

Utilisation de la méthode des éléments distincts pour montrer l'insuffisance de la méthode d'équilibre limite dans l'étude de la stabilité des talus rocheux fracturés

Hakim AHMARI* et Gabriel J. ASSAF

*École de Technologie Supérieure, Département de Génie de la Construction,
H3C 1K3 Montréal, Québec, Canada*

* Correspondance, courriel : hakim_ahm@hotmail.ca

Résumé

Le présent article s'intéresse aux méthodes usitées dans l'étude de la stabilité des talus rocheux fracturés, plus précisément les méthodes classiques basées sur l'analyse des forces en situation d'équilibre limite et la méthode des éléments distincts (DEM). Le logiciel bidimensionnel UDEC est utilisé pour effectuer les analyses sur un modèle d'un talus rocheux fracturé. Les simulations numériques réalisées montrent que les deux méthodes donnent des résultats différents en termes de glissement et de basculement des blocs constituant le talus. Cette étude permet de montrer l'insuffisance de ces méthodes classiques dans l'examen de la stabilité des massifs rocheux fracturés. En effet les discontinuités qui jouent pourtant un rôle prépondérant ne sont pas prises en compte.

Mots-clés : *stabilité, talus, glissement, basculement, discontinuités.*

Abstract

Using the distinct elements method to show the inadequacy of the limit equilibrium method in studying the stability of fractured rocky slopes

The present paper focuses on the methods used in the study of the stability of fractured rocky slopes, more precisely the classical methods based on the analysis of the forces in the situation of limit equilibrium and the method of the distinct elements (DEM). The two-dimensional UDEC software is used to analyze on a model of a fractured rocky slope. The numerical simulations carried out show that the two methods give different results in terms of sliding and tilting of the blocks constituting the slope. This study shows the inadequacy of these classical methods in examining the stability of fractured rock masses. Indeed the discontinuities that play a prevailing role are not taken into account.

Keywords : *stability, slope, slip, tilting, discontinuities.*

Liste des sigles et symboles

Abréviation	Désignation
UDEC	Universal Distinct Element Code
DEM	Discret Element Code
FS	Facteur de sécurité
τ	Contrainte tangentielle mobilisable sur la surface de rupture
σ_n	Contrainte normale appliquée sur la surface de rupture
Φ	Angle de frottement de la surface de rupture
c	Cohésion de la surface de rupture
Φ_d	Angle de frottement des discontinuités
Φ_F	Angle de frottement de la faille
Ψ_T	Pendage du talus
Ψ_d	Pendage des discontinuités
Ψ_F	Pendage de la faille
K_n	Raideur normale des discontinuités
K_s	Raideur tangentielle des discontinuités
ρ	Masse volumique du massif rocheux
(ν)	Coefficient de Poisson du massif rocheux

1. Introduction

La majorité des analyses de stabilité de pentes rocheuses menées dans la pratique sont basées sur les méthodes traditionnelles d'équilibre limite inchangées depuis des dizaines d'années [1]. Ces méthodes ne prennent pas en compte la déformabilité des joints et les contraintes existantes dans les massifs rocheux. Elles ne peuvent pas identifier les mécanismes de déformation et de rupture complexe sur le plan géométrique ni les phénomènes de déformation et rupture progressive sur le plan mécanique [2]. Ces types d'erreurs peuvent mener à des résultats erronés en termes de champs des contraintes [3]. La stabilité des talus rocheux fracturés est principalement dictée par le comportement des discontinuités [4], or ces méthodes classiques deviennent plus compliquées lors de l'apparition de phénomènes affectant la masse rocheuse comme l'effet de l'eau, l'effet sismique et celui de la discontinuité, etc. Ces méthodes ne sont pas alors utiles dans un milieu rocheux dans lequel les surfaces de discontinuités, leur géométrie et leurs propriétés mécaniques jouent un rôle déterminant. Les modèles de calcul utilisant la méthode des éléments distincts (DEM) peuvent être appliqués à une grande variété de mécanismes de rupture : glissement plan, glissement dièdre, basculement, torsion de bloc, rupture de banc et des modes complexes constitués de plus d'un des modes précédents [3]. Par conséquent, ces méthodes de calcul sont des outils plus appropriés pour modéliser les masses rocheuses fracturées [3 - 8]. L'objectif de cette étude est de démontrer l'inefficacité des méthodes traditionnelles d'équilibre limite dans le calcul de stabilité des talus rocheux fissurés qui cause la rupture prématurée d'un nombre substantiel des chaussées. Les analyses ont été effectuées en utilisant le logiciel UDEC (Universal Distinct Element Code) de la société ITASCA, version 06 [9].

