



HAL
open science

Modélisation discrète du coin Sud-Est de l'Acropole : une analyse multi-échelle

Cédric Lambert, Félix Darve, François Nicot

► **To cite this version:**

Cédric Lambert, Félix Darve, François Nicot. Modélisation discrète du coin Sud-Est de l'Acropole : une analyse multi-échelle. 17e Congrès français de mécanique, 2005, Troyes, France. pp.1-6. hal-02586896

HAL Id: hal-02586896

<https://hal.inrae.fr/hal-02586896>

Submitted on 9 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation discrète du coin sud est de l'Acropole : une approche multi-échelle

Cédric Lambert*, Félix Darve* & François Nicot**

*Laboratoire Sols, Solides, Structures (INPG, UJF, CNRS)

B.P. 53 - 38041 Grenoble cedex

lambert@geo.hmg.inpg.fr - Felix.Darve@inpg.fr

** Cemagref de Grenoble - Unité ETNA

B.P. 76 - 38402 Saint Martin d'Hères Cedex - France

francois.nicot@grenoble.cemagref.fr

Résumé :

Une modélisation 2D a été réalisée en utilisant le code éléments discrets UDEC. Une nouvelle loi d'interface, incrémentale non-linéaire, a été implémentée pour décrire l'interaction entre chaque bloc. La calibration de cette loi s'est faite à partir de modélisations discrètes d'essais sur joints rocheux à l'échelle du grain. La stabilité du massif est ensuite étudiée en introduisant la condition de stabilité de Hill dans sa formulation discrète.

Abstract :

A 2D modelling of a rock slope is presented. A new incremental non linear constitutive relation for interfaces has been developed and implemented in discrete element code UDEC. It describes the interaction between blocks. It has been calibrated by simulating rock joint tests at the grain scale with another discrete method "Contact Dynamics". Then the stability of the rock mass is studied by introducing Hill's condition of stability under its discrete formulation.

Mots-clefs :

modélisation multi-échelle ; éléments discrets ; instabilités ; loi d'interface ; joints rocheux

1 Introduction

L'Acropole d'Athènes se présente comme une colline de calcaire du crétacé supérieur au rocher extrêmement fracturé reposant sur une épaisse couche de schistes. Les cartes géologiques révèlent l'existence de deux familles de discontinuités pouvant grandement affecter la stabilité de l'escarpement. De plus l'observation récente de fissures dans le mur d'enceinte de l'Acropole laisse craindre un possible mouvement de l'escarpement.

On se propose d'étudier la stabilité du massif rocheux par une approche multi-échelle [1]. Une modélisation à l'échelle du grain, avec une méthode discrète, permet de tenir compte de l'influence d'un matériau de remplissage dans une discontinuité ou encore de l'usure des épontes. Une nouvelle loi d'interface incrémentale non linéaire est utilisée pour décrire le comportement d'un joint à l'échelle mésoscopique. Enfin l'implémentation de cette loi dans un autre code aux éléments discrets permet d'étudier la stabilité du massif à l'échelle macroscopique.

2 Modélisation à l'échelle microscopique

2.1 Méthode aux éléments discrets

Pour la modélisation à l'échelle microscopique une méthode discrète a été utilisée, la méthode des "contacts dynamiques" [2]. Il s'agit d'une méthode de résolution des équations de la dynamique par

un schéma d'intégration implicite. Le contact entre chaque élément est régi par une condition de non pénétration (condition de Signorini) et une loi de frottement de Coulomb.

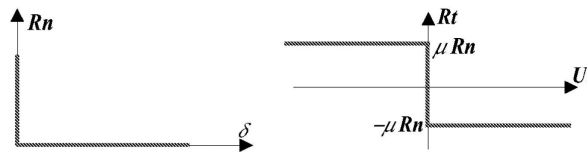


FIG. 1 – Illustration de la condition de Signorini à gauche et du frottement de Coulomb à droite

Un collage est introduit entre les éléments pour simuler le comportement des deux épontes du joint. La rupture intergranulaire des liaisons est décrite par un critère de Mohr-Coulomb.

