

Analyse du comportement sismique des massifs rocheux inclinés fracturés – Application au massif de Jezzine - Liban

M.ABDALLAH^a, I.SHAHROUR^b, F.HAGE CHEHADE^c

a. Polytech'Lille, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement LGCgE, Lille, France
Université Libanaise, Centre Numérique, PRASE, EDST, Beyrouth, Liban

b. de Polytech'Lille, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement LGCgE, Lille, France

c. Université Libanaise, IUT (Saida) & Centre de Modélisation, EDST, Beyrouth, Liban

Résumé :

Dans ce travail, on étudie la stabilité des massifs rocheux fracturés au Liban sous chargement sismique réel. Le Liban se caractérise par ses hautes montagnes avec des fortes pentes. En plus, ce pays est exposé à de sérieux risques sismiques séisme puisqu'il est traversé par plusieurs failles. Les zones montagneuses connaissent actuellement une forte urbanisation. Donc, les conséquences d'un séisme moyen ou majeur peuvent être importantes. On propose d'analyser ce risque avec une modélisation numérique basée sur le concept des éléments blocs en utilisant le code UDEC. La présence des discontinuités horizontales conduit à un glissement permanent de la partie supérieure de la roche, ce glissement tend à augmenter en allant vers l'intérieur du massif. Un mouvement de basculement a été introduit dans le massif par le chargement sismique qui pourrait être négligé.

Abstract:

In this work we study the stability of the fractured rock slopes stability in Lebanon under real seismic loading. Lebanon is characterized by its high mountains and steep slopes. Moreover, this country is exposed to seismic hazard because it is crossed by several faults. Mountainous areas show currently rapid urbanization. The consequences of a moderate or severe earthquake could be significant. We propose a numerical modeling to analyze this hazard based on the bloc elements concept by using the UDEC code. The presence of horizontal discontinuities leads to a permanent shift in the upper part of the rock, this shift tends to increase going towards the inside of the model; A small rocking motion induced in the solid by the seismic loading which could be neglected.

Mots clefs: Chargement sismique, Joints, Massif rocheux, Modélisation, Stabilité des pentes.

1 Introduction

Les tremblements de terre demeurent les catastrophes naturelles qui causent chaque année les plus de pertes humaines et des dégâts matériels. Le Liban est exposé à de sérieux risques sismiques du fait qu'il est traversé par plusieurs failles dont la fameuse faille principale "Faille du Levant", bien que certains auteurs aient récemment mis en doute son degré actuel d'activité tectonique [4]. A ce sujet, il a été déjà secoué par plusieurs tremblements de terre notamment ceux des années 551, 1202, 1759 et 1837, et plus récemment en 1956 et 2008. La zone est classée par une accélération maximale du sol (Peak Ground Acceleration-PGA) de plus de 0,2g [5]. Dans certaines zones, les conséquences des séismes peuvent être amplifiées en particulier dans le cas des pentes.

Le relief libanais est connu par ses hautes montagnes sur tout le territoire et qui connaissent actuellement une forte urbanisation. Les principales structures sont le Mont Liban et l'Anti-Liban. Avec ce développement précaire et sans réglementation, les conséquences des séismes moyens ou sévères risquent d'être dramatiques. La prévention demeure le moyen le plus efficace pour lutter contre les effets dévastateurs des séismes. Il est alors indispensable de lancer des études de recherche fine sur la stabilité des formations rocheuses fracturées au Liban en cas des secousses sismiques. Ce but de prévention constitue l'objectif principal de présent travail. En général, les montagnes libanaises sont constituées de vieilles formations rocheuses variant de roches sédimentaires de calcaire, de la dolomie et des cendres volcaniques. L'étude de la stabilité des massifs rocheux fissurés est généralement effectuée avec la méthode d'équilibre limite [6]. Certes, le concept est

simplifié mais il ne prend pas en compte la complexité du phénomène de la propagation des ondes sismiques dans les massifs fissurés. Pour tenir compte des facteurs importants et inhérents au problème, des approches plus avancées ont été développées sur la base de la méthode des éléments finis [1 ; 2] et la méthode des éléments distincts ou des blocs [3]. La méthode des éléments finis est la moins adaptée à cause des difficultés pour décrire finement le comportement des discontinuités. La méthode des éléments distincts permet d'intégrer correctement le réseau des fractures et leur comportement. Le milieu fracturé est représenté par un assemblage de blocs rigides ou déformables interagissant entre eux. Récemment, des chercheurs ont pu arriver à coupler les deux méthodes pour affiner et augmenter la précision des résultats.