2. Méthodologie

2-1. Présentation de la méthode d'équilibre limite

Dans cette méthode, l'évaluation de la stabilité est basée sur l'analyse de l'équilibre limite de forces, soient les forces motrices et les forces résistantes. Les forces motrices résultent du poids du volume rocheux susceptible de glisser, des pressions hydrauliques, et éventuellement de toutes les forces extérieures agissant sur le talus (forces de surcharges sur la crête du talus). La rupture est alors supposée se réaliser au même moment sur toute la surface de rupture (pas de notion de rupture progressive) et que cette surface de rupture est connue à l'avance [2]. Les forces résistantes se développent dans le sens opposé du glissement. Elles sont calculées suivant le critère de rupture adopté. Le critère le plus souvent utilisé est celui de Mohr-Coulomb liant la contrainte normale et la contrainte tangentielle aux caractéristiques de la surface de glissement :

$$T = \sigma_n * \tan(\varphi) + C \tag{1}$$

La **Formule** donnant le coefficient de sécurité FS s'écrit alors :

$$FS = \frac{\sum \text{forces résistantes}}{\sum \text{forces motrices}} \tag{2}$$

$$\text{ou, } FS = \frac{\text{moments résistants}}{\text{moments moteurs}} \tag{3}$$

Il en découle qu'un facteur de sécurité :

- Égal à l'unité indique l'équilibre limite;
- Inférieur à l'unité signifie une instabilité;
- Supérieur à l'unité indique la stabilité.

Ce type d'analyse nécessite comme paramètres d'entrée, de l'information sur la géométrie de la pente (orientation, hauteur et largeur), des données relatives aux différentes familles de discontinuités (orientation, espacement, cohésion et angle de frottement) et la densité de la roche. Usuellement, l'analyse à l'équilibre limite est réalisée à partir des valeurs moyennes des différents paramètres d'entrée. Cette approche est dite déterministe. Il est toutefois possible de considérer la variabilité et l'incertitude des paramètres d'entrée par des analyses de sensibilité et des analyses probabilistes [10]. La procédure générale de cette méthode peut être résumée comme suit [11] :

- Hypothèse de l'existence d'au moins une surface de glissement ;
- Analyse statique des contraintes normales et tangentielles sur les surfaces de glissements ;
- Calcul du facteur de sécurité FS;
- Identification de la surface de rupture critique donnant un facteur de sécurité FS minimum, parmi l'ensemble des surfaces de ruptures analysées.

Cette méthode est basée sur le modèle illustré à la **Figure 1** ci-dessous, avec un bloc qui repose sur une surface dont l'angle de frottement avec ce bloc est Φ . Une force W est appliquée sur la surface du bloc selon un angle θ par rapport à la verticale. L'intensité de la composante normale est égale à $W * \cos(\theta)$ et l'intensité de la composante tangentielle est égale à $W * \sin(\theta)$. L'intensité de la force résistante est donc égale à $W * \cos(\theta) * \tan(\Phi)$ et l'intensité de la force agissant sur le bloc est égale à $W * \sin(\theta)$. Par conséquent :

$$\text{Le bloc pourra glisser si : } (\Phi < \theta) \tag{4}$$

$$\text{Le renversement du bloc aura lieu si : } b/h < \tan(\theta) / \tan(\Phi) \tag{5}$$

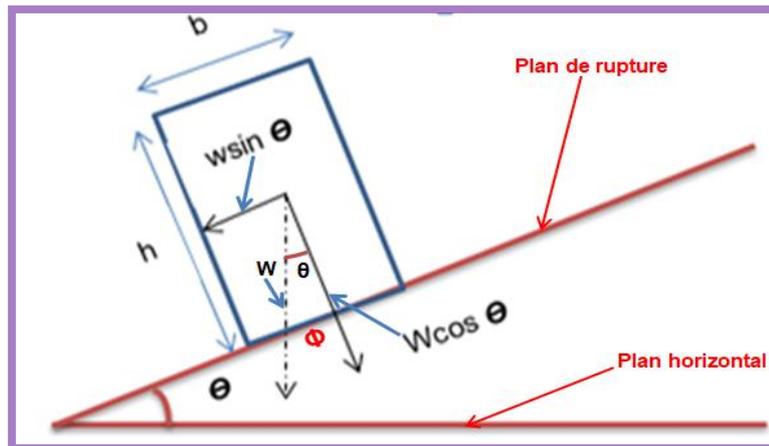


Figure 1 : Glissement d'un bloc sur le plan de rupture

2-2. Présentation de la méthode des éléments distincts (DEM)

La méthode des éléments distincts développée par [12, 13] est utilisée pour résoudre des problèmes liés aux milieux discontinus [14]. Elle se distingue par trois caractéristiques [15] :

- Le massif rocheux fracturé est représenté sous la forme d'un milieu discontinu, constitué par un assemblage de blocs qui interagissent par contact de leurs angles et de leurs côtés;
- Les discontinuités sont considérées comme des interactions entre les blocs ; leur comportement est régi par des lois liant forces et déplacements aux niveaux des contacts;
- Le temps intervient de manière explicite dans la résolution des équations de mouvement. Des comportements non linéaires de la roche et des discontinuités peuvent être simulés et des problèmes dynamiques (séismes, explosions) peuvent être traités.