2.2 Simulations numériques

Deux types d'essais ont été simulés à partir de la même configuration initiale (Fig. 2) :

- des essais de cisaillement à déplacement relatif normal u constant ;
- des essais de compression à déplacement relatif tangentiel γ constant.

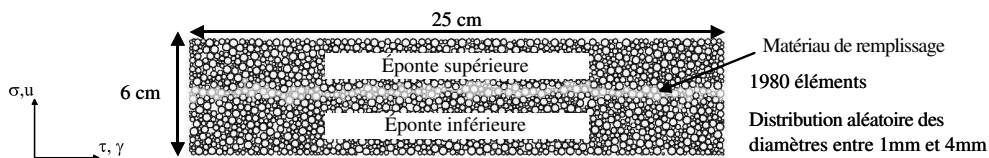


FIG. 2 – Configuration géométrique des joints numériques

Ces essais ont été réalisés pour différentes valeurs des déplacements relatifs normaux u et tangentiels γ , pour différentes valeurs de la limite en traction σ_t (de 1MPa à 20 MPa) et pour deux valeurs d'angle de frottement intergranulaire ϕ ($\tan \phi = 0.7$ et $\tan \phi = 1$)

3 Modélisation à l'échelle mésoscopique

3.1 Loi d'interface incrémentale non-linéaire

La loi est de type incrémentale non linéaire obtenue en ne conservant que les deux premiers termes du développement de Taylor de la relation reliant $(d\tau, d\sigma)$ à $(d\gamma, du)$. Cette loi de comportement est donnée par [3] [4] [5] :

$$\begin{bmatrix} d\tau \\ d\sigma \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} d\gamma \\ du \end{bmatrix} + \frac{1}{\|dl\|} B \begin{bmatrix} d\gamma^2 \\ du^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

avec $\|dl\| = \sqrt{du^2 + d\gamma^2}$

$d\tau$ et $d\sigma$ sont respectivement l'incrément de contrainte tangentielle et normale et $d\gamma$ et du l'incrément de déplacement relatif tangentiel et normal. A et B sont deux matrices 2*2 déterminées à partir de deux autres matrices P^+ et P^- par une procédure d'identification. L'indice "+" désigne le comportement en compression ($du > 0$ ou $d\gamma > 0$) et l'indice "-" le comportement en extension ($du < 0$ ou $d\gamma < 0$).

$$A = \frac{1}{2} (P^+ + P^-) \quad \text{et} \quad B = \frac{1}{2} (P^+ - P^-) \quad (2)$$

$$P^+ = \begin{bmatrix} G_{\gamma}^+ & G_u^+ \\ N_{\gamma}^+ & N_u^+ \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad P^- = \begin{bmatrix} G_{\gamma}^- & G_u^- \\ N_{\gamma}^- & N_u^- \end{bmatrix} \quad (3)$$

On introduit donc 4 modules en compression ainsi que 4 modules en extension déterminés par des relations analytiques choisies les plus simples possible (fig. 3).

$$\begin{aligned} N_\gamma &= \left. \frac{\partial \sigma}{\partial \gamma} \right|_{u=cte} & G_\gamma &= \left. \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} \right|_{u=cte} \\ N_u &= \left. \frac{\partial \sigma}{\partial u} \right|_{\gamma=cte} & G_u &= \left. \frac{\partial \tau}{\partial u} \right|_{\gamma=cte} \end{aligned} \quad (4)$$