Ce travail vise à apporter une contribution à la fois méthodologique et d'analyse pour la problématique de stabilité des massifs rocheux au Liban sous chargements sismiques. Le travail s'articule sur une modélisation numérique avancée fondée sur les principes de la méthode des éléments distincts. Les études sont effectuées à l'aide du code de calcul (UDEEC). Les cas d'application concernent des configurations réelles identifiées au Liban qui auraient pu être localisées à partir de différentes visites de terrains. Faute de données disponibles, un effort important a aussi été consacré à la collecte d'informations sur les propriétés mécaniques des matériaux qui ont fait l'objet de la modélisation numérique.

2 Présentation du modèle numérique

Le logiciel UDEC (Universal Distinct Element Code) [7] permet de représenter le milieu par un assemblage de blocs discrets. Les discontinuités sont traitées comme des conditions de contact entre les blocs. Les grands déplacements le long de discontinuités et les rotations de blocs sont autorisés. Le calcul est de type incrémental. La taille de chaque incrément est limitée par l'hypothèse que les vitesses et les accélérations sont supposées constantes pendant le pas de temps. La première étape d'une modélisation numérique consiste à définir le maillage du domaine traité. Le maillage impose une extension finie du domaine. Il est nécessaire de réduire les réflexions « artificielles » de l'énergie à la frontière du modèle. Une première solution consiste à éloigner de manière importante les limites du modèle de la zone d'intérêt. Cette solution conduit à prendre des maillages de tailles importantes, ce qui a pour conséquence une augmentation considérable des temps de calcul et de la mémoire de stockage. Le logiciel UDEC propose une autre alternative qui consiste à appliquer, au niveau des frontières latérales, des conditions aux limites absorbantes de type « Quiet Boundaries » ou « Free-Field » [7]. Les conditions de type « Quiet Boundaries » permettent de simuler le mouvement en champ libre qui se produirait dans un massif semi-infini. Ce type de condition s'applique efficacement aux frontières latérales du modèle, à condition que celles-ci soient verticales.

3 Description de l'exemple traité (Massif rocheux de Jezzine)

3.1 Géométrie et propriétés mécaniques

Le massif rocheux traité dans cet article (figure 1) est situé à Jezzine, qui se trouve et à 40 km au sud de Beyrouth. Le massif constitue une falaise de 16m de hauteur où les réseaux de fractures sont bien visibles, en particulier dans la direction horizontale. Le massif rocheux est constitué principalement de grès. Les caractéristiques mécaniques de la roche ont été fixées à partir des données disponibles dans la littérature et des discussions avec des professionnels et les chercheurs au Liban. Les résultats présentés dans cet article sont donc à prendre avec précautions, car ils sont largement dépendants des paramètres utilisés. Ils donnent des indications sur la stabilité du massif étudié. Les caractéristiques mécaniques de la roche et des discontinuités sont résumées dans les tableaux 1 et 2. Un amortissement mécanique est utilisé dans l'élément distinct. L'approche est similaire à la relaxation dynamique proposée par [8].

3.2 Chargement sismique

En l'absence des enregistrements sismiques représentatifs sur le site, nous avons adopté l'enregistrement du séisme de Kocaeli survenu le 17 Août 1999 en Turquie. La figure 2 donne la variation de la composante horizontale de cet enregistrement. La durée du séisme est de 30 secondes avec un pic en vitesse de 40 cm/s enregistré à 5 s. L'effet de la composante verticale est négligé.



FIG. 1 - Site de Jezzine au Liban Sud- Vue de la falaise

Tableau 1 : Caractéristiques Mécaniques de la matrice rocheuse (Grès)

Paramètres		Valeur
Module d'Young	E (GPa)	6
Poids volumique	γ (KN/m ³)	24,7
Coefficient de Poisson	Γ	0,25

Tableau 2 : Paramètres mécaniques des discontinuités horizontales

Paramètres		
Rigidité Normale	K_n (MPa/m)	6×10^3
Rigidité tangentielle	K_s (MPa/m)	3×10^3
Cohésion	c (MPa)	0,02
Angle de frottement	ϕ (°)	28
Résistance à la traction	σ_t (MPa)	0