La méthode des éléments distincts modélise le comportement des milieux discrets faiblement fracturés à fortement fracturés. Les assemblages de blocs qui peuvent être modélisés sous forme rigide ou déformable interagissent via des contacts représentés par des joints. La méthode permet de prendre en compte les grands déplacements, les rotations et les instabilités. Des contacts peuvent donc s'ouvrir puis disparaître et d'autres apparaître. Un algorithme de reconnaissance automatique des contacts doit être intégré et relancé à chaque incrément cinématique [16].

2-3. Modèle utilisé pour les calculs

Le modèle utilisé dans cette étude (*Figure 2*) est constitué d'un talus rocheux d'une hauteur de 92.5 m et d'un pendage de 56° . Le talus comporte une famille de discontinuités d'un pendage Ψ_d et un angle de frottement Φ_d avec un espacement de 10 m. Le massif rocheux est recoupé par une faille d'un pendage de 35.85° . Comme il ne sera soumis qu'aux efforts de la gravité, la partie inférieure du modèle est considérée fixe, par conséquent, le bloc du bas ne se déplacera pas et ne chutera pas sous l'effet de la gravité. Les limites du modèle sont sélectionnées selon des considérations typiques de dimensionnement de modèles. La hauteur de la base du modèle est plus élevée que la moitié de la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H). De plus, la longueur à l'arrière du sommet de la pente est plus élevée que la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W) [17]. Selon la *Figure 2*, la hauteur de la projection de la pente selon la verticale (H) est 92.5 mètres alors que la hauteur déterminée de la base est d'environ de 50 mètres. De plus, la longueur de la projection de la pente selon l'horizontale (W) est de 61 mètres tandis que la longueur déterminée à l'arrière du sommet de la pente est d'environ 74 mètres. La largeur globale du modèle d'environ 155 mètres. Les caractéristiques du massif rocheux utilisées dans les simulations sont fournies dans le *Tableau 1* ci-dessous.

Tableau 1 : Propriétés du massif rocheux (Roche intacte + Discontinuités)

	Φ (°)	ρ (kg/m ³)	(ν)	K_n (MPa)	K_s (MPa)	Ψ (°)
Roche intacte	-	2700	0.3	-	-	-
Discontinuités	15	-	-	10^5	10^5	60
Faille	37	-	-	10^5	10^5	35.85

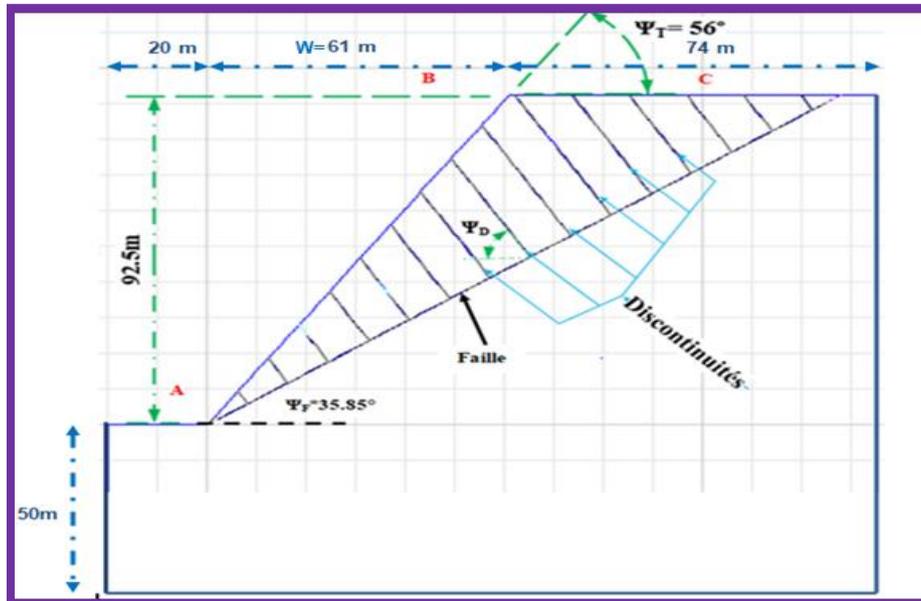


Figure 2 : Modèle utilisé dans les calculs

Afin de saisir l'influence de certains paramètres sur la stabilité des blocs formant le talus, des analyses où les propriétés de la résistance sur les plans structuraux seront modifiées, ont été effectuées. Les simulations ont été faites en changeant à la fois les angles de frottement du plan de faille, le pendage du plan de faille et l'angle de frottement des discontinuités. Le critère de rupture de Mohr-Coulomb est utilisé pour calculer la résistance au cisaillement et la technique de réduction de la résistance au cisaillement implantée dans le logiciel UDEC est utilisée pour calculer le facteur de sécurité [18, 19].

