



École d'ingénieurs  
de l'Ecologie, de l'Energie,  
du Développement Durable  
et de la Mer

École Nationale  
des Travaux Publics  
de l'État

rue Maurice Audin  
69518 Vaulx-en-Velin Cedex

téléphone :  
+33 (0)4 72 04 70 70

télécopie :  
+33 (0)4 72 04 62 54

<http://www.entpe.fr>

# Mécanique des sols

## Pentes rocheuses

**Article 1 : *A methodological approach to assessing long term deformation of the excavated rock slopes of the permanent shiplock at the Three Gorges Dam (China)*,  
FLEURISSON, COJEAN et al., 2005**

**Article 2 : *Man Made Slope Deformation Analysis at the Site K108 on Jingzhu Freeway Near Shaoguang*,  
CHEN et al., 2005**

**Article 3 : *Utilisation des classifications de massifs rocheux pour l'analyse du comportement de pentes. Présentation de deux cas d'application*,  
MERRIEN-SOUKATCHOFF, GUNZBURGER, 2002**

**Annexe D : Méthodes de classification des masses rocheuses fracturées,  
<http://tel.archives-ouvertes.fr/docs/00/04/66/27/HTML/AnnexeD-metho-des-de-classification.pdf>**

**BARON Nils**

**JACOTOT LAURENT**

**22 avril 2013**

Promotion 59

## Introduction

---

Dans le cadre du cours de mécanique des sols, nous avons étudié trois articles issus de publications scientifiques dont le sujet portait sur les pentes rocheuses. Nous proposons ici de faire un résumé de ces articles, en y ajoutant des commentaires personnels.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons aux deux premiers articles qui portent sur les déplacements à long terme de pentes rocheuses. Le premier utilise une méthode mathématique itérative qui permet de modéliser la pente au mieux possible, afin d'anticiper les déplacements à long terme tandis que le deuxième présente l'insuffisance d'études préalable ce qui a conduit à des retards sur l'achèvement de l'ouvrage. Dans un second temps nous présenterons le troisième article qui traite de l'application de différentes méthodes de classification de pentes rocheuses.

## Synthèse

---

**Article 1** : *A methodological approach to assessing long term deformation of the excavated rock slopes of the permanent shiplock at the Three Gorges Dam (China)*

Cet article a été écrit par un groupe de scientifiques français des Mines de Paris en 2005. Il s'intéresse aux déplacements à long terme engendrés par l'excavation d'une pente rocheuse, lors de la construction de l'écluse du barrage des Trois Gorges en Chine et présente une méthodologie pour s'approcher au mieux de ces déplacements.

**Article 2** : *Man Made Slope Deformation Analysis at the Site K108 on Jingzhu Freeway Near Shaoguang*

Cet article a été écrit par des ingénieurs de l'université Jilin de Chanchun en Chine en 2005. Il s'intéresse à un problème rencontré lors de la construction d'une voie rapide en Chine. Cette route passant dans une zone montagneuse, peut difficilement rester rectiligne sans altérer le relief. Dans une zone où le tracé impose d'excaver un morceau de pente rocheuse, la construction a rencontré des problèmes de stabilité. L'article décrit les études menées à posteriori et ainsi que les solutions apportées.

Pour des questions de facilité de compréhension, les différents sites seront appelés :

- site 1 : pour le site de l'article 1 (le barrage des Trois Gorges en Chine)
- site 2 : pour le site de l'article 2 (la voie rapide proche de Shaoguang)

## Contextes géologiques

Les sites ont des contextes géologiques différents.

Le premier site accueille deux couloirs d'écluses de 60 mètres de haut pour 25 mètres de large chacun espacés de 60 mètres, et pour les insérer dans le relief existant il a fallu excaver jusqu'à 170 mètres de profondeurs. La pente moyenne engendrée est de 65°.

La stabilité de l'ouvrage et l'évolution de la déformation des deux couloirs sont les problèmes rencontrés dans la construction, notamment pour les portes des écluses qui sont très sensibles aux variations de largeurs des couloirs.