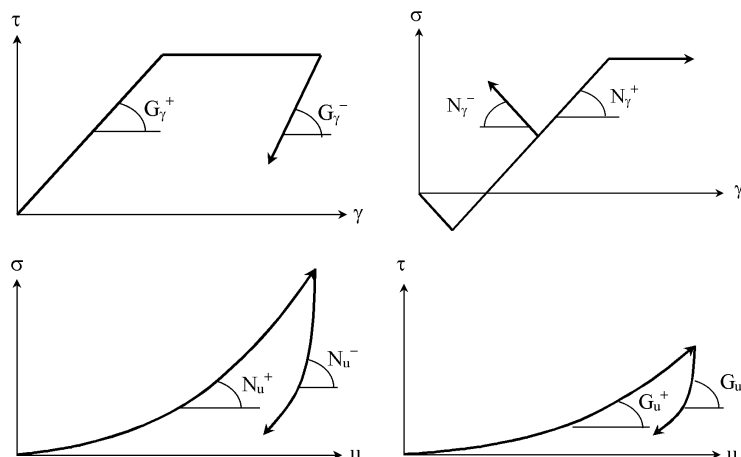


FIG. 3 – Comportement simplifié d'un joint sur des chemins à u constant en haut et à γ constant en bas.

3.2 Calibration

La calibration de la loi se fait sur les chemins définis précédemment :

- N_γ et G_γ à partir des essais de cisaillement à déplacement relatif normal u constant (cisaillement isochores) ;
- N_u et G_u à partir d'essais de compression à déplacement relatif tangentiel γ constant (compression oedométrique).

A partir des résultats des simulations numériques discrètes présentées au paragraphe 2, on peut exprimer les modules tangents N_γ et G_γ :

$$N_\gamma = N_\gamma^0 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_0} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{\beta_1} \quad \text{et} \quad G_\gamma = G_\gamma^0 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_0} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{u}{u_0} \right)^{\beta_2} \quad (5)$$

où N_γ^0 , G_γ^0 , σ_t , α_i et β_i sont des paramètres relatifs au matériau modélisé.

Le code LMGC de par sa nature ne permet pas de déterminer les deux modules restants, N_u et G_u . Les déplacements des épontes observés sur un chemin oedométrique sont fortement dépendants des paramètres numériques tels que le pas de temps ou le nombre d'itérations. Pour palier à ce problème on a donc fait le choix de calibrer les modules restants à partir d'essais expérimentaux effectués au laboratoire 3S par Armand [6]. Pour déterminer G_u , aucune base de donnée expérimentale n'a été trouvée. On a donc fait l'hypothèse que G_u est proportionnel au module N_u .

$$N_u = N_u^0 \sigma_m^{XN} \quad \text{et} \quad G_u = L_u N_u^0 \sigma_m^{XN} \quad \text{avec} \quad L_u = \text{Atan}(\lambda_u) \quad (6)$$

Si on considère une interface en dents de scie d'angle θ , le cas $L_u = 0$ correspond à une interface parfaitement plane ($\theta = 0^\circ$), l'écrasement du joint n'entraîne aucun effort tangentiel. Si on prend $L_u = 1$, on trouve des efforts normaux égaux aux efforts tangentiels, ce qui correspond à une interface avec des indentations à 45° . Ce paramètre L_u est donc à ajuster en fonction de la rugosité de l'interface.

4 Modélisation à l'échelle macroscopique

4.1 Implémentation dans le code éléments discrets UDEC

La loi d'interface incrémentale non linéaire a été implémentée dans le code éléments discrets UDEC [7]. Dans UDEC, le milieu est assimilé à un ensemble discret de blocs. Les discontinuités y sont vues comme des interfaces avec une loi d'interface spécifique reliant les déplacements relatifs aux force d'interaction. Les blocs sont polygonaux et peuvent être choisis rigides ou déformables (et sont alors maillés en éléments triangulaires).

Pour tester la validité de la loi une fois implémentée, plusieurs modélisations d'essais sur joints rocheux ont été réalisées, correspondant aux chemins de calibration (essais de cisaillement à volume constant et essais de compression oedométrique (fig. 4)).

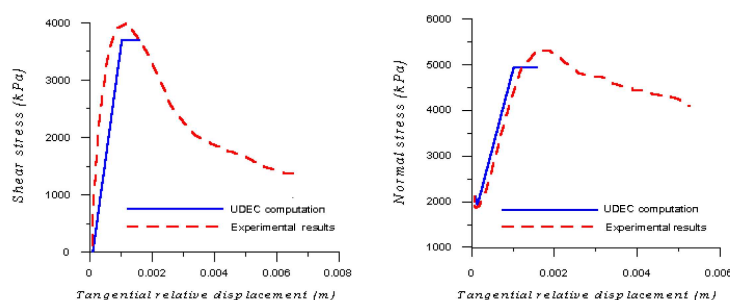


FIG. 4 – Modélisation d'un chemin de cisaillement isochore avec UDEC et la loi incrémentale non linéaire et comparaison avec des résultats expérimentaux.

