Comportement mécanique d'un massif rocheux fracturé considéré comme un assemblage d'éléments discrets : exemple d'une modélisation par la méthode *Non-Smooth Contact Dynamics*

A. RAFIEE
University of Zanjan
University Boulevard
PO Box 313
45371-38111, Iran

M. VINCHES
Projet Géo-Mécanique et Hydrologie
Centre des Matériaux de Grande Diffusion
École des mines d'Alès
6, av. des Clavières
30319 Alès Cedex, France
marc.vinches@ema.fr

C. BOHATIER
Laboratoire de Mécanique et Génie civil
UMR 5508
Université Montpellier II
CC 048 place Eugène-Bataillon
34095 Montpellier Cedex 5
France
bohatier@lmgc.univ-montp2.fr

Résumé

Cet article présente l'application de la méthode NSCD *(Non-Smooth Contact Dynamics)* à la modélisation du comportement mécanique d'un massif rocheux fracturé. Cette méthode numérique permet de calculer le comportement dynamique d'assemblages de corps soumis à des contraintes unilatérales de non interpénétration mutuelle, en tenant compte, dans le cas de contacts, de lois d'interaction spécifiées, mais aussi de sauts de vitesses qui peuvent résulter de collisions. La non-régularité essentielle du problème est traitée sans recourir à la régularisation. La méthode est utilisée ici pour analyser la stabilité d'un massif rocheux dont la géométrie est créée à l'aide d'un modèle d'analyse statistique des données d'orientation des discontinuités mesurées dans le cadre d'un aménagement routier. Dans le code de génération du massif fracturé, on a la possibilité d'intégrer les systèmes de fracturation, de manière hiérarchique ou non, en fonction de l'information statistique et géostatistique fournie par les mesures sur le terrain. Pour chaque famille, la continuité des fractures au sein du massif est contrôlée par le paramètre de persistance. Un paramètre auxiliaire permet de définir un volume minimal des blocs engendrés dans le modèle. Des résultats sur un exemple réel sont présentés à titre d'illustration de la méthode.

Mots-clés : **réseaux de fractures, modélisation numérique, talus, méthode NSCD, massif rocheux, analyse de stabilité, LMGC90.**

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 01/03/2010.

Mechanical behavior of a fractured rock mass considered as an assembly of distinct elements: example of a model using the Non-Smooth Contact Dynamics method

Abstract

This paper presents the application of the Non-Smooth Contact Dynamics method (NSCD) to the modeling of the mechanical behavior of a fractured rock mass. This numerical method allows us to compute the dynamic behavior of a collection of solids subjected to unilateral constraints of no interpenetration, taking into account in case of contacts, specified interaction laws, but also velocity jumps resulting from collisions. The non-smooth character of this problem is tackled without regularization procedures. The method is used in this case for the stability analysis of a fractured rock mass. Its geometry is generated on the basis of the statistical analysis of orientation data of discontinuities, measured on a road site. In the code developed for the generation of the rock mass, one can input the fracture sets in a hierarchical way, depending on the statistical and geostatistical information obtained from the field measurements. For each family, the continuity of the fractures, inside the rock mass, is controlled by a persistence parameter. An auxiliary parameter allows the definition of a minimal volume of the generated blocks in the model. Some results on a real engineering case are presented as an illustration of the method.

Key words: fracture systems, numerical modeling, slope, NSCD method, rock mass, stability analysis, LMGC90.

1 Introduction

Après le travail de pionnier de Cundal (1971), Cundal et Strack (1979), un certain nombre de codes de calcul ont été mis au point pour simuler le mouvement ou l'équilibre d'ensembles de solides. A l'heure actuelle, de nombreuses simulations d'ouvrages en milieux rocheux, en maçonnerie, ou dans des milieux granulaires, sont réalisées en utilisant ces codes. Les algorithmes de discrétisation du temps (généralement de type explicite) appliqués dans l'intégration des équations de la dynamique, doivent recourir à des intervalles de temps très courts, et éventuellement à l'intégration d'un amortissement artificiel afin d'assurer la stabilité numérique des calculs.

Dans ce qui suit, on présente l'application d'une approche implicite à la modélisation du comportement mécanique d'un massif rocheux, considéré comme un assemblage granulaire. La méthode NSCD *(Non-Smooth Contact Dynamics)* initiée et développée par Moreau (1988, 1994, 1999, 2000, 2003) et Jean (1995, 1999), Jean *et al.* (2001), Jean et Moreau (1992), est dédiée à la résolution de problèmes relatifs aux systèmes dynamiques en présence de contraintes unilatérales. Cette méthode fournit un cadre mathématique rigoureux, sur les plans théorique et numérique, permettant d'appréhender correctement les problèmes de contact frottant. En particulier, elle propose un traitement non régularisé (pas de pénalisation) des conditions de contact unilatéral et de frottement de Coulomb. De plus, une attention particulière est portée à l'intégration numérique en temps des équations du mouvement en présence de telles contraintes, susceptibles de générer des discontinuités en vitesses (Monnerie et Acary, 2001). Des détails sur cette méthode sont présentés dans Acary *et al.* (1999), Dubois et Jean (2003), Renouf *et al.* (2004, 2005, 2006).

