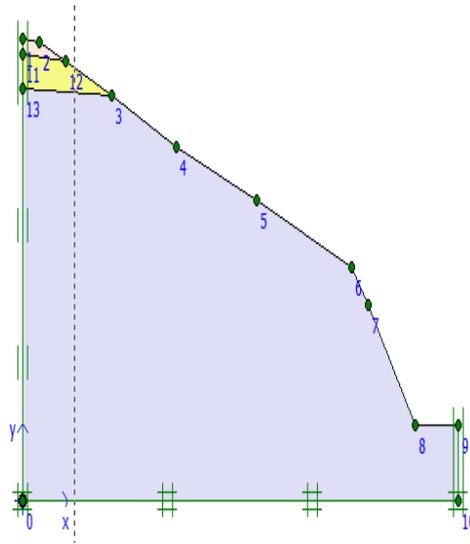


Figure V.26 Le modèle du profil de la section 01 de la route

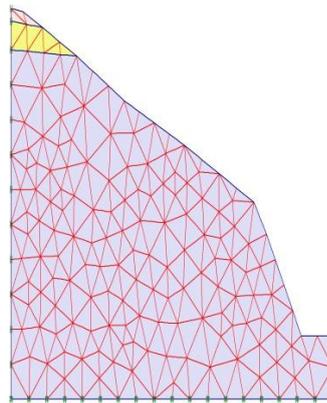


Figure V.27 Le maillage initial du modèle du modèle

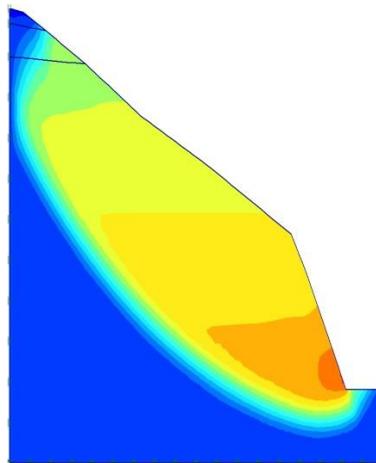
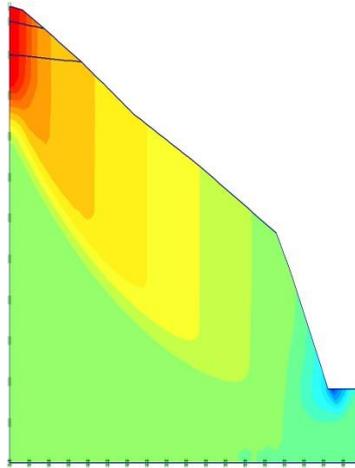
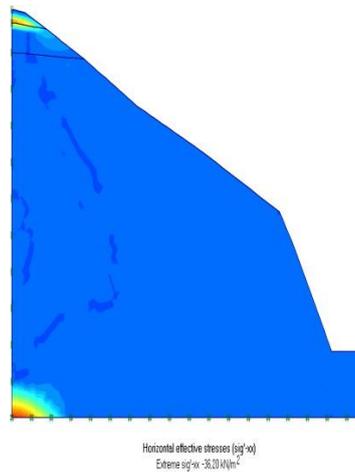


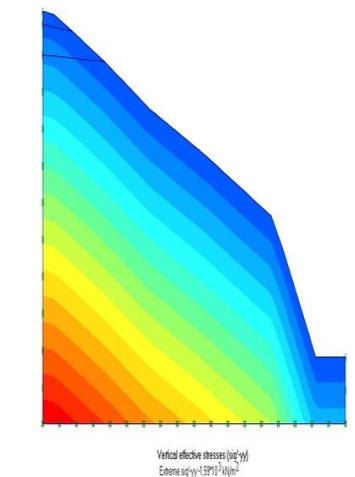
Figure V.28 Déplacement horizontal ( $U_x$ ) du talus section 01 avant confortement à sec



