

MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES ET PHYSIQUE DE FALAISES ROCHEUSES

VERONIQUE MERRIEN-SOUKATCHOFF, IMAD KADIRI

Laboratoire Environnement Géomécanique Ouvrages, Ecole des Mines, Nancy Université, France.
Veronique.Merrien@mines.inpl-nancy.fr

KEVIN STONE

University of Brighton, Departement of Civil Engineering, Brighton, UK.

Résumé: Le travail présenté vise à comparer un modèle physique de bloc de craie fracturé à des modélisations numériques. Ces comparaisons ambitionnent à terme de représenter la démarche de confrontation d'un site rocheux fracturé à un modèle numérique. Après avoir présenté le modèle physique et les modalités de sa centrifugation, différentes modélisations géométriques et mécaniques utilisant les logiciels RESOBLOK et 3DEC sont abordées. Les mécanismes de ruptures observés ont été relativement bien reproduits, bien que des problèmes de dimension soient apparus dans les modélisations RESOBLOK. Cette première expérience encourage à poursuivre la démarche qui permet d'analyser de manière répétitive la représentativité du géomodèle (quelles sont les discontinuités «importantes» du point de vue du comportement mécanique) et la qualification du modèle mécanique (à partir de quelles comparaisons? sur combien de points? Sur quelles variables?).

Abstract: A physical model of a fractured chalk block is compared with numerical modelling. This comparison represents the tough process taking place when comparing an in situ rock mass with that obtained from numerical models. After presenting the physical model and the procedure of its centrifugation, different geometrical and mechanical modelling running RESOBLOK and 3DEC software are tackled. The rupture mechanisms observed are quite well represented, although dimension problems appear in RESOBLOK modelling. This experiment encourages us to improve the comparison process which allows the geomodel representativity to be repetitively analysed (Which discontinuities are mechanically important?) and the mechanical model to be qualified (From which comparisons? On how many points? On which measurements?).

1. INTRODUCTION

La modélisation numérique est largement employée pour représenter le comportement des massifs rocheux. La comparaison des modélisations numériques au site qu'elles représentent est ardue du fait de l'inaccessibilité de certaines zones et de la difficulté de réaliser des mesures exhaustives. Ceci est particulièrement vrai pour les falaises et versants naturels sur lesquels les informations quantitatives sont rares, spécialement s'ils n'ont pas été l'objet d'instabilités majeures. Quand on s'interroge sur la stabilité d'un versant, il est souvent difficile de juger à priori de la bonne variable (déformation, déplacement, pression hydraulique) à mesurer, de l'échelle de la mesure et du point où il faut placer la mesure. La stratégie d'instrumentation d'un

versant potentiellement instable se base sur une connaissance partielle de son comportement où des scénarios plausibles d'instabilités conduisent à choisir parmi les instrumentations possibles plutôt, des extensomètres, des fissuromètres, des clinomètres, des tassomètres, des cibles topographiques, des sondes micro-sismique, des mesures des pressions... Cependant les variables mesurées et la fréquence de ces mesures, conditionnent l'analyse du site et les comparaisons aux calculs.

Afin d'analyser de manière répétitive la démarche de comparaison modèle/site et sa mise en œuvre, il est peut être possible de travailler de manière alternative à la comparaison d'un modèle physique de falaises à des modélisations numériques. En effet le passage du modèle physique de massif rocheux au modèle numérique peut, dans une certaine limite, être considéré comme similaire à celui du site au modèle. Il permet notamment de soulever la question de la représentativité du géomodèle: représentation de la topographie et de la structure du site (notamment celle des discontinuités « importantes » du point de vue du comportement mécanique) et de la qualification du modèle (A partir de quelles comparaisons? Sur combien de points? Sur quelles variables?).

Afin de progresser dans ce type de démarche, nous avons testé la possibilité d'effectuer ce genre de comparaison sur un modèle physique de falaise calcaire. Dans une première partie nous présentons le modèle physique qui a servi de base à ce travail, puis les modélisations proposées.