3. Résultats et discussion

3-1. Résultats relatifs au glissement des blocs constituant le talus rocheux

Deux cas sont analysés et les résultats obtenus sont illustrés aux **Figures 3 et 4** ci-dessous. L'objectif est de savoir si les blocs qui glissent rencontrent tous l'inégalité (4).

3-1-1. Cas 1 : $\Phi_f = 37^\circ$; $\Phi_d = 60^\circ$

Dans ce premier cas, l'angle de frottement des discontinuités est égal à 60° et l'angle de frottement du plan de faille est égal à 37° . Les résultats obtenus sont illustrés à la **Figure 3** ci-dessous. Cette figure indique que le déplacement maximal des blocs est très minime (1.42 cm) et le facteur de sécurité est égal à l'unité. Il n'y a pas de glissement important des blocs sur le plan de la faille. Le talus est donc stable et l'inégalité (4) est vérifiée pour l'angle de frottement des discontinuités égal à 60° .

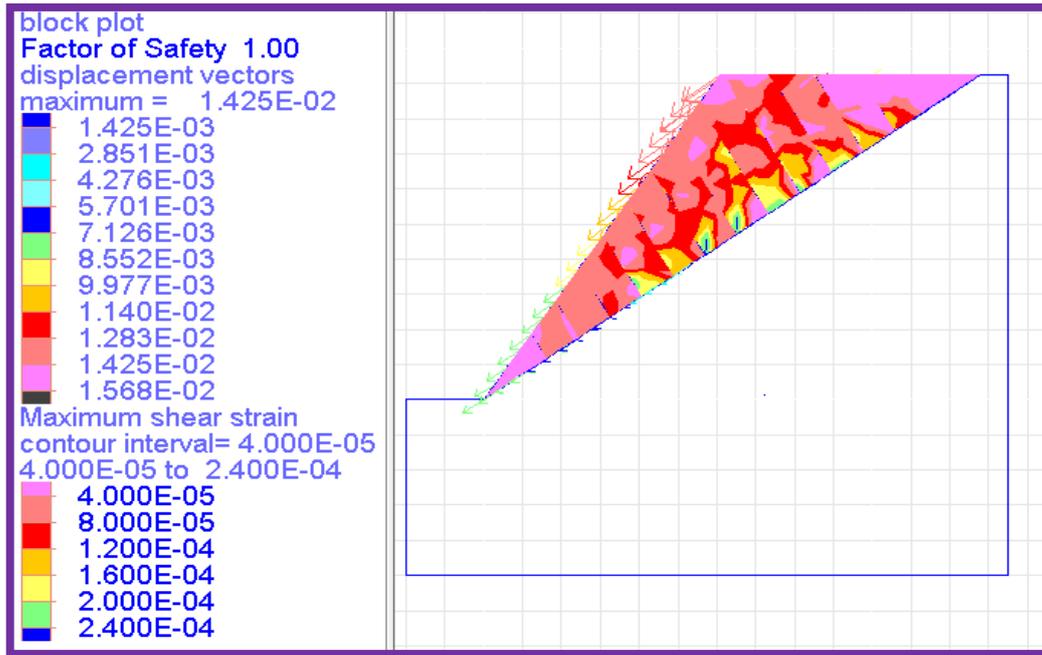


Figure 3 : Déplacement des blocs pour le cas 1

3-1-2. Cas2 : $\Phi_f = 37^\circ$; $\Phi_D = 10^\circ$

Dans ce deuxième cas, l'angle de frottement des discontinuités est diminué à 10 degrés tandis que l'angle de frottement du plan de faille est inchangé (37°). Les résultats obtenus sont illustrés à la **Figure 4** ci-dessous. Cette Figure montre que le déplacement maximal enregistré est important. Il atteint une valeur de 16.17 m et le facteur de sécurité est de 0.84.