**Figure V.29** Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 avant confortement à sec



**Figure V.30** Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) du talus section 01 non conforté à sec



**Figure V.31** Contraintes verticales ( $\sigma_{yy}$ ) du talus section 01 non conforté à sec

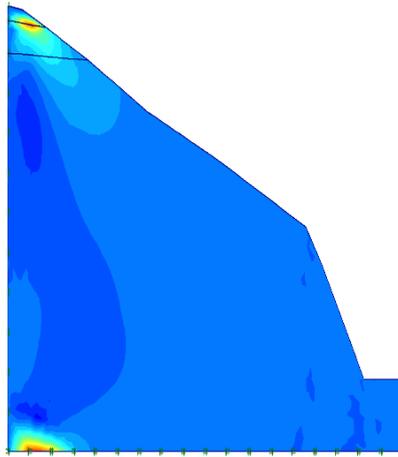


Figure V.32 Contraintes tangentielle ( $\tau_{yy}$ ) du talus section 01 non conforté à sec

### V.3.1 Etude du profil de la section 01 avant confortement du talus cas nappe phréatique

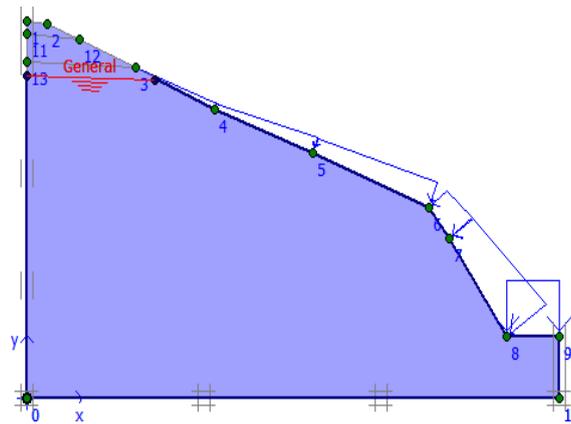
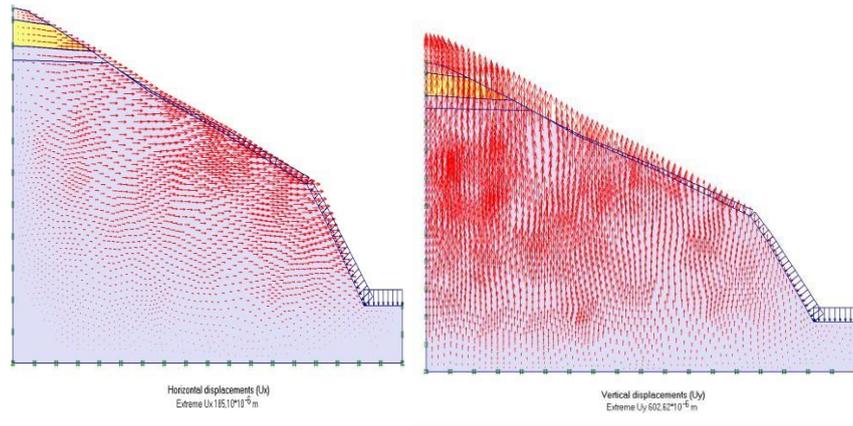
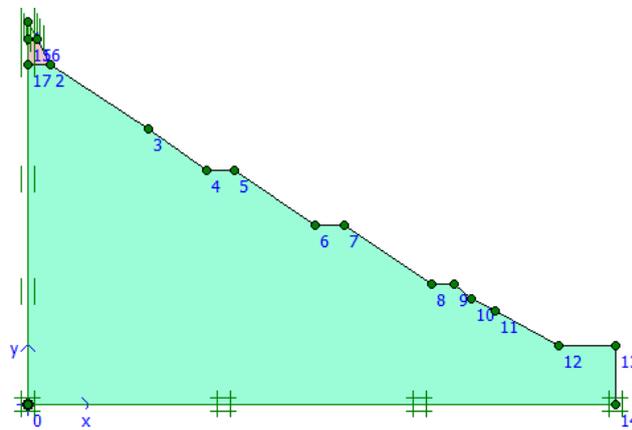