2 Les données de fracturation du Pallat

Dans le cadre d'un aménagement de la route nationale 116 entre Prades et Mont-Louis, est prévue la réalisation de créneaux de dépassement. Le Laboratoire régional des ponts et chaussées de Toulouse a conduit une reconnaissance détaillée du créneau du Pallat (600 m) et plus particulièrement des conditions de réalisation des talus rocheux (Guittard et Virely, 2005).

La protection des ouvrages existants à proximité de l'emprise du projet engendre de fortes contraintes (Fig. 1). Les talus amont et aval de la route actuelle devront faire l'objet d'une purge des blocs susceptibles d'être déstabilisés par les vibrations. Le relevé de fracturation, indispensable à la représentation du site, a été réalisé sur neuf lignes de mesures représentatives de l'ensemble du massif. Ce relevé a été pratiqué sur des lignes continues positionnées sur les affleurements, et situées à 1,50 m du sol en ne tenant compte que des discontinuités naturelles (diaclases, filons, schistosité), les zones présentant des désordres liés au terrassement ont été écartées (effets arrière).

Le tracé recoupe deux grands ensembles :

– les migmatites, ensemble qui à l'échelle de l'affleurement est un mélange de roches de types granite, généralement à grain grossier, et gneiss, à foliation souvent peu marquée ou confuse ;

FIG. 1 **Vue panoramique du secteur du Pallat (aperçu de l'ensemble des ouvrages à protéger, notamment d'une voie ferrée en bas de la photo).**
Scenic view of the Pallat area (general presentation of the structures to be protected, especially the railway at the bottom of the picture).

TABLEAU I **Orientation des vecteurs normaux moyens pour chaque famille de discontinuités, obtenue à partir de la figure 2c, nombre de joints et espacement (en cm) pour chaque famille.**
Orientation of the average normal vectors for each fracture family, obtained from figure 2c, number of joints, and spacing (in cm) for each family.

Famille	Nombre de joints	Pendage (degrés)	Direction (degrés)	Espacement moyen (cm)
1 +	139	9	200	37
2 Δ	92	10	92	90
3 o	105	21	307	85
4 x	56	55	354	130