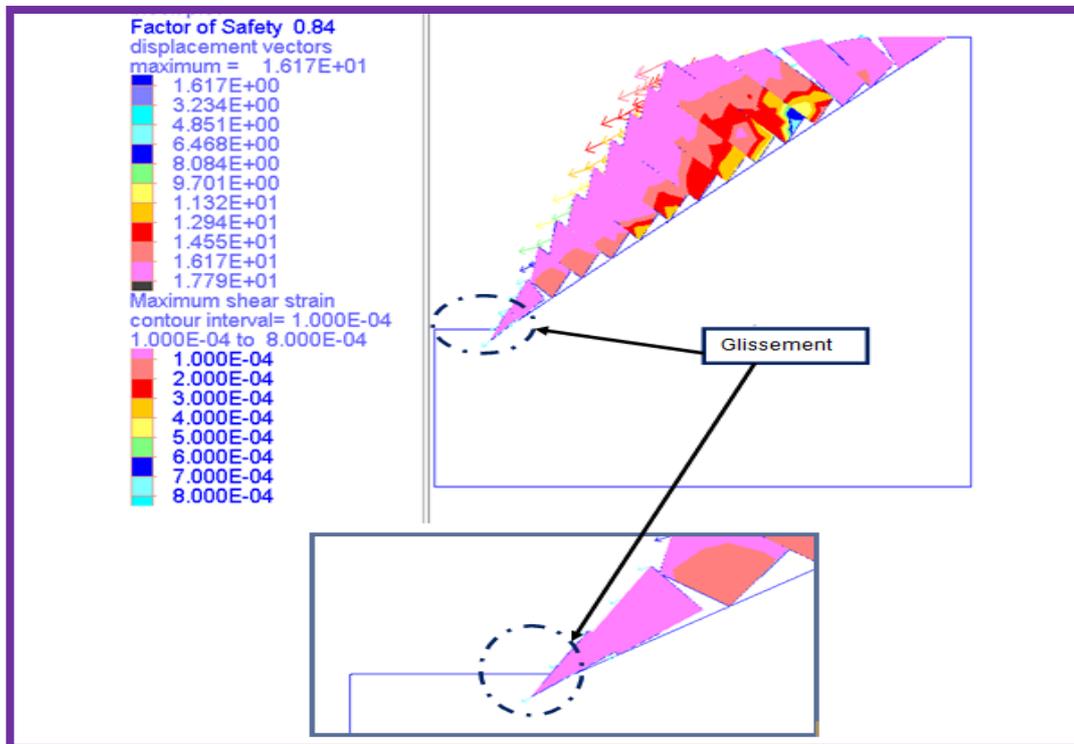


Figure 4 : Déplacement des blocs pour le cas 1

Dans ce deuxième cas, l'angle de frottement du plan de faille est égal à 37° , il est supérieur au pendage du plan de faille (35.5°), donc selon l'inégalité (4) le bloc ne devra pas glisser sur le plan de faille et le talus devra être stable. En revanche, un glissement important des blocs proches du pied du talus est survenu sur le plan de rupture (plan de faille) et le facteur de sécurité calculé en utilisant le logiciel UDEC est inférieur à l'unité (Figure 4), donc le talus est instable. Ceci constitue une contradiction avec les recommandations de la méthode d'équilibre limite.

3-2. Résultats relatifs au basculement des blocs constituant le talus rocheux

Le fauchage ou le basculement des blocs est un mode de rupture possible pour les talus rocheux fracturés. C'est une déformation impliquant rotations et glissements des masses rocheuses. Il se produit dans les versants parcourus par une famille de discontinuités majeure. Le cas 2 dont les résultats sont illustrés à la Figure 5 ci-dessous reste un bon exemple pour ce phénomène de fauchage.

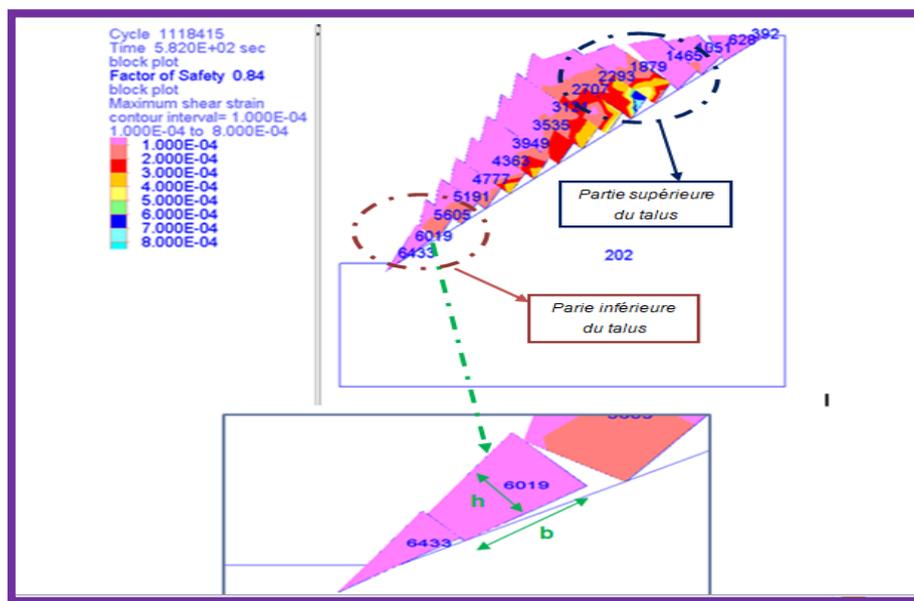


Figure 5 : Renversement des blocs pour le cas 1

Les résultats obtenus dans la Figure 5 montrent que la moitié supérieure du talus est presque détachée du massif. Les blocs de cette zone présentent le plus fort basculement avec des ouvertures importantes des joints. La Figure 5 montre également un basculement léger des blocs proches du pied du talus (partie inférieure du talus). Ces blocs ne satisfont pas tous l'inégalité (5). Par exemple le bloc n° 6019 bascule même si le rapport b/h est supérieur à l'unité. Ceci constitue encore une contradiction avec la méthode d'équilibre limite. Le basculement fort des blocs situés dans la partie supérieure du talus favorise le glissement et le basculement des blocs situés proche du pied du talus. Ce phénomène est dû à l'existence des joints avec un faible angle de frottement entre ces blocs. La méthode d'équilibre limite ne peut pas prendre en compte cet aspect dans l'étude de la stabilité des talus rocheux fracturés, contrairement à la méthode des éléments distincts.