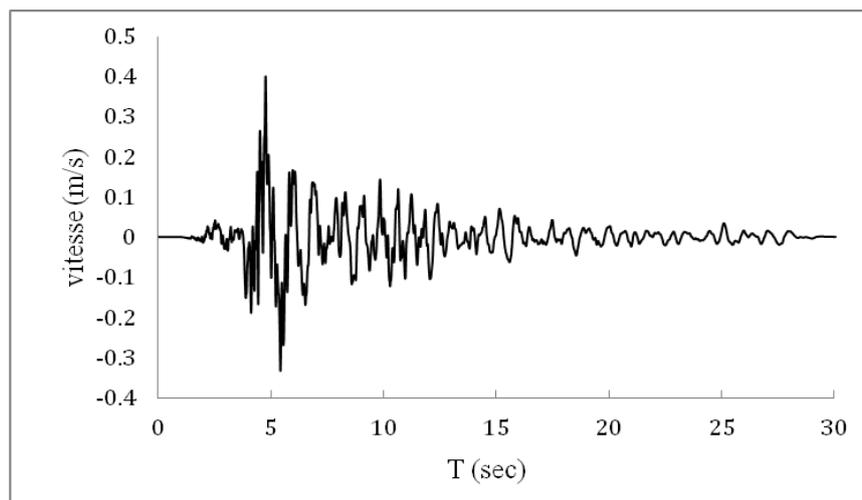


FIG. 2 - Allure de la composante horizontale de la vitesse du séisme de Kocaeli (1999)

4 Analyse du comportement sismique du massif rocheux - réseau de fractures horizontales

Les analyses sont effectuées en considérant le réseau de discontinuités quasi – horizontales (légère inclinaison de 6,6 °). Trois lignes discontinuités sont considérées dans le calcul (Figure 3). Un calcul statique a démontré que le massif est sable sous l'effet de son poids propre.

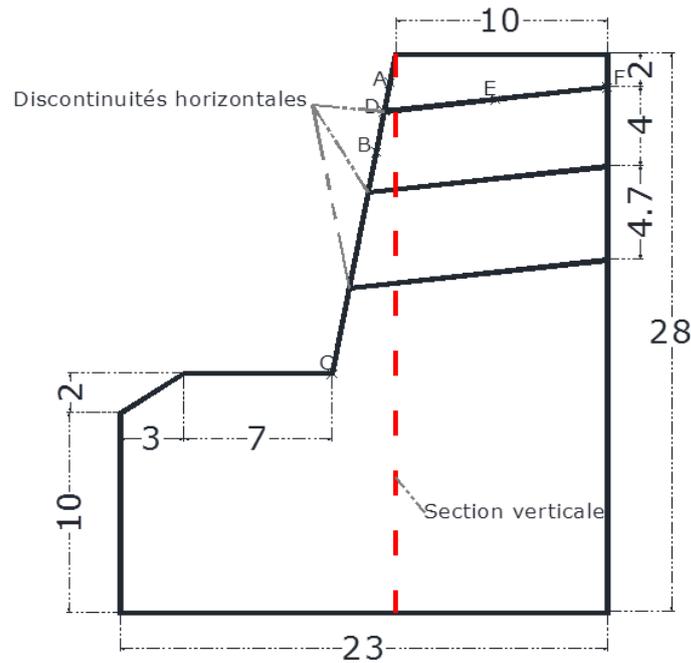


FIG.3 - Domaine considéré dans la modélisation du massif rocheux de Jezzine

4.1 Analyse sismique

La figure 4a donne les déplacements horizontaux induits aux points A, B et C du massif. Au début du chargement, les déplacements sont identiques dans les trois points. La valeur maximale de 6cm est obtenue à $t=5\text{sec}$. Ensuite, les allures présentent une différence significative avec un écart sensible entre le point C (au pied de la falaise) et les points A et B (en haut du massif). A la fin du chargement, on note un retour du point C à sa position initiale et un déplacement permanent de l'ordre de 5 cm au point B et de 6 cm au point A. Une telle tendance montre que le chargement sismique induit, en présence des discontinuités horizontales, des glissements permanents dans la partie supérieure du massif rocheux.