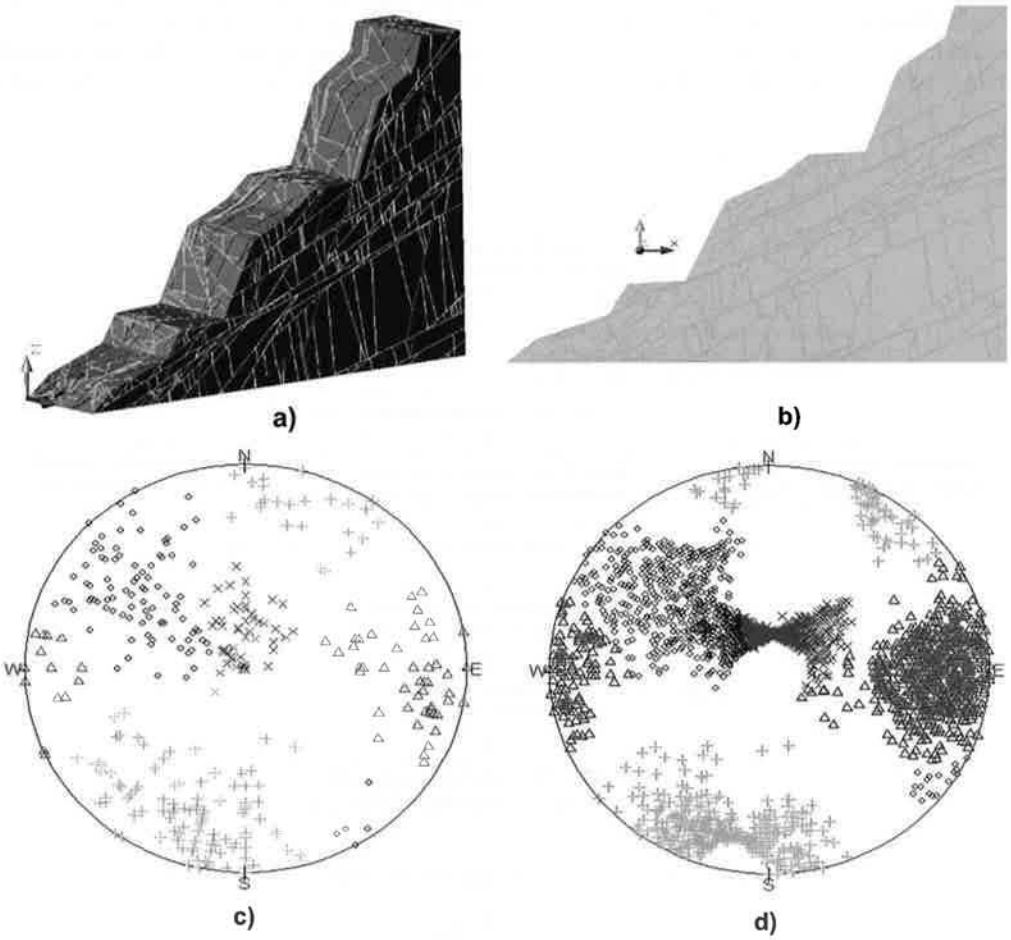

FIG. 2 **Modèle créé pour le talus du Pallat avec une hauteur de 130 m, (a) massif fracturé par quatre familles, (b) coupe 2D du talus, (c) projection stéréographique des données mesurées sur le terrain mises en famille par l'algorithme de regroupement spectral (hémisphère inférieur), (d) projection stéréographique des plans de joints générés par l'algorithme dans le modèle (hémisphère inférieur).**
Model of the 130 m high Pallat slope, (a) fractured rock mass with four families, (b) 2D section of the slope, (c) stereographic projection of the measured data grouped by the spectral clustering method (lower hemisphere), (d) stereographic projection of the joint planes created in the model (lower hemisphere).

– les micaschistes, roches métamorphiques grises à patine « rouille », à grain moyen, à schistosité plane et bien marquée, riches en lamelles de mica visibles à l'œil nu et à débit facile en plaques. Les lits de mica (parallèles à la schistosité) forment des surfaces brillantes propices aux glissements plans.

Dans cette étude, on a choisi la ligne de mesure sur laquelle un nombre important de fractures a été mesuré pour qu'on puisse avoir la possibilité de faire des analyses statistiques. La ligne de mesure numéro 1, dans la migmatite, avec 392 mesures de fractures, est longue de 90 m. La géométrie du massif rocheux est obtenue au moyen d'outils développés dans l'environnement logiciel AutoCAD® qui permettent d'utiliser les données telles que l'orientation des familles des discontinuités et l'espacement entre les discontinuités. Le regroupement des discontinuités en ensembles principaux, pour cette ligne de mesure, a été réalisé selon la méthode de regroupement spectral, proposée par Jimenez-Rodriguez et Sitar (2006). On a élaboré un code dans l'environnement logiciel R, libre de droits et accessible sur internet, sur la base de l'algorithme proposé par ces auteurs. Le calcul du regroupement spectral est effectué sur les 392 joints. Les paramètres calculés pour chaque famille sont représentés dans le tableau I.

Dans la figure 2d, sont représentées les partitions de l'ensemble des données, calculées par la méthode du regroupement spectral en quatre familles, avec une projection des pôles sur l'hémisphère inférieur. Le calcul de la direction du vecteur normal moyen pour chaque famille de discontinuités a été réalisé.

3

Genèse du modèle de massif rocheux

Dans cette partie, on détaille la méthode selon laquelle les paramètres statistiques de la distribution des données d'orientation (direction et pendage) sont pris en compte, en plus des données concernant la distribution de l'espacement des joints. Ces paramètres sont les valeurs de l'écart-type de l'angle de tolérance par rapport à des valeurs moyennes, calculées par regroupement des joints, de la direction et du pendage pour chacune des familles. Ils sont calculés en considérant une distribution normale ajustée sur ces valeurs. L'écart-type de ces distributions est pris en compte pour créer le modèle.

Ces valeurs de l'écart-type seront utilisées pour faire pivoter les plans des joints dans la phase de définition de l'intersection des plans de fractures entre eux, afin de permettre une variation locale de cette orientation. Ensuite, le nouveau plan sera utilisé pour couper la géométrie du talus rocheux. Le schéma de cet algorithme est présenté dans la figure 3. A l'aide de cette méthode, on peut engendrer des modèles qui prennent en compte une variabilité de l'orientation des joints, ce qui permet d'intégrer dans le modèle les orientations similaires à celles mesurées sur le terrain ayant la même distribution statistique. En outre, comme on sait que les joints n'ont pas toujours la forme d'un plan, en procédant de cette façon, on obtient au final des évolutions d'orientations de joint par une succession de plans de joints, ayant subi de légères rotations lors de leur intersection avec d'autres joints préexistants.