Figure V.33 Le modèle du talus section 01 avec nappe phréatique

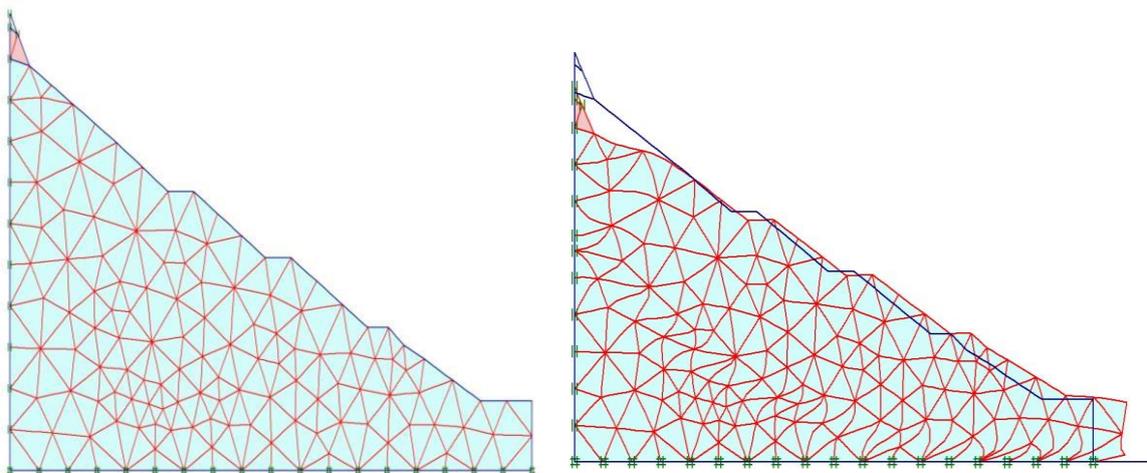


**Figure V.34** Déplacements horizontaux et verticaux du talus section 01 avant avec nappe

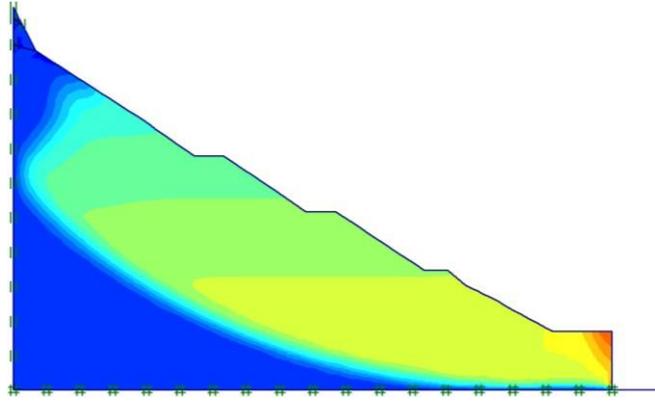
**V.3.2 Etude du profil de la section 01 après confortement du talus**



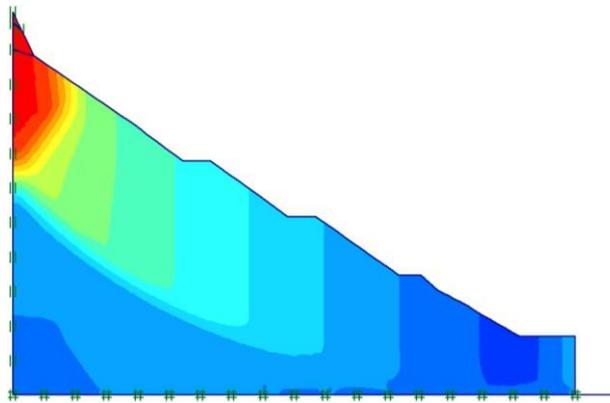
**Figure V.35** Le modèle du profil de la section 01 après confortement à sec



