Estimation de la taille de l'instabilité potentielle d'un versant homogène sous sollicitations sismiques par des approches empiriques

Hieu Toan NGUYEN[*] (hieu-toan.nguyen@mines-paristech.fr)

Jean-Alain FLEURISSON[*] (jean-alain.fleurisson@mines-paristech.fr)

Roger COJEAN[*] (roger.cojean@mines-paristech.fr)

[*] *Centre Géosciences, MINES ParisTech, 35 rue Saint Honoré, 77300 Fontainebleau*

RÉSUMÉ : Le séisme est connu comme une catastrophe naturelle particulièrement destructrice et meurtrière. En plus des effets directs spectaculaires bien connus, le séisme déclenche également des instabilités de versants. L'effet de site topographique peut aggraver encore ce phénomène par l'amplification du mouvement sismique au sommet des reliefs. Ce travail propose une méthode de calcul simple, sans recours à des simulations numériques, pour estimer la taille de la zone située près de surface topographique la plus affectée par l'amplification. Cette zone est considérée comme une zone de risque élevé pour le développement d'instabilité de versant. Sa connaissance est indispensable et importante, non seulement dans le domaine de la gestion des risques naturels mais aussi dans le domaine du génie civil. À partir d'études paramétriques portant sur des paramètres géomorphologiques et sismiques, les facteurs influençant la taille de la zone amplifiée sont déterminés. Ces études ont également permis de mettre en évidence le rôle de la fréquence adimensionnelle, rapport de la hauteur de versant à la longueur d'onde du signal sismique appliqué, dans l'évaluation de l'effet de site topographique. Un grand nombre de simulations numériques, en appliquant un signal sismique mono-fréquentiel de type sinusoïdal, est réalisé par la méthode des différences finies sous FLAC 2D. Les résultats obtenus ont permis de définir des relations empiriques pour estimer la hauteur, la largeur et l'aire de la zone d'amplification au sommet du versant. Ces approches empiriques ont également été utilisées dans le cas de signaux sismiques réels et ont donné des résultats proches de ceux obtenus par simulations numériques.

Mots-clés : mouvement de terrain, instabilités de versant, effets de site, fréquence adimensionnelle, risque sismique.

1. INTRODUCTION

Le séisme est un phénomène particulièrement destructif et meurtrier. Il cause non seulement des effets directs (effondrement des bâtiments, destruction des ouvrages d'art, incendies, …) mais aussi des effets induits qui sont parfois encore plus dévastateurs. Le mouvement des versants est un de ses effets induits qui constitue une source majeure de dégâts. À titre d'exemple, plus de 1000 glissements et éboulements rocheux ont été répertoriés lors du séisme de Loma Prieta en Californie en 1989, plus de 10000 lors du séisme du Guatemala en 1976. Le séisme de magnitude 7.6 qui a eu lieu en janvier 2001 au Salvador a été l'origine de plus de 500 mouvements de versant responsables de la mort de près de 500 personnes (Figure 1*a*). Plus récemment, le séisme du 12 mai 2008 au Sichuan en Chine (Figure 1*b*) est responsable de très nombreux glissements de terrains particulièrement catastrophiques (Cojean et al., 2009; Yin et al., 2010).

Dans le but de déterminer les facteurs principaux influençant le mouvement de versant sous sollicitations sismiques, les travaux de (Bourdeau & Havenith, 2008; Del Gaudio & Wasowski, 2007; Havenith et al., 2003) ont mis en évidence le rôle des effets de site. Ceux-ci étaient considérés comme un des facteurs les plus importants contribuant au déclenchement d'un mouvement de versant. Dans le cadre de contribution d'une meilleure compréhension des leurs impacts, surtout de l'effet de site topographique, ce papier vise à présenter les principaux résultats tirés à partir des travaux de thèse intitulée « Stabilité dynamique des versants et effets de site d'origine morphologiques et géologiques : simulations numériques, rétro-

analyses et développements numériques », réalisée au centre de Géosciences, MINES ParisTech, sous la direction de Fleurisson J.-A. et Cojean R.



a) b)