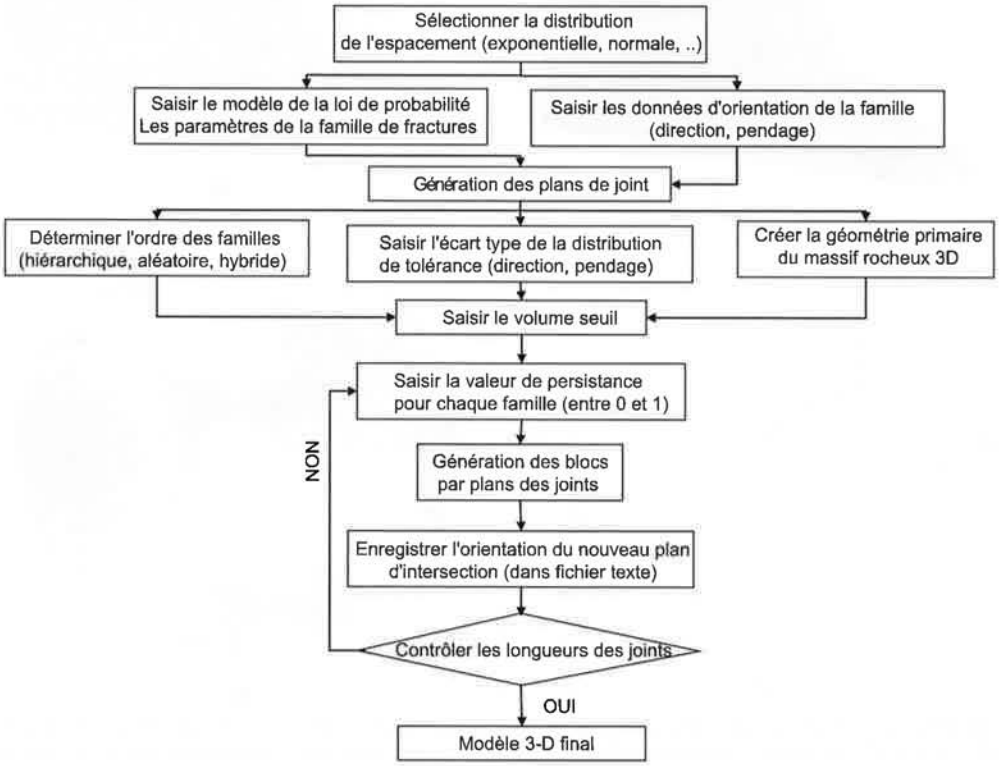

FIG. 3 **Schéma du procédé de la modélisation du massif rocheux fracturé 3D, en intégrant la variabilité de la direction et du pendage des joints.**
Flow chart of the modeling process of the 3D fractured rock mass, integrating the variability of the joints dip and strike.

Cet algorithme est employé pour engendrer le modèle du talus de Pallat, un talus d'une hauteur de 130 m et d'une épaisseur arbitrairement choisie de 30 m, orienté vers le sud (Fig. 2a). Les joints sont inclus dans le modèle selon un ordre hiérarchique (famille 4, puis 3, puis 2, puis 1) et le modèle est engendré en utilisant les valeurs de la variabilité décrites ci-dessus. Une possibilité auxiliaire dans cet algorithme consiste à avoir accès aux données d'orientation des plans de joints qui sont utilisées pour les calculs de l'intersection du modèle primaire. On peut constater sur la figure 2d que les plans créés par l'algorithme pour les familles 1, 2, 3 sont en accord en moyenne avec les mesures faites sur le terrain (Fig. 2c), mais on voit bien que, pour la famille 4, l'orientation des plans sur cette réalisation particulière du modèle ne donne pas la même distribution que celle mesurée. Il est à noter que les effectifs des plans « primaires », et des plans contenant les facettes des différents blocs constituant le modèle sont forts différents, ce qui se traduit par des densités locales bien plus fortes sur la figure 2d, que celles de la figure 2c. Il se peut que cette différence ait pour cause le faible nombre des fractures appartenant à cette famille, ce qui ne permet pas d'obtenir des paramètres statistiques robustes. D'autre part, en observant la répartition des pôles de cette famille sur la projection hémisphérique, on constate que les fractures classées dans cette famille sont très dispersées. On obtient donc des valeurs élevées de l'écart type sur la direction et le pendage, pour les joints appartenant à cette famille. On pourrait améliorer cet algorithme en remplaçant la distribution normale considérée pour l'orientation par la distribution de Fisher (1953).

La figure 4a présente l'histogramme des superficies des facettes des blocs créés dans le modèle de la figure 2a. Cet histogramme montre une forme de distribution proche d'une loi exponentielle. La figure 4b présente l'histogramme du nombre des sommets pour chaque facette de blocs, qui est un indicateur pertinent pour l'analyse de la complexité de la géométrie des blocs (Kalenchuk *et al.*, 2006).