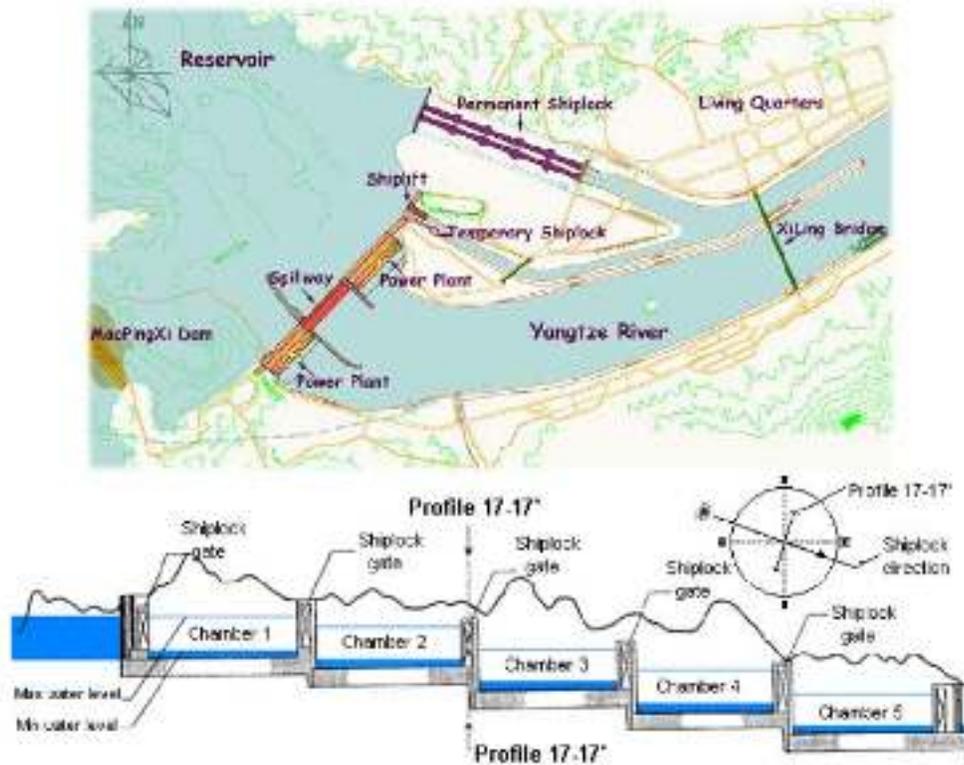


Figure 1: Vue générale du barrage

Le sol est composé de plusieurs couches différentes :

- une couche supérieure de granite fortement altéré, voire du sable granitaire
- une seconde couche de granite altéré
- une troisième couche de granite légèrement altéré composée elle-même d'une couche supérieure et d'une couche inférieure
- et enfin une couche inférieure de granite très peu altéré et de granite sain.

Le deuxième site est une pente rocheuse qui doit être excavée pour accueillir une voie rapide. Une étude géologique montre la présence de plusieurs défauts dans le sol, avec notamment quatre fissures traversant le site dans le sens NE-SO. Une deuxième information importante sur ce site est son état hydrologique. Des forages sont effectués et les résultats obtenus ne sont pas convaincant dans la mesure où des valeurs différentes sont trouvées

pour des zones de 0,1 m<sup>2</sup>. Cela s'explique avec la présence des fissures sur le site qui facilite la circulation de l'eau. Les conclusions tirées sont que l'eau circule dans le sens des fissures NE vers SO, avec un débit et une vitesse faible.

## *Dispositifs de stabilisation*

Pour le site 1, des dispositifs différents sont mis en place pour chaque couche. Pour les couches supérieures les pentes sont plus faibles (45°), et plus on descend dans les couches inférieures, plus les épaisseurs de béton grandissent pour résister à la pression subie par les parois. Des dispositifs d'ancrages apparaissent aussi en descendant tels que des boulons d'ancrage ou alors des câbles d'acier à haute résistance prétendus.

De nombreux instruments de mesure sont aussi placés sur le relief, inclinomètres, piézomètres, extensomètres, ainsi que des repères topographiques (pour mesurer les déplacements de surface).

A l'origine sur le site 2, la pente avait une inclinaison de 15°, mais après les travaux, la pente est maintenant de 17° à 20° et est constituée de sept bancs consécutifs pour la stabiliser.

La première solution était la mise en place de boulons d'ancrage, de câbles d'ancrage ainsi que de pieux verticaux pour résister au glissement mais ces solutions n'ont pas été suffisantes et de nouvelles analyses ont été menées. En effet, d'importantes déformations ont été observées ce qui a retardé la fin des travaux et d'autres méthodes de renforcement ont dû être utilisées pour sécuriser et stabiliser l'ouvrage.