- Approche quantitative de Goodman

En se basant toujours sur la méthode d'équilibre limite, Goodman propose une règle quantitative pour le basculement des blocs constituant le talus. Selon lui, le basculement des blocs aura lieu si l'inégalité (6) suivante est vérifiée :

$$(\Psi_r + \Psi_d - \Phi_d - \pi/2) \geq 0 [20, 21] \tag{6}$$

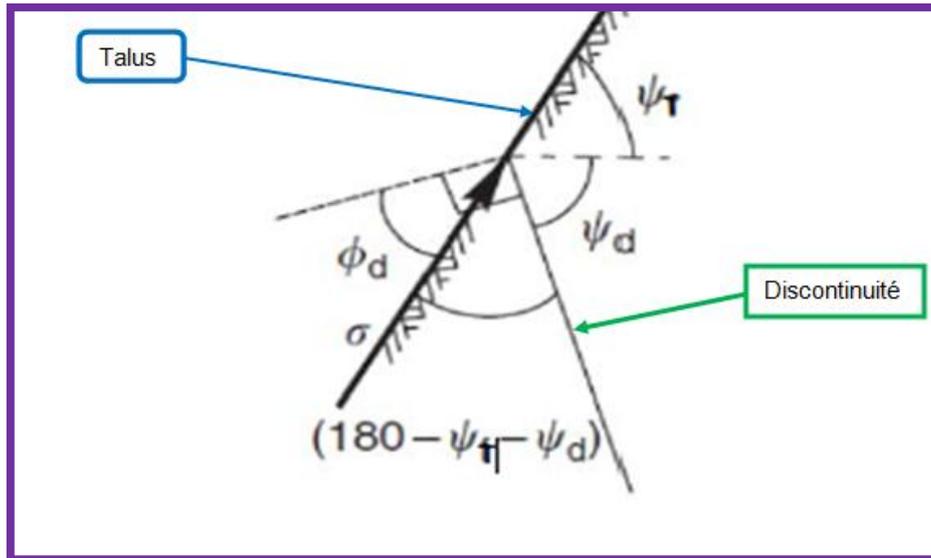


Figure 6 : Définition des paramètres d'étude pour l'approche de Goodman [20]

Pour vérifier la correspondance entre la condition du basculement de Goodman et les simulations numériques réalisées avec le logiciel UDEC, deux cas sont étudiés :

- Cas 1 : $\Psi_T = 45^\circ$, $\Psi_d = 85^\circ$, $\Phi_d = 30^\circ$
- Cas 2 : $\Psi_T = 45^\circ$, $\Psi_d = 90^\circ$, $\Phi_d = 30^\circ$

L'étude de ces deux cas explique l'influence de l'angle de frottement des discontinuités (Φ_d) et des paramètres angulaires (la pente Ψ_T du talus et le pendage Ψ_d des discontinuités) sur la stabilité du modèle (Figures 2 et 6). L'inégalité (6) est vérifiée pour les deux cas, donc selon l'approche de Goodman, le talus sera instable et les blocs le constituant devraient basculer. Les résultats des simulations numériques par le logiciel UDEC sont illustrés aux Figures 7 et 8 ci-dessous.