4

Analyse de la stabilité du massif rocheux fracturé par la méthode NSCD

Le modèle stochastique créé dans la section précédente est ensuite utilisé pour étudier la stabilité du talus par la méthode NSCD. Pour cela, on a utilisé le code LMGC90 (Dubois et Jean, 2003). Les modélisations sont effectuées en deux étapes, en utilisant les modèles 2D et 3D, en utilisant dans les deux cas des éléments rigides. Pour le modèle 2D, on a considéré l'interaction entre les blocs selon une loi de frottement sec de Coulomb, avec un angle de frottement égal à 38 degrés, et une masse volumique de 2 000 kg/m^3.

Les résultats obtenus pour la modélisation 2D sont présentés dans la figure 5. Les figures 5a et 5b illustrent deux états de déplacement vertical de certains blocs du talus, respectivement au début de la troisième et de la neuvième seconde de calcul. Le modèle 2D montre que des instabilités sont concentrées au sommet du talus. On constate un glissement sur le plan d'un joint appartenant à la famille 4 qui provoque l'effondrement complet de ce gradin. Ce plan de joint continu a en effet une inclinaison supérieure à l'angle de frottement. L'évolution du nombre de contacts glissants et restant collés pendant le calcul est présentée dans la figure 5c. Ce graphe montre que le glissement produit pendant les trois premières secondes de calcul a provoqué des détachements instantanés pour les blocs précédemment stables. Entre trois et six secondes, on observe des blocs instables dans le modèle, repérables par les pics instantanés dans les nombres des contacts glissants. Cette séquence caractérise la période durant laquelle les blocs amovibles provoquent les chocs sur le deuxième gradin, ce qui, ensuite, produit des instabilités au sein du massif. Le massif se stabilise pendant les trois dernières secondes. Pour mieux comprendre les phénomènes produits pendant les neuf secondes de calcul, on a tracé le graphe de l'évolution de l'énergie cinétique du modèle (Fig. 5d). Ce graphe révèle bien les différentes phases survenues dans le modèle. L'énergie

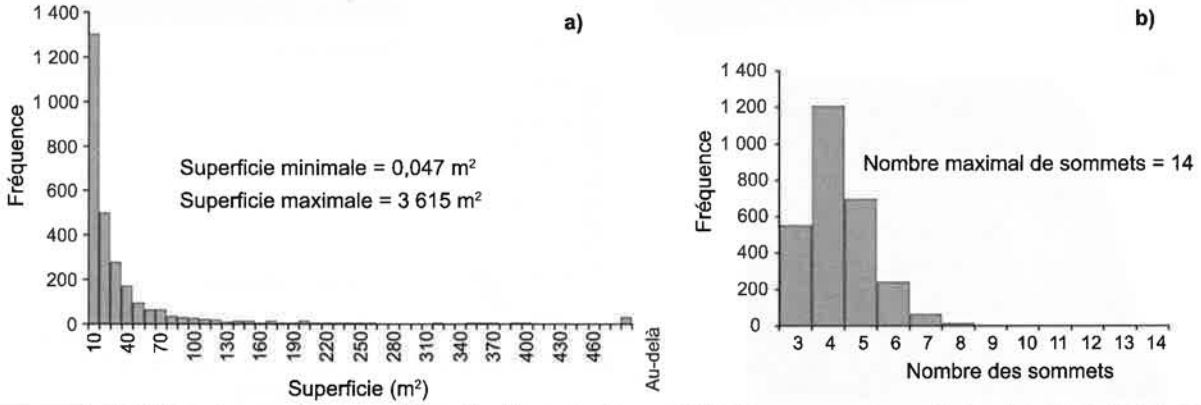

FIG. 4 **a) Histogramme des superficies des faces de blocs ; b) histogramme du nombre des sommets par face de blocs, pour le modèle présenté dans la figure 2b.**
a) Histogram of the block face areas ; b) histogram of the number of vertices per block face, for the model presented in figure 2b.