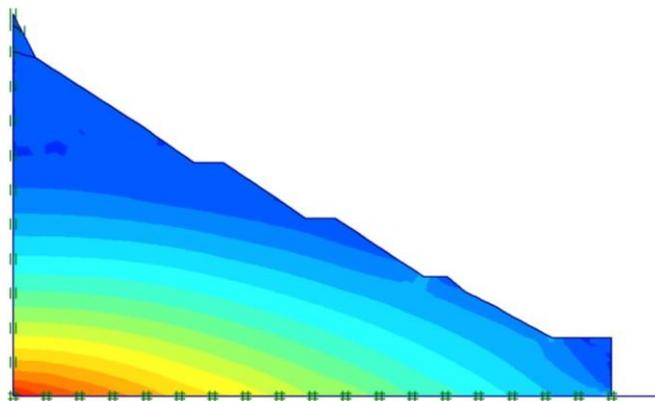
**Figure V.36** maillage initial du modèle et déforme du talus section 01



*Figure V.37 Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 après confortement à sec*



*Figure V.38 Déplacement vertical ( $U_y$ ) du talus section 01 après confortement à sec*



*Figure V.39 Contraintes horizontales ( $\sigma_{xx}$ ) du talus section 01 conforté à sec*

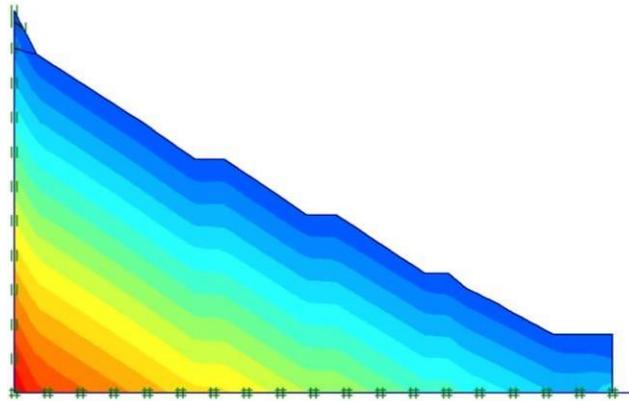


Figure V.40 Contraintes vertical ( $\sigma_{yy}$ ) du talus section 01 conforté à sec

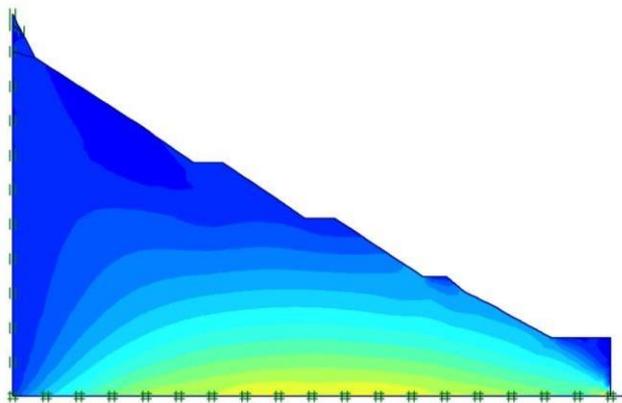


Figure V.41 Contraintes tangentielle ( $\tau_{xy}$ ) du talus section 01 conforté à sec

Tableau V.4 Bilan des résultats de la section 01

Talus Résultats	$U_x$ (m)* $10^{-6}$	$U_y$ (m) * $10^{-6}$	$\sigma_{xx}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{yy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau_{xy}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Fs
Profil 01 Non conf sec	55,45	4,84	36,20	1,59*10 <sup>3</sup>	7,85	3,85
Profil 01 Non conf (Nape)	185,10	502,12	60,61	1,16*10 <sup>3</sup>	24,85	1,00
Profil 01 conf sec	227,56	153,56	650,16	1,59*10 <sup>3</sup>	160,84	3,786