2. PRÉSENTATION DU MODÈLE PHYSIQUE

Le modèle physique (figure 1) qui a été utilisé est un bloc de craie fracturé (STONE et al., [10], [11]) qui a été testé par l'Université de Brighton dans la centrifugeuse du GERC (Geotechnical Engineering Research Centre) de la City University de Londres. Ce modèle physique bien que représentatif d'une falaise rocheuse, n'en est cependant

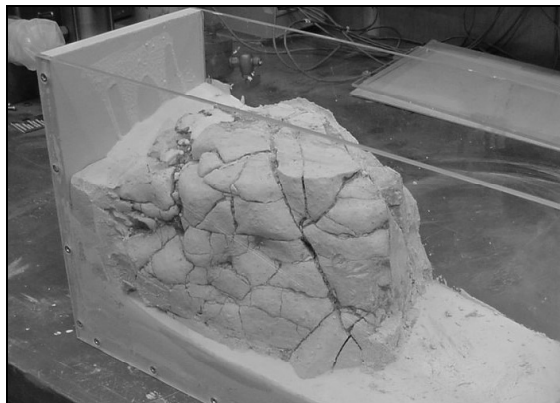


Fig. 1. Bloc de craie fracturé (d'après STONE et al., [10])

pas un modèle réduit. Il s'agit en effet d'un bloc de craie extrait directement d'une falaise. Comme il ne cherche pas à représenter un matériau équivalent, les comparaisons peuvent s'affranchir du problème de représentativité du matériau centrifugé et ne tentent pas de reproduire directement les phénomènes *in situ*. Le bloc de craie a été centrifugé jusqu'à 200 g sans qu'aucune instabilité n'apparaisse.

Le bloc étant très sec il a été mis 40 mn dans l'eau afin de potentiellement réduire les caractéristiques mécaniques des joints argileux. Le temps de « trempe » n'a pas pu être supérieur pour des questions d'organisation des essais. Durant la centrifugation suivante, un glissement s'est produit le long d'un joint présentant un pendage vers l'excavation, cependant les caractéristiques du joint n'avaient pas été suffisamment affaiblies pour engendrer une rupture complète. Un petit bloc a alors été enlevé à la base de la « falaise de craie » (le déplacement de ce bloc peut correspondre à l'effet qu'aurait l'érosion marine à la base d'une falaise de craie littorale) et une rupture a été observée pour une accélération de 78 g. La rupture s'est localisée dans des joints situés au dessus du « pied de falaise sous-minée » (figure 2).

Afin de pouvoir ultérieurement représenter le bloc centrifugé, l'orientation et le pendage des fractures ont été mesurés en orientant arbitrairement les bords de la boîte par rapport au Nord.



Fig. 2. Bloc de craie «sous miné» avant la rupture complète de l'échantillon (d'après STONE et al. [10])

3. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

Les modélisations numériques ont été réalisées en deux étapes:

- une géomodélisation (représentation de la géométrie du bloc centrifugé),
- une modélisation mécanique:
 - à l'équilibre limite (à l'aide du Logiciel RESOBLOK),
 - en contrainte déformation (utilisation du logiciel 3DEC).

3.1. MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE

Préalablement à la modélisation mécanique d'un milieu fracturé, il est nécessaire de représenter au mieux la géométrie du massif étudié (JING [7]) c'est à dire sa topographie, la position et l'orientation des discontinuités de manière statistique ou déterministe. Cette étape a une forte influence sur les modélisations mécaniques ultérieures. Différents géomodelleurs peuvent être utilisés. Ils se différencient par la manière dont ils représentent les fractures: comme des plans ou des surfaces quelconques, statistiquement ou de manière déterministe, comme des surfaces infinies ou limitées par d'autres surfaces, leur interface avec d'autres codes mécaniques ou hydrauliques. Plusieurs codes représentent les fractures comme des plans: RESOBLOK (HELIOT [5]), FRACMAN (DERSHOWITZ et al. [4]), module géométrique de 3DEC (Itasca [6]), d'autres, plus raffinés, permettent de représenter les fractures comme une surface quelconque: par exemple, gOcad (MALLET [9]). Certains géomodelleurs sont des préprocesseurs de codes de calcul mécanique, comme c'est le cas du géomodelleur inclus dans 3DEC ou hydraulique comme FRACMAN.