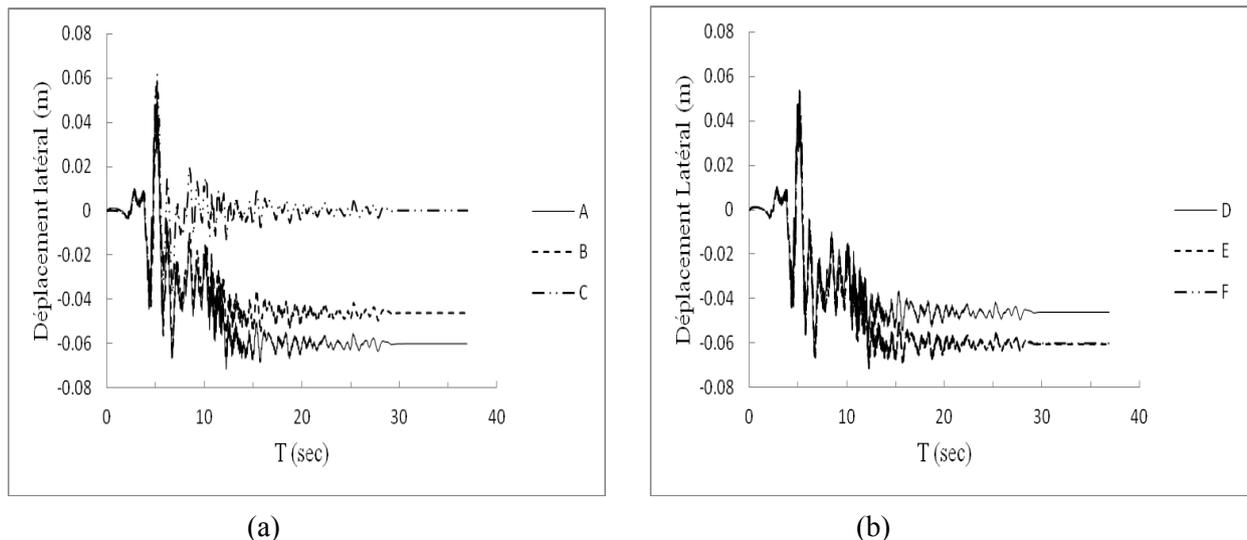


FIG 4- (a) Déplacement latéral induit en 3 positions de la falaise et (b) Déplacement latéral induit sur la discontinuité supérieure (DEF)

La figure 4b illustre la variation du déplacement horizontal le long de la discontinuité supérieure (DEF). On note la présence d'un déplacement permanent le long de cette discontinuité qui a tendance à augmenter en allant du point D vers le point F (vers l'intérieur du massif, figure 3). Les résultats obtenus ont montré que la variation de la composante horizontale de la vitesse au point A atteint son maximum (1 m/sec) à l'instant

où le chargement atteint son pic ($t=5\text{sec}$). L'amplification de la vitesse par rapport à la base est estimée à 2,5. Les figures 5a et 5b montrent les variations des composantes normale et tangentielle de la contrainte au point D. On peut remarquer que la contrainte normale reste positive (compression); elle atteint sa valeur maximale (1,2 MPa) à l'instant où le chargement sismique est maximal (à $t = 5 \text{ sec}$). Cette variation devient quasi-nulle au-delà de $t = 15 \text{ sec}$. La contrainte tangentielle subit des variations importantes au cours du chargement avec une allure similaire à celle de la variation de la vitesse horizontale. Sa valeur maximale est égale à 0,4 MPa. Un examen attentif de ces contraintes a illustré que le chemin obtenu reste bien à l'intérieur de la surface limite :