4.2 Modélisation de l'Acropole d'Athènes

4.2.1 Présentation du modèle

La stabilité du coin sud-est de l'Acropole d'Athènes a été étudiée en utilisant la démarche présentée jusqu'ici. Dans le modèle utilisé (fig. 5), dans un souci d'économie de temps de calcul et de mémoire, seules les discontinuités du massif sont décrites avec la loi incrémentale non-linéaire. Un frottement de Coulomb est utilisé pour la description du comportement des autres discontinuités. De même les éléments du mur d'enceinte sont rigides alors que le massif et le substratum élastique sont eux déformables.

4.2.2 Chargement

Le calcul se déroule en deux phases. Dans un premier temps, on applique la gravité uniquement au massif et au substratum élastique et dans un deuxième temps on rajoute le mur d'enceinte. L'application de la gravité se fait progressivement en 10 étapes de 0.1 *g*. Pour chaque étape, le calcul est mené jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

4.2.3 Définition d'un critère de stabilité local et global

L'introduction du critère de Hill [8] permet l'étude de la stabilité du massif en considérant le signe du travail du second ordre normalisé :

$$t = \frac{d\sigma du + d\tau d\gamma}{\sqrt{d\sigma^2 + d\tau^2} \sqrt{du^2 + d\gamma^2}} \quad (7)$$

L'intégration du travail du second ordre, grandeur locale, sur l'ensemble des discontinuités du massif définit une grandeur globale

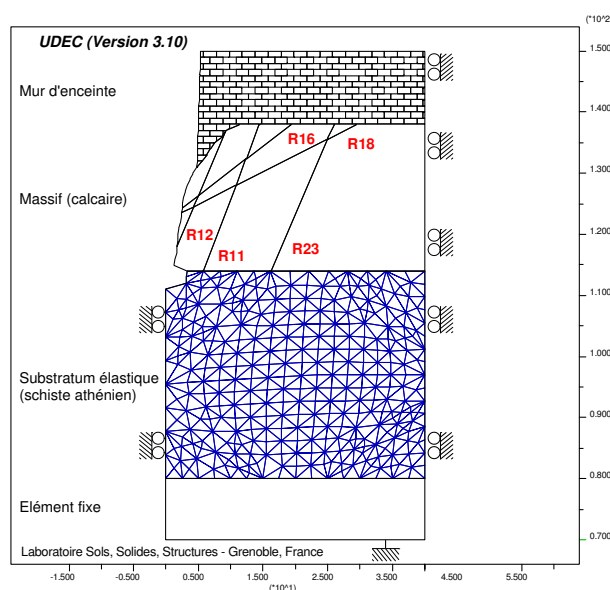


FIG. 5 – Conditions aux limites appliquées à la section modélisée.

$$d^2W_{global} = \frac{1}{L_{totale}} \sum_{discont.} (d\sigma du + d\tau d\gamma) \cdot L_{disc} \quad (8)$$

où L_{disc} représente la longueur du joint où la contrainte est appliquée

4.2.4 Analyse de la stabilité

De nombreux joints ont atteint un état de contrainte situé sur le critère de plasticité (fig. 6) sans pour autant avoir mené le massif à la rupture. Le travail du second ordre local montre que peu de contacts sont en réalité potentiellement instables. De plus le travail du second ordre global (fig. 7) diminue avec l'application progressive de la gravité sur le mur d'enceinte mais reste positif.