Nous avons choisi d'utiliser pour cette étape, à la fois RESOBLOK et le module aval de 3DEC. En effet, bien qu'il existe une interface dans RESOBLOK permettant de transférer automatiquement la géométrie élaborée sous RESOBLOK, les faibles dimensions du modèle ont rendu cette étape difficile. RESOBLOK présente l'avantage de permettre la construction et la visualisation progressive des fractures introduites dans le modèle. Les fractures mesurées sur le bloc de craie ont donc été retranscrites dans le fichier scénario de RESOBLOK afin de permettre leur représentation (figure 3).

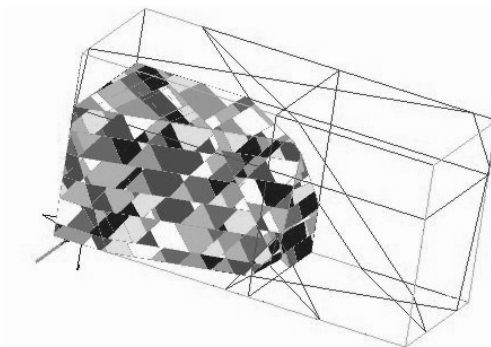


Fig. 3. Représentation RESOBLOK

3.2. MODÉLISATION MÉCANIQUE À L'ÉQUILIBRE LIMITE

RESOBLOK possède un module aval BSA (pour Block Stability Analysis) d'analyse de stabilité à l'équilibre limite (ASOF [1], BAROUDI et al. [2], KORINI et al.

[8]) ou par minimisation de l'énergie. Les mouvements potentiels considérés sont la chute libre, le glissement (selon un ou plusieurs plans), la rotation. Les blocs sont supposés indéformables. Les paramètres nécessaires à l'analyse sont le poids volumique des blocs (ici considéré à 25 kN/m^3), la cohésion et l'angle de frottement des joints. Le calcul est itératif: dans une première phase la stabilité des blocs à proximité d'une surface libre est examinée et ceux dont le coefficient de sécurité est inférieur à une valeur fixée (généralement 1) sont enlevés, ce qui modifie la surface libre du modèle. Dans les itérations suivantes, la stabilité des blocs en bordure de la nouvelle surface libre est étudiée jusqu'à ce qu'aucun bloc ne soit plus stable. L'analyse des mouvements et le calcul de la résultante des forces sont basés sur une méthode vectorielle développée par *WARBURTON* [12].

Afin de modéliser la centrifugation, le poids volumique du matériau a été multiplié par l'accélération appliquée. En prenant la géométrie représentée à la figure 3 aucun bloc ne s'est avéré instable dans le modèle avant d'avoir enlevé le bloc de pied. Après avoir enlevé ce dernier, une dizaine de blocs sont devenus instables pour une gravité de 1, une cohésion nulle et angle de frottement de 28° , cependant le calcul du volume instable n'a pas pu s'effectuer correctement du fait des faibles dimensions du modèle. En effet *RESOBLOK* a jusqu'ici été utilisé pour modéliser des sites réels et des arrondis sont introduits dans le calcul des volumes. Dans le cas de la représentation du bloc de craie, tous les volumes de blocs étaient arrondis à une valeur nulle. D'autres simulations ont été réalisées en multipliant les dimensions des blocs par 100 et la masse volumique par 10^6 , cependant comme elles posent le problème des similitudes et vont à l'encontre des choix de départ «représenter le bloc de craie sans chercher dans un premier temps à reproduire directement des phénomènes à l'échelle du site», cette voie a été abandonnée.