$$|\tau| = c + \sigma_n \text{tg}(\varphi)$$

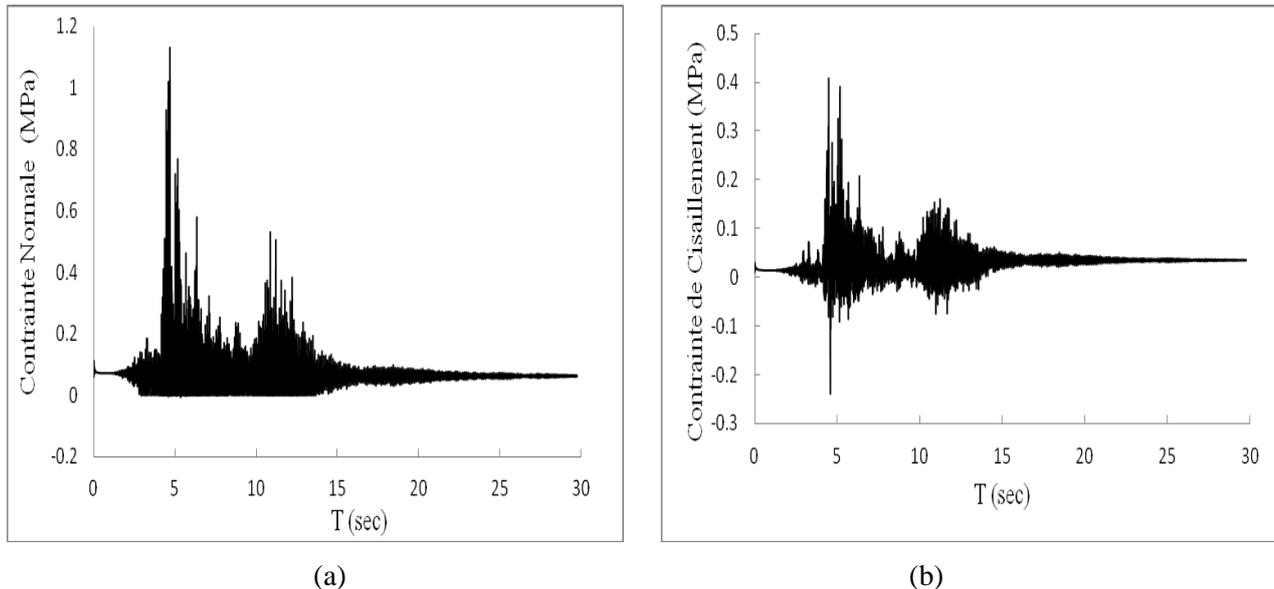


FIG. 5 : Allure des contraintes normale (a) et de cisaillement (b) dans le joint au point D

5 Etude Paramétrique

Dans cette section, on présente l'influence de l'angle de frottement sur la réponse sismique. Un calcul, peu réaliste, a été effectué avec un angle de frottement nul. On note que la variation de la contrainte normale a une allure similaire à celle obtenue avec un angle de frottement de 28° (Figure 6a) mais avec une amplitude de l'ordre de 50% de celle du joint frottant. La contrainte de cisaillement varie d'une manière cyclique entre -0,02 MPa et 0,02 MPa pendant les 15 premiers seconds du chargement ; ensuite elle décroît pour s'annuler enfin du chargement (figure 6b). La figure 7 montre l'influence de l'angle du frottement sur le déplacement horizontal le long d'une section verticale. On note que cet angle a peu d'influence au début du chargement ($t = 2 \text{ sec}$). Par la suite, on note que la disparition du frottement le long du joint se traduit par une augmentation importante du déplacement du bloc supérieur. A la fin du chargement ($t = 25 \text{ sec}$), la réduction de l'angle de frottement de 28° à 0° conduit à une augmentation du déplacement du bloc supérieur de 6 cm à 21 cm.

6 Conclusion

Dans ce papier, nous avons analysé la réponse sismique d'un massif rocheux fracturé qui correspond à un cas réel au Liban, celui de Jezzine. Nous avons effectué une modélisation numérique en adoptant le principe des éléments blocs avec le code UDEC. Un chargement sismique réel a été appliqué. L'attention est focalisée sur l'importance des discontinuités à l'intérieur du massif sur la stabilité d'ensemble. L'analyse sismique avec discontinuités horizontales montre l'apparition d'un glissement permanent dans la partie supérieure du massif avec une amplification dynamique de la vitesse de l'ordre de 2,5. La réduction de l'angle de frottement du joint de 28° à 0° conduit à une augmentation du déplacement du bloc supérieur de 6cm à 21cm.