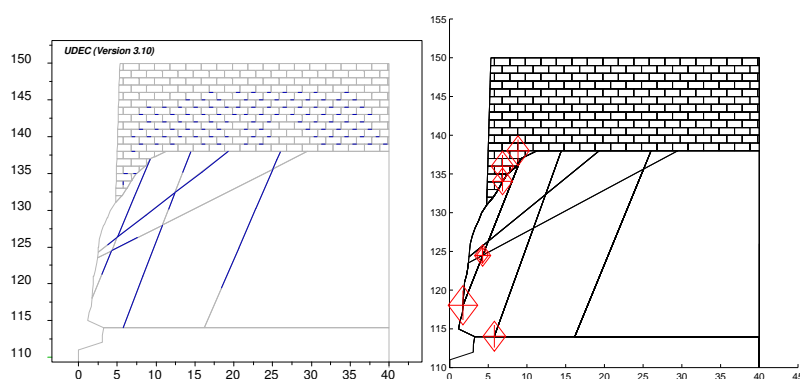


FIG. 6 – Discontinuités où l'état de contrainte est sur le critère de Mohr Coulomb (à gauche) et où le travail du second ordre local normalisé est négatif (à droite)

5 Conclusion

La stabilité d'une falaise rocheuse est étudiée en abordant le problème sous plusieurs échelles successivement, l'échelle microscopique avec la méthode discrète "Contact Dynamics", l'échelle mésoscopique

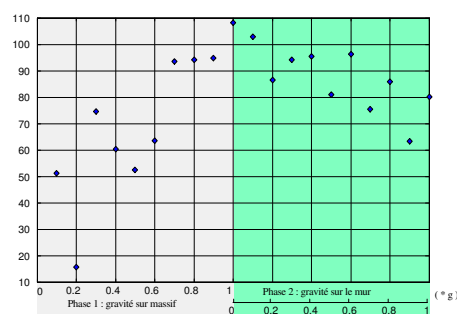


FIG. 7 – Evolution du travail du second ordre global au cours des différentes phases de chargement

avec une nouvelle loi d'interface et l'échelle macroscopique avec le code aux éléments discrets UDEC. L'analyse au niveau microscopique a permis de déterminer l'influence sur les modules tangents de paramètres tels que la résistance à la traction σ_t , les déplacements relatifs. Au niveau mésoscopique, une nouvelle loi de comportement a été développée pour les joints rocheux. Cette loi incrémentale non linéaire se calibre en ajustant 10 paramètres (3 pour N_γ^+ , 3 pour G_γ^+ , 2 pour N_u^+ , 1 pour G_u^+ et 1 pour le module à la décharge). Au niveau macroscopique, le code aux éléments discrets UDEC permet l'implantation du critère de stabilité de Hill et de la nouvelle loi d'interface. La définition d'un critère global nous renseigne également sur la stabilité d'un massif.

Remerciements

Les projets européens DIGA (5^{ème} PCRD) et LESSLOSS (6^{ème} PCRD) soutiennent cette recherche, menée dans le cadre de la structure fédérative de recherche RNVO. Nous remercions ces programmes pour leurs aides.

Références

- [1] C. Lambert. *Modélisation multi-échelles des instabilités rocheuses*. Thèse à paraître, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2005.
- [2] J. Lanier and M. Jean. Experiments and numerical simulations with 2D-disks assembly. *Powder Technology*, 109 :206–221, 2000.
- [3] F. Darve, E. Flavigny, and M. Méghachou. Yield surfaces and principle of superposition revisited by incrementally non-linear constitutive relations. *Int. J. Plasticity*, 11(8) :927–948, 1995.
- [4] F. Darve and X. Roguiez. Constitutive relations for soils, new challenges. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4 :9–35.
- [5] F. Darve and F. Laouafa. *Constitutive equations and instabilities of granular materials*, pages 3–43. Birkhauser, 2002.
- [6] G. Armand. *Contribution à la caractérisation en laboratoire et à la modélisation constitutive du comportement mécanique des joints rocheux*. PhD thesis, Université Joseph Fourier, Grenoble, 2000.
- [7] P.A. Cundall. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems. In *Proc. Symp. Soc. Int. Mécanique des Roches*, volume 1, pages II–8, Nancy, France, 1971.
- [8] Robert Hill. A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. *J. of the Mech. and Phys. of Solids*, 6 :239–249, 1958.