3.3. MODÉLISATION MÉCANIQUE PAR ÉLÉMENTS DISTINCTS

Une seconde série de modélisations mécaniques a été réalisée en contrainte-déformation avec le logiciel éléments distincts *3DEC* (*CUNDALL* et al. [3], *Itasca* [6]). La plupart des calculs ont été réalisés en considérant les blocs indéformables, puis pour une gravité de 87 g, un calcul en blocs déformables a été également conduit. Les caractéristiques attribuées aux joints sont les mêmes pour toutes les familles quelle que soit leur orientation et elles ont été progressivement affaiblies, pour différentes valeurs de gravité. Plus précisément, pour chaque valeur de gravité testée, plusieurs valeurs de cohésion des joints ont été analysées et l'angle de frottement a été diminué jusqu'à rupture partielle, puis totale, des 2 blocs du modèle numérique représentant les 2 blocs du modèle centrifugé délimités à la figure 4.

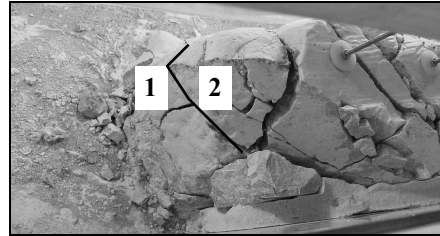


Fig. 4. Vue du dessus du volume centrifugé. Délimitation des blocs 1 et 2 qui se sont progressivement détachés lors de la centrifugation

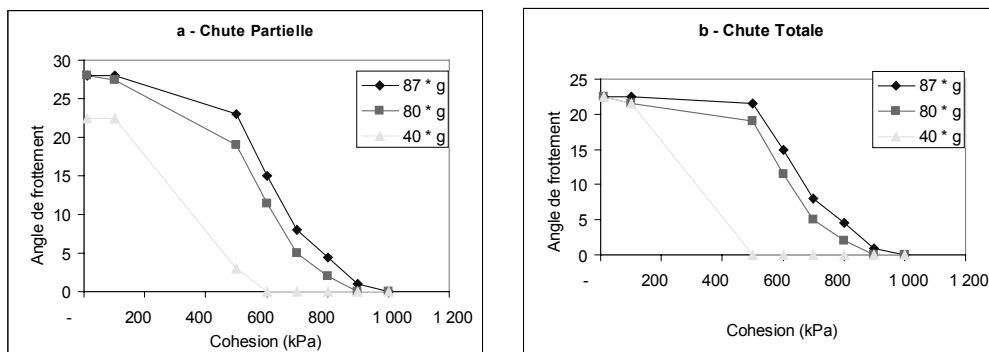


Fig. 5. Cohésion et angle de frottement conduisant à une chute partielle (a) ou totale (b) pour différentes valeurs de cohésion

Le modèle est en équilibre si les forces nodales de chaque centre de gravité (ou de chaque nœud si les blocs sont déformables) sont nulles. En pratique le calcul est considéré comme convergent quand l'unbalanced force (force nodale maximale) est inférieure à un seuil fixé, fonction de la force maximale appliquée aux nœuds, elle-même dépendante des paramètres du calcul: maillage, pas de temps... Dans notre cas, pour une cohésion donnée, l'angle de frottement a été diminué jusqu'à ce que le calcul diverge (la valeur de l'unbalanced force devient supérieure à un seuil donné) et qu'il y ait glissement du bloc 1. L'angle de frottement correspondant a été dénommé rupture partielle, car à ce stade, le bloc 2 n'a qu'un faible déplacement. Cet angle a été ensuite abaissé, jusqu'à ce que la vitesse du bloc 2 dépasse un seuil et que l'on atteigne une « rupture totale ». Pour de fortes cohésions, les deux types de chute se produisent pour une même valeur d'angle de frottement. Une large gamme de cohésion a été explorée (cf. figure 5) bien qu'il soit probable que la cohésion réelle des joints ne dépasse pas une centaine de kPa. Le modèle numérique a donc bien reproduit des phénomènes équivalents à ceux observés sur le modèle physique. L'influence de la déformabilité des blocs a été testée pour une accélération de 87 g et les angles de frottement diffèrent au maximum de 1° pour de faibles cohésions.