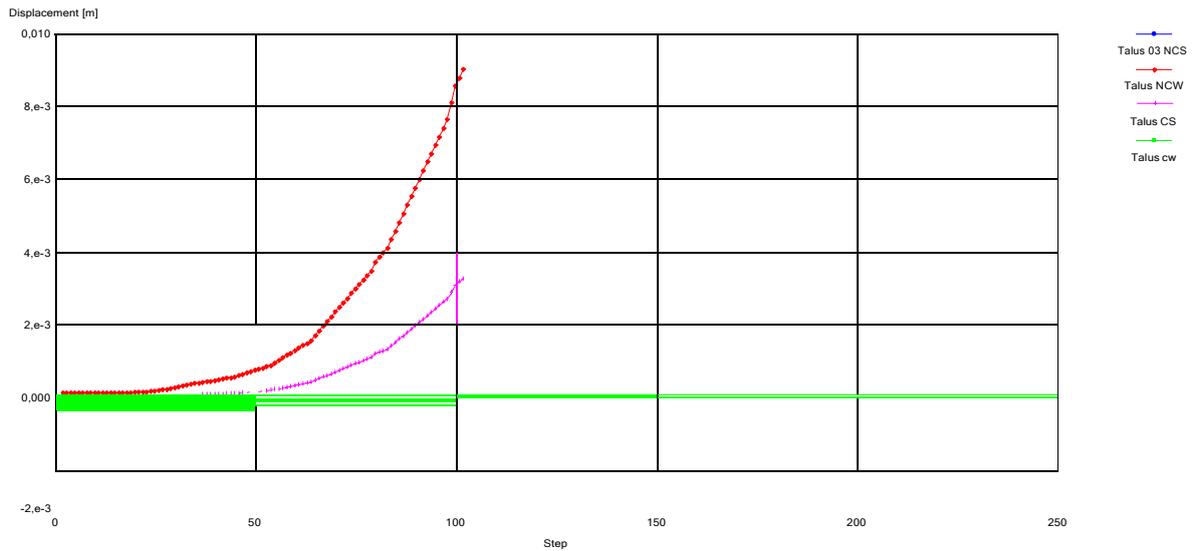


Figure V.42 Déplacements horizontaux dans le talus section 03 : cas non conforté à sec et avec nappe