## *Déplacements observés, stabilité*

L'analyse de stabilité de la pente sur le site 1 est menée grâce à une méthode développée par le CGI. Elle permet d'évaluer les mécanismes de rupture potentiels ainsi que les volumes potentiellement instables et de déterminer un facteur de sureté. Les calculs se font à cinq états hydrauliques différents : un complètement drainé et quatre autres avec différents pourcentages d'eau. Cette méthode s'applique en faisant une moyenne des paramètres géologiques de la zone, ce qui peut amener à de grandes erreurs. Le facteur de sécurité représente le pourcentage d'erreurs sur les résultats obtenus. Ces études s'appuient aussi sur les discontinuités et sur leur orientation dans le sol.

Les résultats montrent que les murs verticaux sud et nord présentent le plus de risques. Cela justifie l'installation de dispositifs de renforcement installés sur les parois verticales de l'écluse.

Le rôle important de l'eau est mis en valeur par ces études, avec des facteurs de sécurité qui varient de 25%.

Enfin des tests de simulation de séismes sont menés. Les risques liés à ce phénomène sont bien moindre lorsque les discontinuités sont sèches et correctement drainées. Le facteur de sécurité peut alors descendre à 15 ou 30%.

Après la construction en 1998, 13 fissures de tensions sont apparues dans le béton sur le site 2. Ces fissures sont présentes sur tous les bancs, ce qui indique que le site contient plusieurs surfaces de glissement et non pas une seule. La masse en glissement atteint les 30 mètres de profondeurs.

Des méthodes de mesures sont nécessaires pour mieux comprendre ce glissement. Des pieux de 25 mètres de long sont disposés dans la pente mais comme leur extrémité est encore dans le volume en déplacement, les résultats obtenus ne sont pas concluants. Des câbles ont aussi été scellés dans la pente mais l'injection de boue a modifié un peu plus le sol ce qui a provoqué l'apparition de nouvelles fissures

L'administrateur du projet a alors décidé de faire des rapports de suivi. Ces rapports contiennent le déplacement de la surface, le développement des fissures, le déplacement en fonction de la profondeur, les efforts en fonction de la profondeur, la direction de déplacement.

A partir de ces résultats, au moins trois différentes couches de glissement sont identifiées en plus de la principale qui est à 30 mètres de profondeur : à 5 ; 15 et 23 mètres.

### *Problème des déplacements sur le long terme*

Dans le cas du site 1, les calculs de déplacements sur le long terme sont faits avec une méthode modélisant le milieu par un milieu continu à deux dimensions, contenant quelques discontinuités. L'objectif est de voir le comportement suite à l'excavation mais surtout le comportement à long terme de la zone. Les paramètres géologiques sont difficiles à déterminer. C'est pourquoi une méthode itérative numérique est utilisée pour se rapprocher au maximum des coefficients réels du milieu.

Le modèle pris pour les calculs est un modèle d'éléments finis, il représente une zone de 1000m sur 3000m, et il est divisé en près de 57000 éléments composés de 4 zones chacun.

La première modélisation se fait avec le modèle de Mohr-Coulomb, puis il évolue vers un modèle elastoplastique de Hoek-Brown puis, pour finir, les renforcements mécaniques placés sur la zone sont intégrés au modèle.

Ce modèle se rapproche de la réalité comme on peut le voir sur la figure ci-dessous, en rouge le déplacement réel, et en bleu le déplacement calculé.

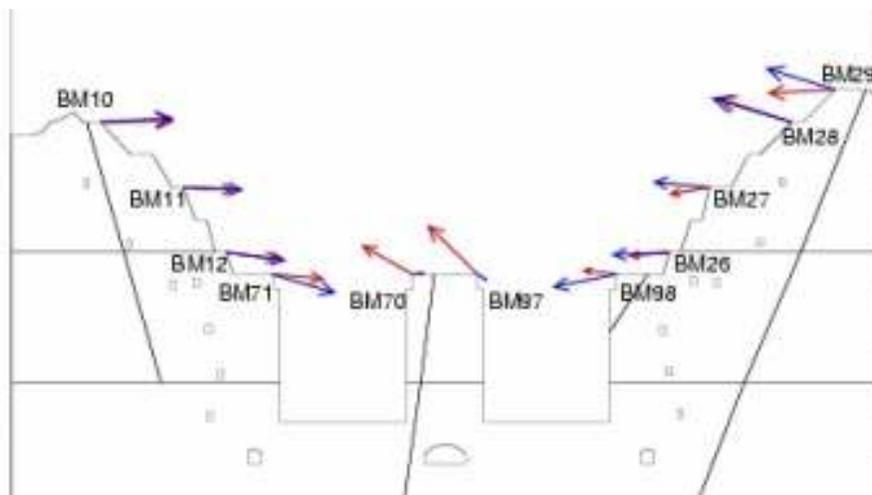


Figure 2 : Déplacement réel et déplacement calculés sur le profil

Le modèle est donc fidèle pour une grande partie de la zone, mais pas sur la partie séparant les deux couloirs d'écluse.