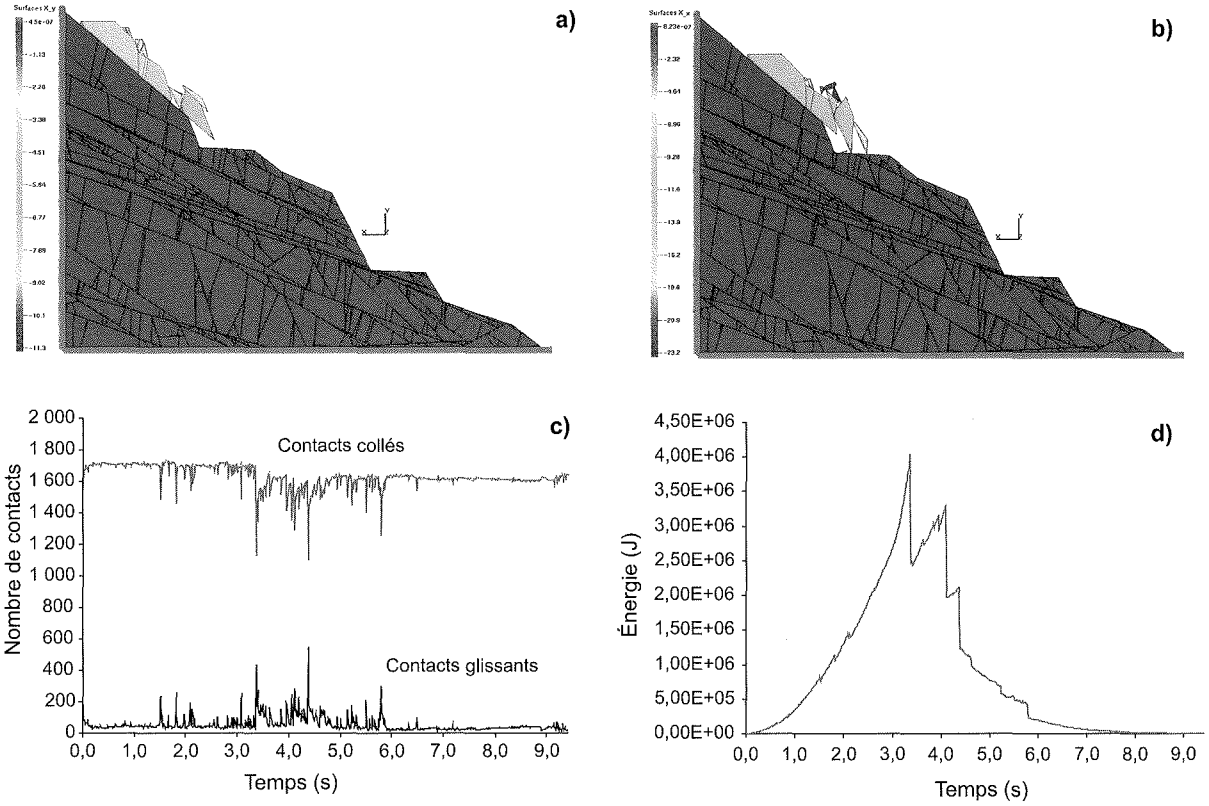

FIG. 5 **Modèle 2D du talus rocheux du Pallat, correspondant à une section sur le modèle 3D. a), b) Deux images consécutives du déplacement horizontal, en mètres ; c) évolution du nombre de contacts glissants et de contacts restant collés pendant le calcul ; d) évolution de l'énergie cinétique du modèle pendant le calcul, en Joules.**

2D model of the Pallat rock mass generated, from a section of the 3D model. a), b) Two consecutive pictures of the horizontal displacement in meter ; c) evolution of the number of sliding and sticking contacts during the computation; d) evolution of the kinetic energy in the model during the computation, in Joules.