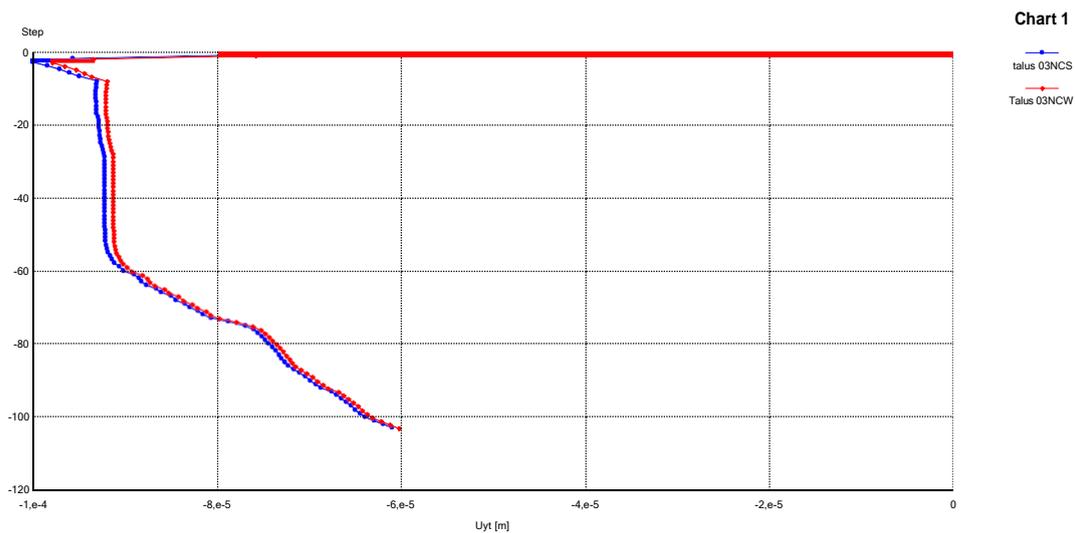
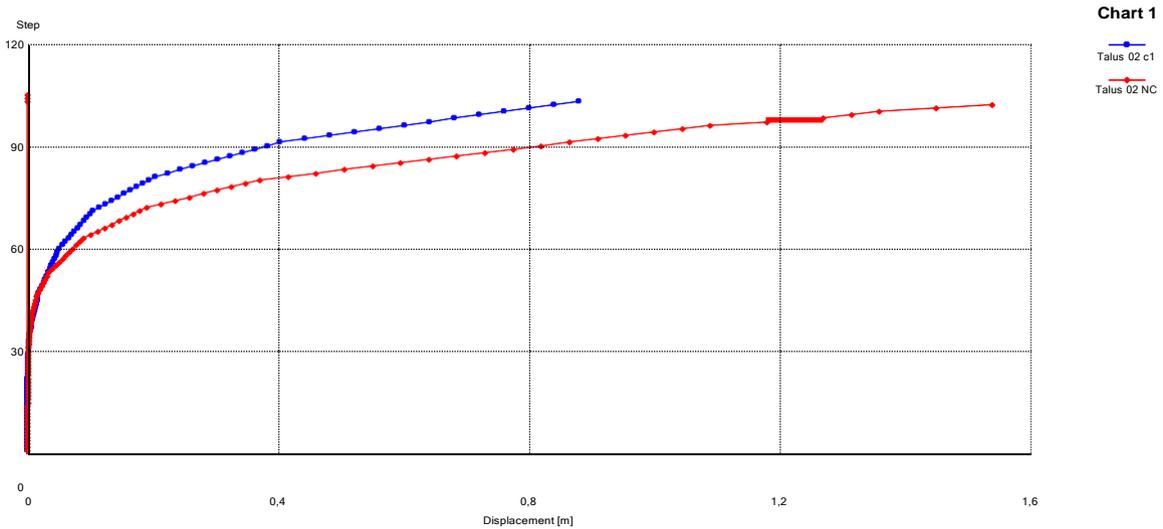
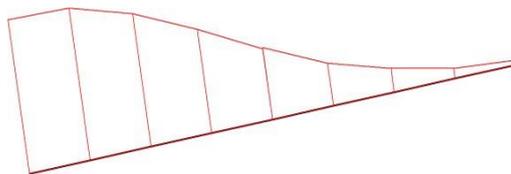


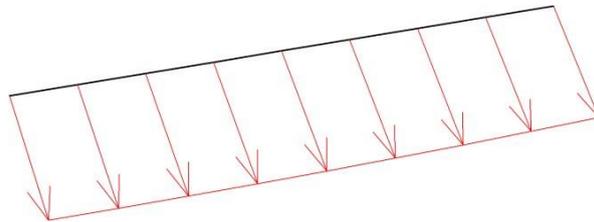
Figure V.43 Les déplacements verticaux dans le talus section 03 : cas non conforté à sec et avec nappe



*Figure V.44 Les déplacements Total dans le talus section 01 : cas non conforté et non conforté nappe*



*Figure V.45 Force axiale dans le tirant d'ancrage*



*Figure V.46 déplacement total dans le tirant d'ancrage*

#### V.4 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que:

- ✚ D'après la figure V.41, les déplacements horizontaux ont considérablement diminués après confortement du talus avec des tirants d'ancrage
- ✚ D'après la figure V.42, les déplacements verticaux ont légèrement augmenté dans le talus 03 conforté avec (TA) en pressens d'eau