Pour les déplacements à long terme, un autre modèle est mis en place, le modèle visco-elasto-plastique de Burger. Ce modèle permet de calculer les déplacements aux différents points de mesures (BM). Ce modèle est alors bien plus fidèle à la réalité, ce qui montre l'importance de la viscosité lorsqu'on s'intéresse au comportement à long terme.

Pour le site 2, les déplacements à long terme ont été aggravés lors des multiples altérations faites par les travaux. En effet, le glissement est d'abord dû à l'excavation de matière au pied de la pente mais l'injection d'eau dans la roche argileuse a fait gonfler le sol, ce qui a entraîné l'apparition de fissures supplémentaires. La méthode de stabilisation n'était pas adéquate pour ce site et d'autres études auraient dû être mises en place. De plus l'injection d'eau à haute pression dans le sol a encore plus altéré les roches présentes et la résistance du sol au glissement s'est vue diminuer.

La tentative de renforcement à court terme a mené à la fragilisation de la pente sur le long terme.

## **Conclusion**

Pour connaître les déformations d'une pente rocheuse sur le long terme, il faut savoir identifier de nombreux facteurs mécaniques, géologiques, lithologiques, hydrologiques... ce qui n'est pas aisé lorsqu'on est face à un relief atypique.

La méthode décrite pour le site 1 (barrage des Trois Gorges) est une modélisation itérative. Tout d'abord il faut modéliser la zone par un modèle simple, puis faire évoluer le modèle étape par étape. Au final, le modèle obtenu pour le site est très proche de la réalité, il permet d'identifier les zones problématiques, en calculant le volume de déplacement des roches après excavation des roches. Plus important, il permet d'anticiper les déplacements sur le long terme, ce qui est capital pour le bon fonctionnement des portes des écluses.

En ce qui concerne le site 2, la méthode est complètement différente. Des études pas assez précises faites sur le site ont mené à prendre des mesures qui ont déstabilisé encore plus la zone. Une fois que le site est correctement appréhendé, des solutions de stabilisation adéquates peuvent être prises, comme la mise en place de pieux de 35 mètres, le drainage de la zone par des forages horizontaux ou la réduction de charges sur la pente.

**Article 3** : *Utilisation des classifications de massifs rocheux pour l'analyse du comportement de pentes. Présentation de deux cas d'application.*

Cet article a été écrit par Véronique Merrien-Soukatchoff et Yann Gunzburger au laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages de l'école des Mines de Nancy. Il s'intéresse aux méthodes de classification des massifs rocheux par le biais de deux applications.

L'étude des massifs rocheux nécessite de connaître les paramètres caractéristiques de ces derniers. Pour ce faire, différentes relations et méthodes de classification ont été mises en place dans la littérature, mais leurs applications numériques ne sont que trop peu utilisées. Cet article propose deux applications pour déterminer les caractéristiques généralisées de deux massifs pour des calculs de stabilité et de contraintes-déformation.

### Evaluation de la stabilité d'une carrière

La première application s'intéresse à une carrière de marnes et calcaires. En utilisant le critère de Hoek et Brown, on cherche à déterminer la stabilité de la pente avec des paramètres à l'échelle du massif. Ce critère est le suivant :

$$\sigma_1^f = \sigma_3^f + \sigma_{oi} \left( m_b \frac{\sigma_3^f}{\sigma_{oi}} + s \right)^\alpha$$

$\sigma_1^f$  : contrainte effective maximum à la rupture ;

$\sigma_3^f$  : contrainte effective minimum à la rupture ;

$\sigma_{oi}$  : résistance à la compression de la matrice rocheuse intacte ;

$m_b$  : valeur de la constante de Hoek et Brown du massif rocheux ;

$s$  et  $\alpha$  : constantes qui dépendent de la fracturation.