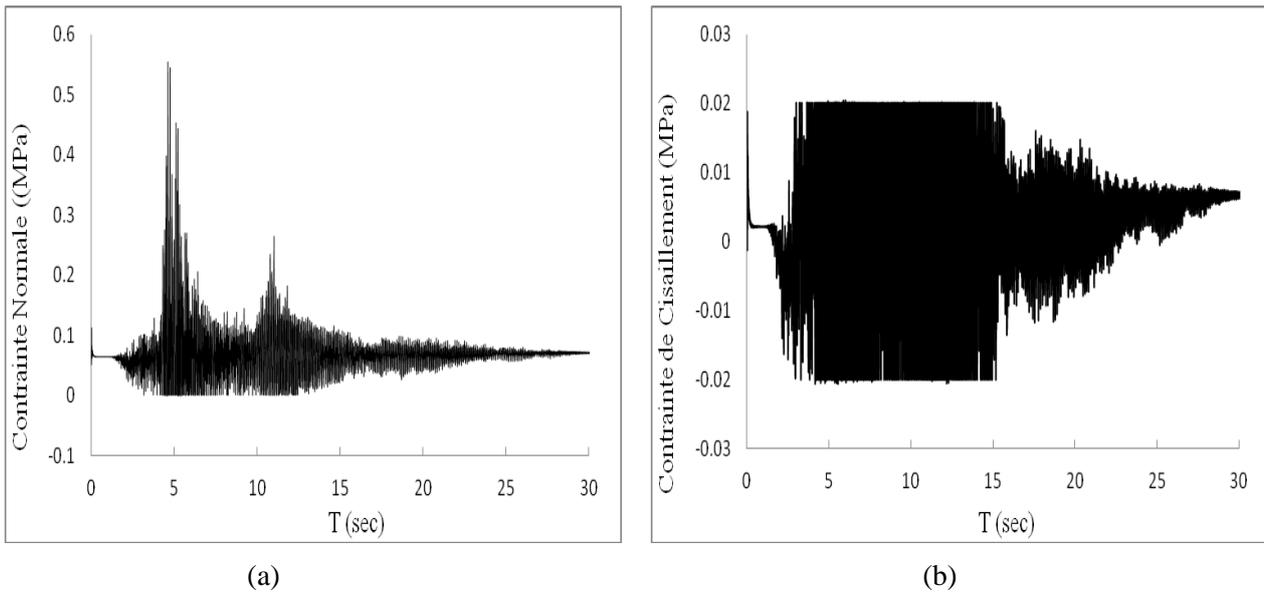


FIG. 6- Allure des contraintes normale (a) et de cisaillement (b) en D (angle de frottement nul dans le joint)

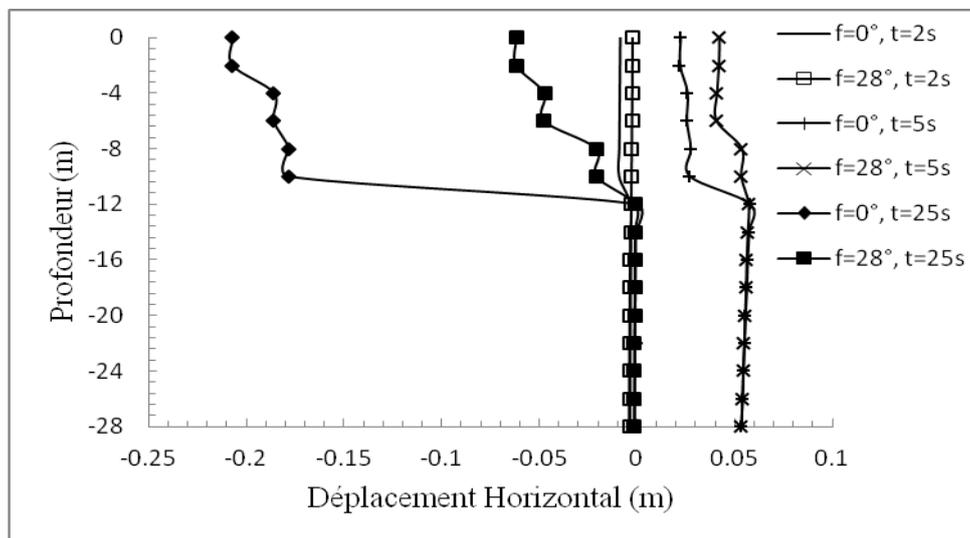


FIG. 7 - Effet de l'angle de frottement sur le profil du déplacement horizontal dans une section verticale

References

- [1] Al-Homoud and Tahtamoni [2000]. Reliability analysis of three-dimensional dynamic slope stability and earthquake-induced permanent displacement. *Soil Dyn. Earthquake Eng.*, 19 (2), 91–114.
- [2] Bathe, K.J. [1982]. *Finite-element procedures in engineering analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- [3] Cundall P.A. et Hart R.D. [1992]. Numerical modeling of discontinua. *Engineering computations*, Vol. 9(2).
- [4] Mathieu Daëron [2005]. Rôle, cinématique et comportement sismique à long terme de la faille de Yammoûneh, principale branche d'écorchant du coude transpressif libanais (faille du Levant).
- [5] Hatzor YH, Arzi AA, Zaslavsky Y, Shapira A [2004]. Dynamic stability analysis of jointed rock slopes using the DDA method. *Int J Rock Mech Min Sci* 41–5:813–832.
- [6] Hungr O. [1987]. Extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three dimensions. *Geotechnique*, 37 (1), 113–117.
- [7] ITASCA [2011]. *UDEC user's guide Ver. 5.0*.
- [8] Otter, J. R. H., A. C. Cassell and R. E. [1966]. Hobbs. "Dynamic Relaxation," *Proc. Inst. Civil Eng.*, 35, 633-665.