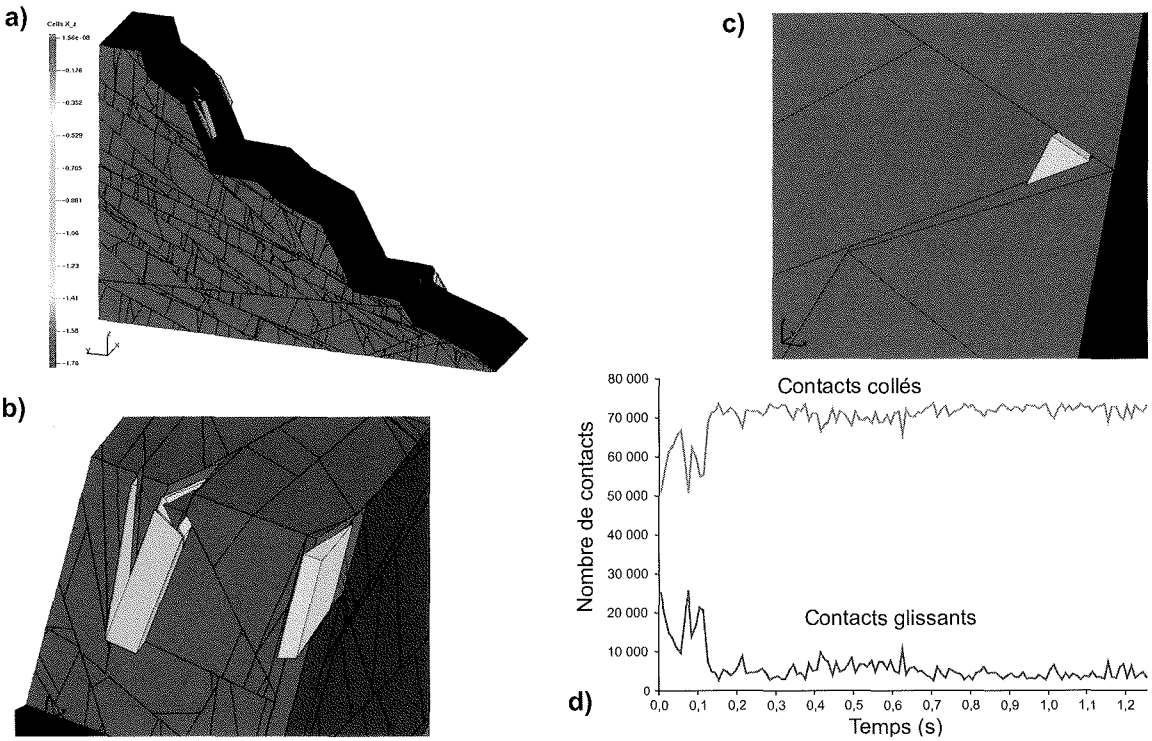

FIG. 6 **Modèle 3D du talus rocheux du Pallat. a) Déplacement vertical en mètre ; b), c) vue rapprochée sur les blocs amovibles ; d) évolution du nombre de contacts glissants et restant collés pendant le calcul.**

3D model of the Pallat rock mass. a) Vertical displacement in meter ; b), c) detail of the unstable blocks ; d) evolution of sliding and sticking contacts during the computation.

cinétique du modèle montre une forte augmentation jusqu'à la troisième seconde, ensuite elle commence à baisser selon une allure régulière, avec des augmentations locales produites par les chocs entre les blocs mobiles et les blocs stables sur le deuxième gradin.

Le modèle 2D précédemment décrit est par trop simplificateur de la réalité physique, parce que ni la géométrie du talus, ni les conditions aux limites n'y sont réalistes. Il est ainsi apparu nécessaire d'effectuer une modélisation 3D, et important de souligner la différence des résultats obtenus avec un modèle 2D, considéré comme une coupe du modèle 3D.

Les résultats du modèle tridimensionnel sont présentés dans la figure 6. L'angle de frottement pris en compte vaut 35 degrés, légèrement inférieur au cas précédent. A la différence du modèle 2D, même avec un coefficient de frottement plus faible, il ne s'est produit aucun glissement global dans le modèle, et notamment le sommet du talus reste stable. On constate la présence de rares blocs amovibles au niveau du deuxième gradin (Fig. 6a) en forme de dièdres engendrés par les familles 2 et 3 qui glissent sur des plans de fractures appartenant à la famille 4. Les vues rapprochées dans les figures 6b et 6c illustrent bien cette constatation. Dans le modèle 3D, on a à peu près 75 000 points de contact. La figure 6d montre l'évolution du nombre de contacts glissants et restant collés pour le modèle 3D. On observe que le nombre de contacts dans ce modèle varie surtout pendant les 0,2 premières secondes, mais qu'ensuite il reste relativement stable.

5 Conclusion

Dans cette étude, on a présenté un algorithme de création de modèles de massifs rocheux fracturés en utilisant les données statistiques extraites de mesures faites sur le terrain. Les données de l'orientation sont intégrées dans le modèle en définissant un angle de variabilité, calculé pour chaque famille de fractures qui permet de faire pivoter les plans des joints dans la phase du calcul de leur intersection avec des joints préexistants. Le code développé permet d'obtenir certaines caractéristiques telles que la distribution des volumes des blocs en 2D et 3D, et l'orientation des joints intégrés dans le modèle.

Le modèle engendré a été utilisé dans le cadre de cette étude pour présenter l'application de la méthode NSCD, au moyen du code LMGC90, dans le domaine de l'analyse de la stabilité des massifs rocheux. Cette méthode propose un traitement non régularisé des conditions de contact unilatéral, et, dans notre exemple, en considérant une loi de frottement sec de Coulomb.

Les modélisations effectuées en 2D et 3D montrent, une fois encore, que les simplifications faites sur le modèle 2D peuvent conduire à des résultats erronés. Dans ce cas bidimensionnel, on a en effet constaté des glissements importants au niveau du sommet du talus qui étaient, pour une grande part, le résultat d'une simplification discutable dans ce type de modèle. En revanche, les résultats en 3D ont montré que le talus reste globalement stable, mais que des glissements de blocs se produisent localement : blocs en forme de dièdres engendrés par les familles 2 et 3 glissant sur le plan de la famille 4. Si, dans cette étude, la loi d'interaction entre les blocs considérée est seulement du frottement sec, il convient de noter qu'existe aussi dans le code LMGC90 la possibilité de considérer des lois prenant en compte la cohésion, et l'énergie de décohésion (Jean *et al.*, 2001 ; Monerie et Acary, 2001 ; Renouf *et al.*, 2006). Des études complémentaires seraient nécessaires pour caler de façon réaliste les valeurs des divers paramètres intervenant dans la formulation de ces lois.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à exprimer leurs très vifs remerciements aux personnels du Laboratoire régional des ponts et chaussées de Toulouse, et notamment Muriel Gasc-Barbier, Didier Virély, Jérôme Guittard, qui ont mis les données de terrain à leur disposition, dans le cadre de cette étude.