Il est donc nécessaire de connaître la résistance à la compression de la roche intacte, la valeur de la constante de Hoek et Brown, et la qualité du massif rocheux ( $s$  et  $\alpha$ ).

Dans le cadre de l'application, nous nous intéressons à la partie marno-calcaire de la carrière. On peut y distinguer deux faciès différents : un de couleur grise (« tendre ») et un de couleur beige (plus « dur »). Des essais en laboratoire permettent de déterminer les caractéristiques de la matrice rocheuse (échantillons) :

	Résistance à la compression	Résistance à la traction
Echantillon banc « dur »	235 MPa	18 MPa
Echantillon ban « tendre »	105 MPa	8MPa

En utilisant les tableaux de Hoek et Bray (1981), en considérant le massif d'une qualité médiocre et qu'on a des discontinuités espacées de 0,3 à 1 m, on obtient les valeurs de  $m$  et  $s$  :

	Roche carbonaté	
	intacte	joints espacés de 0,3 à 1 m
$m$	7	0,14
$s$	1	0,0001

On peut maintenant utiliser le critère de Hoek et Brown avec des caractéristiques équivalentes qui permettent de décrire l'ensemble du massif (pour la partie marno-calcaire). Pour le calcul de stabilité, on se place dans les cas les plus défavorables, soit avec une résistance à la compression égale à 105 MPa et avec une égale à 55 MPa (résistance qui a 90% de chances d'être dépassée selon les statistiques). En assimilant le critère de Hoek et Brown à une droite, on obtient les valeurs suivantes pour la cohésion  $c$  et l'angle de frottement  $\varphi$ .

	105 MPa	55 MPa
$c$ (kPa)	170	90
$\varphi$ (°)	35	35

Une autre méthode permet d'obtenir la qualité du massif : celle qui utilise le Geological Strength Index (GSI), introduit par Hoek et al. en 1995. D'après le tableau de Hoek, le massif a un GSI égale à 45 (massif de médiocre qualité). Les formules suivantes permettent de déterminer les paramètres de la qualité du massif :

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right)$$

$m_i$  : valeur de la constante de Hoek et Brown pour la matrice rocheuse

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$$

$$a = 0,5$$

On obtient ainsi les valeurs suivantes pour une résistance à la compression de 105 MPa :

$$c = 500 \text{ kPa}$$

$$\varphi = 50^\circ$$

$$m = 8$$

Les valeurs caractéristiques utilisées précédemment sont donc très défavorables comparés à ce calcul.

On peut maintenant calculer le coefficient de sécurité pour estimer la stabilité de la pente. Dans le cas d'un talus à 45° présentant un pendage favorable de la stratification, on obtient un coefficient de sécurité de 1,2, ce qui est acceptable pour le talus.

## Analyse des mécanismes de formation d'un versant

La seconde application concerne la modélisation du mouvement de terrain de la Clapière. On cherche ici à utiliser des relevés sur le terrain pour évaluer le RMR (Rock Rating System) et ainsi établir les propriétés du massif.

Le calcul du RMR se base sur 6 critères :

- R1 : résistance à la compression simple de la roche saine ;
- R2 : indice RQD<sup>1</sup> (Rock Quality Designation) du massif rocheux ;
- R3 : Espacement moyen des discontinuités ;
- R4 : Etat général des discontinuités ;
- R5 : Conditions hydrogéologiques du massif rocheux ;
- R6 : Orientation des discontinuités par rapport aux directions représentatives du problème traité.

On utilise ensuite les relations citées par Beniaowski en 1989 pour déterminer les caractéristiques mécaniques du massif :

$$C_{tq} = 5 * RMR$$

$$\varphi_{tq} = 0,5 * RMR + 8,3 + 7,8$$

$$E_{tq} = 10^{\frac{RMR-10}{40}} \quad (\text{module d'Young})$$

Dans cette application, on s'intéresse au  $RMR_{sec}$  qui est de la forme :

$$RMR_{sec} = R1 + R2 + R3 + R4$$

On effectue des relevés sur le versant de la Clapière à partir de 15 stations différentes qui mettent en évidence les principales discontinuités du site. On détermine la résistance à la compression R1 grâce à un marteau de Schmidt, et les paramètres R2 et R4 grâce à des relevés structuraux et des relevés de rugosité des fractures. On obtient sur les 15 stations des valeurs de RMR comprises entre 37 et 59,25, et on choisit comme valeur de RMR caractéristique celle qui est la plus proche du glissement (RMR=42).