- ✚ D'après la figure V.43, les déplacements total ont diminués après le talutage du talus dela section 01
- ✚ Une amélioration au niveau des coefficients de sécurité dans le cas du confortementpar ancrage passifs au niveau du talus rocheux 03
- ✚ Le confortement du talus de la section 03 par tirant d'ancrage est efficace .
- ✚ L'effet de l'augmentation dans le niveau de la nappe phréatique augmente lesdéplacements horizontaux at verticaux.
- ✚ L'opération de talutage dans le profil de la section 01 a diminuer les déplacementsverticaux.
- ✚ L'augmentation de la nappe phréatique a entrainé une diminution du coefficient desécurité

### **V.5 Référence bibliographie du cinquième chapitre**

[1] *Brinkgreve, R. B. J., Manuel de Référence de PLAXIS Version 8.6 : Delft University of Technology, Delft, Netherlands, and PLAXIS BV, Pays-Bas, Netherlands, (2003).*

[2].*Rapport technique de la société d'études techniques de setif (S.E.T.S)*

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les éboulements rocheux représentent un danger majeur qui doit impérativement être pris en compte dans les régions montagneuses (est de l'Algérie; falaises, routes montagneuses...). L'évaluation des éboulements repose sur les raisonnements géologiques (structural, morphologie, lithologie, ...), et mécaniques (géométrie des discontinuités, numériques, ...),

Les éboulements rocheux sont des phénomènes rapides et événementiels, qui mobilisent des blocs de roches plus ou moins homogènes. Le terme d'éboulement rocheux désigne un mouvement d'une masse rocheuse, dans lequel les blocs ne se déplacent pas seulement en glissant, mais peuvent aussi tomber en chute libre, glisser, rebondir, ou rouler.

La stabilité des versants rocheux est un problème complexe et dynamique qui nécessite une analyse approfondie et une approche proactive pour la gestion des risques. Les connaissances géologiques, géotechniques et l'expertise en gestion des risques naturels sont essentielles pour évaluer les dangers potentiels, mettre en place des mesures de prévention appropriées et assurer la sécurité des personnes et des infrastructures situées à proximité de ces versants rocheux.

Le confortement des massifs rocheux joue un rôle important dans la gestion des risques géotechniques et la sécurité des infrastructures et des zones exposées à l'instabilité des roches. Il contribue à améliorer la stabilité et la résistance des massifs rocheux, permettant ainsi de réduire les risques pour les personnes et les biens.

Le tronçon de la route objet de l'étude fait partie de la RN 80, il est situé entre le PK 66+800 et le PK 67+300. L'objet de la présente étude consiste à proposer des solutions de confortement adéquat impliquant des mesures d'amélioration du talus rocheux et de confortement des déblais instables, réduire l'amplitude des instabilités, assurer la stabilité des talus vis-à-vis au chute des pierres et blocs et par conséquent améliorer le confort de conduite par tout temps.

Dans le but d'atteindre ces objectifs et vérifier l'efficacité du confortement proposé, une étude numérique au moyen du logiciel Plaxis 8.6 a été réalisée sur la première et la troisième section

du talus rocheux se trouvant en amont de la route (RN80). L'étude paramétrique a été effectuée, en faisant varier le niveau de la nappe phréatique dans les deux sections 01 et 03 avant et après confortement.

Les principaux résultats obtenus sont :

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que:

- Les déplacements horizontaux ont considérablement diminués après confortement du talus 03 avec des tirant d'ancrage
- Les déplacements verticaux ont légèrement augmenté dans le talus 03 conforté avec (TA) en pressens d'eau
- D'après la figure V.43, les déplacements totaux ont diminués après le talutage du talus de la section 01
- On remarque une amélioration au niveau des coefficients de sécurité dans le cas du confortement par ancrage passifs au niveau du talus rocheux 03
- Le confortement du talus de la section 03 par tirant d'ancrage est efficace .
- L'augmentation dans le niveau de la nappe phréatique augmente les déplacements horizontaux at verticaux.
- L'opération de talutage dans le profil de la section 01 a diminué les déplacements verticaux.
- L'augmentation de la nappe phréatique a entraîné une diminution du coefficient de sécurité