Bibliographie

Acary V., Blaise J.-Y., Drap P., Florenzano M., Garrec S., Jean M., Merad D. – NSCD method applied to mechanical simulation of masonry in historical buildings using MOMA. XVII CIPA (International Committee for architectural photogrammetry) *International Symposium WG3* Simple methods for architectural photogrammetry. Olinda, Brazil, 1999.

Cundall P.A. – A computer model for simulating progressive large scale movements of blocky rock systems. *Proc. Int. Symp. on Rock Fracture*, Nancy, France, 1971, p. 132-150.

Cundall P.A., Strack O.D.L. – A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29 (1), 1979, p. 47-65.

Dubois F., Jean M. – LMGC90 une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction. *Actes du 6e colloque national en calcul des structures*. CSMA-AFM-LMS, 2003, p. 111-118.

Fisher R. -- Dispersion on a sphere. *Proceedings of the Royal Society London*, A217, 1953, p. 295-305.

Guittard J., Virely D. – R.N. 116, Aménagements entre Villefranche-de-Conflent et Mont-Louis, Talus rocheux du Pallat, Laboratoire régional des ponts et chaussées de Toulouse, dossier n° 20.66.032.2001/20-037/26-125, février 2005, 48 p.

Jean M. – Frictional contact in collections of rigid and deformable bodies : numerical simulation of geomaterials. *Mechanics of geomaterials Interfaces SM*, Bolt J.J. Edn. Amsterdam, Elsevier Science, 1995, p. 463-486.

Jean M. – The non-smooth contact dynamics method. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177, 1999, p. 235-257.

Jean M., Acary V., Monerie Y. – Non smooth contact dynamics approach of cohesive materials. *Philosophical Transactions : Mathematical, Physical & Engineering*, The Royal Society, London A, A359 (1789), 2001, p. 2497-2518.

Jean M., Moreau J.-J. – Unilaterality and dry friction in the dynamics of rigid bodies collection. *Contact Mechanics International Symposium*. Lausanne, Switzerland : Presses polytechniques et universitaires, 1992, p. 31-48.

Jimenez-Rodriguez R., Sitar N. – Spectral method for clustering of rock discontinuity sets. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 2006, p. 1052-1061.

Kalenchuk K.S., Diederichs M.S., McKinnon S. – Characterizing block geometry in jointed rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43, 2006, p. 1212-1225.

Moreau J.-J. – Unilateral contact and dry friction in finite freedom dynamics. J. Moreau, P.-D. Panagiotopoulos (eds), *Non Smooth Mechanics and Applications*, CISM Courses and Lectures, Springer-Verlag, Wien, New York, 1988, p. 1-82.

Moreau J.-J. – Some numerical methods in multibody dynamics : application to granular materials. *European Journal of Mechanics A/ Solids*, 13, 1994, p. 93-114.

Moreau J.-J. – Numerical aspects of sweeping process. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 177, 1999, p. 329-349.

Moreau J.-J. – Contact et frottement en dynamique des systèmes de corps rigides. *Revue européenne des eléments finis*, 9, 2000, p. 9-28.

Moreau J.-J. – An introduction to unilateral dynamics, Novel Approaches in Civil Engineering (M. Frémond and F. Maceri, eds), Springer Verlag, 2003, p. 1-46.

Monerie Y., Acary V. – Formulation dynamique d'un modèle de zone cohésive tridimensionnel couplant endommagement et frottement. *Revue européenne des éléments finis*, 10, 02-03-04, 2001, p. 489-503.

Renouf M., Acary V., Dumont G. – 3D Frictional contact and impact multibody dynamics : a comparison of algorithms suitable for real-time applications. *Multibody Dynamics 2005*, ECCOMAS Thematic Conference, J.M. Goicolea, J. Cuadrado, J.C. Garcia Orden (eds), Madrid, Spain, 21-24 June 2005.

Renouf M., Dubois F., Alart P. – A parallel version of the Non Smooth Contact Dynamics algorithm applied to the simulation of granular media. *The Journal of Computational and Applied Mathematics*, 168, 2004, p. 375-338.

Renouf M., Dubois F., Alart P. – Numerical investigations of fault propagation and forced-fold using a non smooth discrete element method. *Revue européenne de mécanique numérique*, 15, 2006, p. 549-570.