On obtient les valeurs suivantes pour les paramètres caractéristiques du versant :

$$C_{tq} = 210 \text{ kPA}$$

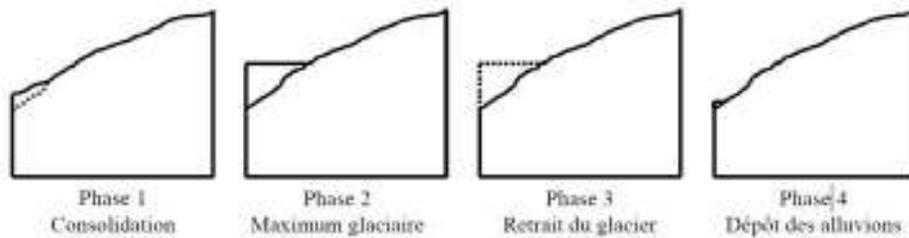
---

<sup>1</sup> Pourcentage de morceaux intacts de longueur supérieure à 10 cm (Deere et al. 1967), **Annexe D : méthodes de classification des masses rocheuses fracturée**

$$\varphi_{tq} = 29^\circ$$

$$E_{tq} = 6,3 \text{ GPa}$$

A partir des paramètres du massif, on effectue une simulation de l'évolution temporelle du versant à l'aide d'un code UDEC (Universal Distinct Element Code). On distingue 4 phases qui sont représentées dans la figure qui suit :



On en conclut qu'une zone plastique s'est formée au pied du versant à la fin de la phase 3, puis les désordres se sont propagés en amont du massif.

On peut aussi calculer le GSI directement à partir du RMR grâce à la relation suivante :

$$GSI = RMR - 5$$

On obtient ainsi un RMR égale à 37, ce qui est cohérent avec le calcul direct (qui nous permet d'obtenir une valeur égale à 35).

## Conclusion

Dans ces deux applications, on cherche à modéliser les massifs rocheux différents à partir de méthodes de calculs différentes. Dans la première, on cherche à établir la stabilité d'un talus de carrière d'une centaine de mètres de hauteur grâce au critère de Hoek et Brown et au GSI. En revanche, on cherche dans la deuxième à analyser ce qui a initié la déformation d'un versant instable de plusieurs centaines de mètres de hauteur grâce au RMR. Dans les deux cas, les résultats sont en accord avec la réalité, mais ne permettent pas de la décrire. L'utilisation des classifications permet d'appréhender les massifs rocheux de manière quantitative, mais elle est discutable car elle dépend de la méthode employée. Par ailleurs, les méthodes ne permettent pas d'aboutir à des conclusions comparables car elles ne décrivent pas toujours les mêmes phénomènes.

## Conclusion

---

Les trois articles proposés présentent différentes méthodes pour appréhender une pente rocheuse. L'article 2 qui porte sur la construction de la voie rapide en Chine montre la faiblesse d'une étude incomplète. En effet les mesures de renforcement de la pente n'étaient pas adaptées pour pouvoir stabiliser la pente sur le court et long terme. Les mesures prises ont retardé l'avancement du projet et ont sûrement engendré des coûts supplémentaires pour l'administrateur. Les deux autres articles étudiés s'attardent plus sur des études préalables et en parallèle au projet. L'article 1 (barrage des Trois Gorges) présente une méthode itérative qui permet d'atteindre un modèle fidèle, mais cette méthode est bien sûr plus laborieuse et nécessite plus de temps et de mesures sur le terrain. Pour un ouvrage de cette envergure et qui présente d'énormes risques pour la population avoisinante, de telles études sont indispensables avant l'exploitation. Le dernier article présente deux autres méthodes reposant en partie sur le même critère que l'article précédent, Hoek et Brown. Ces méthodes permettent aussi une bonne modélisation de la pente mais les résultats obtenus sont à moduler avec un facteur de sécurité.

Le comportement des pentes rocheuses est très difficile à anticiper à cause des nombreux facteurs à prendre en compte mais surtout à cause des difficultés pour obtenir ces facteurs. Avec des méthodes mathématiques il est possible de s'approcher d'une modélisation mais ces modèles ne peuvent pas être tenus comme des représentations fidèles, et il faut donc les utiliser avec soins. Les facteurs de sécurité de ces types de méthodes sont encore trop grands pour pouvoir se reposer sereinement ces méthodes.