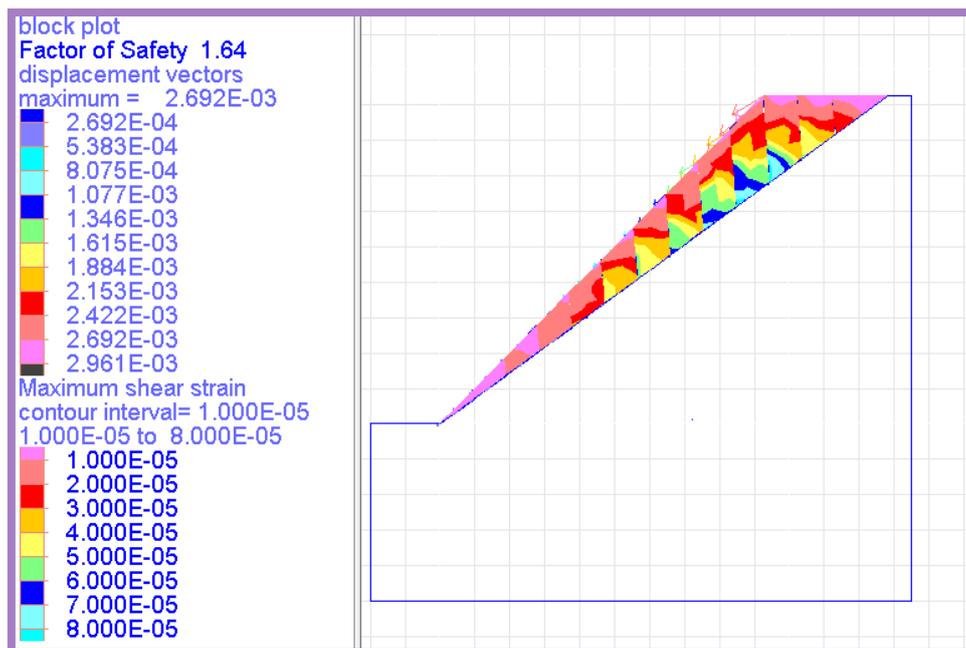


Figure 7 : Cas1 : ($\Psi_T = 45^\circ$, $\Psi_d = 85^\circ$, $\Phi_d = 30^\circ$)

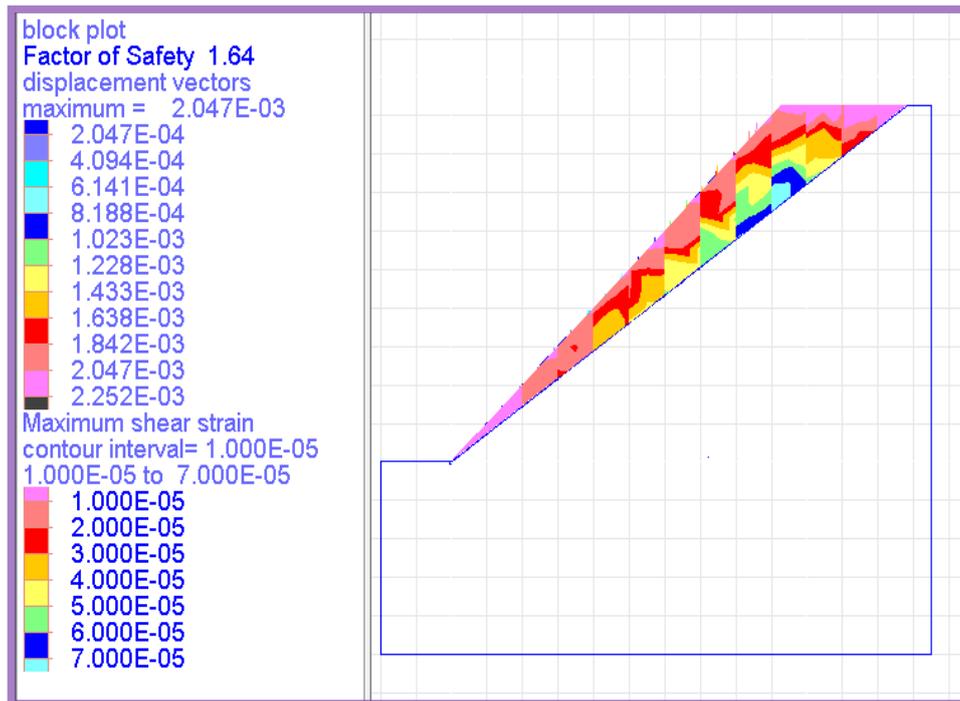


Figure 8 : Cas 2 : ($\psi_T = 45^\circ$, $\psi_d = 90^\circ$, $\phi_d = 30^\circ$)

Les deux **Figures 7 et 8** montrent que les blocs sont immobiles et que le facteur de sécurité est de 1.64 pour les deux cas. Par conséquent, la relation de Goodman n'est pas applicable pour toutes les valeurs des paramètres satisfaisant l'inégalité 6, notamment pour les talus à faible pente ($\psi_T = 45^\circ$) et des pendages de diaclases élevés ($\psi_d = 85^\circ$ et $\psi_d = 90^\circ$). Cette divergence entre le modèle de Goodman et le modèle d'UDEC approuve encore l'insuffisance de l'utilisation de la méthode d'équilibre limite dans l'étude de la stabilité des talus rocheux fracturés.

4. Conclusion

Cet article avait pour finalité de montrer l'insuffisance de la méthode d'équilibre limite dans l'étude de la stabilité des talus rocheux fracturés. A travers l'exemple traité ci-dessus et grâce au logiciel UDEC nous avons pu montrer et confirmer les points suivants :

- Glissement des blocs constituant le talus même si l'angle de frottement est supérieur au pendage du plan de glissement;
- Influence majeure de l'angle de frottement des discontinuités sur le glissement et le basculement des blocs constituant le talus;
- L'approche quantitative de Goodman n'est pas applicable pour les talus à faible pente ($\psi_T = 45^\circ$) et des pendages de diaclases élevés ($\psi_d = 85^\circ$ et $\psi_d = 90^\circ$).