4. CONCLUSIONS

Le travail présenté visait à comparer des modélisations numériques à un modèle physique de massif rocheux fracturé. Nous avons montré que la représentation géométrique, puis mécanique avait permis de reproduire le mécanisme d'instabilité observé et une étude paramétrique a permis de déduire les caractéristiques mécaniques de joint conduisant à l'instabilité dans les modèles numériques. Ces comparaisons doivent être affinées et les problèmes numériques relatifs aux petites dimensions résolus, mais elles encouragent à poursuivre le travail méthodologique entrepris et serviront à définir un cahier des charges précis pour des expérimentations ultérieures. Ce premier test permet en effet d'envisager des procédures plus systématiques de comparaison de modèles physiques de blocs fracturés aux modèles numériques.

RÉFÉRENCES

- [1] ASOF M., *Etude du comportement mécanique des massifs rocheux fracturés en blocs (méthode à l'équilibre limite): réalisation et application*, Ph.D. thesis, 1991, LAEGO, Ecole des Mines, INPL, France, 142.
- [2] BAROUDI H., HANTZ D., ASOF M., PIGUET J.P., *Bench stability in open pit mines: A methodology for jointed rock masses*, Régional Conference on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, California, June 3–5, 1992.
- [3] CUNDALL P.A., HART R.D., *Numerical Modeling of Discontinua*, Engr. Comp., 9, 101–113, [in:] Comprehensive Rock Engineering, 1993, Vol. 2, 231–243 (J.A. Hudson, Ed.), Oxford, Pergamon Press.
- [4] DERSHOWITZ W., LEE G., GEIER J., FOXFORD T., LAPOINTE P., THOMAS A., *FracMan Interactive Discrete Feature Data Analysis, Geometric Modeling, and Exploration Simulation*, User Documentation, Version 2.6. Golder Associates Inc., Seattle, 1998.
- [5] HELIOT D., *Generating a blocky rock mass*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1988, Vol. 25, No. 3, June 1988, 127–138.
- [6] Itasca Consulting Group Inc. *3DEC (3-Dimensional Distinct Element Code), Version 3.0*, 2003, Minneapolis, Minnesota.
- [7] JING L., *Block system construction for three-dimensional discrete element models of fractured rocks*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, 2000, Vol. 37, No. 4, June 2000, 645–659.
- [8] KORINI T., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., BENNANI M., *Optimisation du soutènement par boulonnage des excavations creusées dans un massif rocheux fracturé en blocs*, 4ème Colloque Franco-Polonais: Géotechnique et Environnement, Nancy, 16–17 Novembre 1993, 91–102.
- [9] MALLET J.L., *Geomodeling*, Applied Geostatistics, 2002, Oxford University Press.
- [10] STONE K.J.L., TAYLOR N.R., *Modelling of fractured rock masses*, International Conf. on Physical Modelling in Geomechanics, St. John's, NF, Canada, July 10–12, 2002, Balkema, Rotterdam.
- [11] STONE K., MERRIEN-SOUKATCHOFF V., *Physical and Numerical Modeling of Chalk Slopes*, International Conference on Landslides and Climate Change – Challenges and Solutions, Ventnor, Isle of Wight, UK, 21–24th May, 2007.
- [12] WARBURTON P.M., *Vector stability analysis of an arbitrary polyhedral rock block with any number of free faces*, Int. Journal of Rock Mechanics. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1981, Vol. 18, 415–427.