La méthode des éléments distincts est alors un outil très précieux pour le calcul dans les milieux discontinus. Cette méthode de calcul est capable d'étudier la stabilité des talus excavés dans des massifs rocheux fracturés et de modéliser les déformations de ces massifs rocheux en prenant en compte leur fissuration et leur déformabilité.

Références

- [1] - N. NEHAB, K. BABA et L. OUADIF, Stabilité des talus d'un remblai posé sur un sol renforcé par colonnes ballastées. Application aux talus sous le pont Moulay Youssef Rabat/Salé. *Rock Slope Stability 2014, Marrakech-Maroc*, (2014) 403 - 412 p.
- [2] - A. TAHIRI, Modélisation des massifs rocheux fissurés par la méthode des éléments distincts. Thèse doctorale, école nationale des ponts et chaussées, France, (1992) 222 p.
- [3] - P. B. YAZIDI, Modélisation de la stabilité des massifs rocheux avec prise en compte de l'endommagement des joints et des effets hydromécaniques. Thèse doctorale, École nationale des ponts et chaussées, France, (2009) 238 p.
- [4] - S. MAIOLINO, J. P. DEVEAUD et F. PELLET, Résistance au cisaillement des discontinuités rocheuses renforcées par ancrages passifs. *Rock Slope Stability 2014, Marrakech-Maroc*, (2014) 139 - 148 p.
- [5] - Y. LIN, D. ZHU, Q. DENG and Q. HE. COLLAPSE, Analysis of Jointed Rock Slope Based on UDEC Software and Practical Seismic Load. *International Conference on Advances in Computational Modelling and Simulation*, Vol. 31, (2012) 441 - 446 p.
- [6] - M. SOULEY and F. HOMAND, "Stability of Jointed Rock Masses Evaluated by UDEC with an Extended Saeb-Amadei Constitutive Law," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 33, N° 3 (1996) 233 - 244 p.
- [7] - R. BHASIN and K. HØEG, "Parametric Study for a Large Cavern in Jointed Rock Using a Distinct Element Model (UDEC-BB)," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 35, N° 1 (1998) 17 - 29 p.
- [8] - X. B. ZHAO, J. ZHAO, J. G. CAI and A. M. HEFNY, "UDEC Modelling on Wave Propagation across Fractured Rock Masses," *Computers and Geotechnics*, Vol. 35, N° 1 (2008) 97 - 104 p.
- [9] - Société du groupe Itasca International. UDEC™ VERSION 6.0 Distinct-element Modelling of Jointed and Blocky Material in 2D <https://www.itascacg.com/software/udec>, (Septembre 2018)
- [10] - A. J. LAFLAME, Analyse intégrée de la stabilité des pentes de la fosse portage du projet minier MEADOWBANK. Mém. Maitrise, Faculté des études supérieures de l'université de Laval, Québec, (2010) 153 p.
- [11] - D. TOUITOU, Apport de la modélisation et de l'instrumentation dans l'analyse de la stabilité et de la déformation à long terme d'un massif granitique : Application aux talus de grande hauteur de l'écluse à bateaux permanente du Barrage des Trois Gorges (Chine). Thèse doctorale, École nationale des ponts et chaussées, France, (2002) 432 p.
- [12] - P. A. CUNDALL, A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems. *Proceedings of the symposium of the international society of rock mechanics*, Vol., (1971) 132 - 150, 197 p.
- [13] - H. KONIETZKY, Numerical Modelling of Discrete Materials in Geotechnical Engineering, Civil Engineering and Earth Sciences. Germany, (2004) 436 p.
- [14] - H. P. CAO, Modélisation par éléments discrets rigides et/ou déformables des milieux granulaires et des troisièmes corps solides. Thèse de doctorat, L'Institut National des Sciences appliquées de Lyon, France, (2011) 183 p.
- [15] - X. RACHEZ, Les fondations au rocher de grands viaducs : l'apport de la méthode des éléments distincts. Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, Paris, (1997) 241 p.
- [16] - F. MARTIN, Apport des lois d'endommagement continues pour la conception des ouvrages souterrains et la hiérarchisation des comportements rocheux. Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, Paris, (2007) 127 p.
- [17] - L. LORIG and P. M. VARONA, Practical Slope-Stability Using Finite-Difference Codes. *Slope stability in surface mining*, (2001) 115 - 124 p.
- [18] - I. B. DONALD and S. K. GIAM, Application of the Nodal Displacement Method to Slope Stability Analysis. *Proceedings of the 5th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Sydney, (1988) 456 - 460 p.
- [19] - K. UGAI and D. LESHCHINSKY, Three-Dimensional Limit Equilibrium and Finite Element Analyses : A Comparison of Results. *Soils and Foundations*, Vol. 35, N° 4 (1995) 1 - 7 p.
- [20] - D. M. CRUDEN, Limits to common toppling. *Can. géotech.*, Canada, Vol. 26, (1989) 737 - 742 p.
- [21] - R. E. GOODMAN, Introduction to Rock Mechanics. John Wiley and Sons, 294 - 305 p.