Figure 1. Énorme dégâts causés par les mouvements de versants déclenchés par les séismes
a) Glissement de Las Colinas (Salvador) déclenché par le séisme du 13-01-2001 (Mw=7.6)
b) Ville de Beichuan après le séisme de Sichuan du 12-05-2008 (Mw=8.0)

2. METHODOLOGIE

2.1. Modèle de calcul numérique

Les analyses numériques sont réalisées par la méthode des différences finies avec l'aide du logiciel FLAC 2D. Dans le but de limiter le nombre des variables relatives au contexte géomorphologique, le modèle du versant ne contient qu'une pente simple et le matériau est considéré comme homogène, isotrope et élastique. Pour objectif de réduire les ondes artificielles réfléchies par les limites du modèle vers la zone étudiée, la dimension du maillage est déterminée en fonction de la hauteur et de la pente du versant, 20H+2H/tan(α) et H+20m, respectivement pour la largeur et la hauteur (Figure 2).

La taille des mailles est choisie à condition que la transmission des ondes soit simulée correctement. Alors, l'expression (1) doit être satisfaite (Itasca Consulting Group, 2000). Dans le cadre de ce travail, la valeur de N est choisie entre 30 et 100 en considérant entre l'importance de l'erreur et du temps de calcul.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{N} \qquad (1)$$

- Δl : la taille de la maille
- λ : la longueur d'onde sismique
- $N \geq 10$

Dans le but d'éliminer les effets de bords et les réflexions des ondes sismiques sur des frontières latérales au sein du versant, les conditions aux limites qui simulent les champs libres sont appliquées aux deux extrémités latérales du modèle. Pour éviter que les ondes réfléchies de la surface libre redescendant vers le substratum soit à nouveau réfléchies, une limite absorbante de type « *quiet boundary* » est appliqué à la base du modèle.

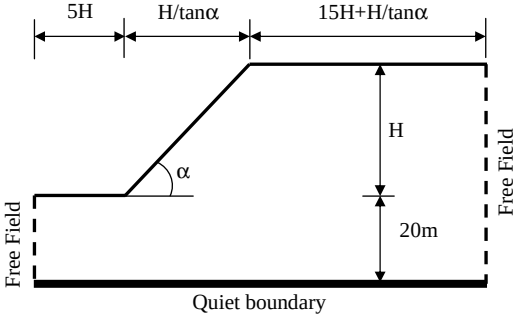


Figure 2. Dimensions et conditions aux limites du modèle de versant utilisé dans les simulations numériques

Les ondes sismiques planes de type SV sont appliquées à la base du modèle. Dans la plupart des simulations, ces ondes ont la forme sinusoïdale avec un Peak Ground Acceleration (PGA) de 0.4g (m/s²), ses fréquences sont variables de 0.5Hz à 10Hz.

L'évaluation de l'effet de site est basée sur la méthode SSR proposé par (Borcherdt, 1970). La valeur d'amplification de l'accélération horizontale maximale est calculée par le rapport de l'accélération horizontale maximale mesurée dans tout le versant pendant toute la durée de la sollicitation et la valeur de l'accélération horizontale maximale mesurée au site rocheux qui est toujours égale à deux fois du PGA du signal sismique appliqué. Un point dans le versant possède une valeur du facteur d'amplification supérieure à 1.0 est dit « amplifié » et au contraire il s'agit une dés-amplification. Plusieurs points amplifiés regroupés forment une masse amplifiée. Si ces zones se situent proches de la surface libre, elles ont un impact direct aux constructions. La grandeur de ces zones est caractérisée par le pourcentage de l'aire amplifiée suivant l'équation (2). En plus, la masse amplifiée en crête est celle la plus risquée de devenir instable, alors sa taille, représentée par Hx et Dxc (Figure 3) est considérée aussi comme un important critère à étudier.

$$pS_{AS} = \frac{S_{AS}}{S_T} \tag{2}$$

- S_{AS} : l'aire des zones amplifiées proches de la surface, c'est l'aire de l'union des zones 1, 2 et 3 dans la Figure 3
- S_T : l'aire totale de la zone étudiée qui est le parallélogramme limité par la surface libre du versant, y compris la pente, et les lignes de tirets et de points mêlés. Cette zone a une hauteur de H et une longueur de 2H.

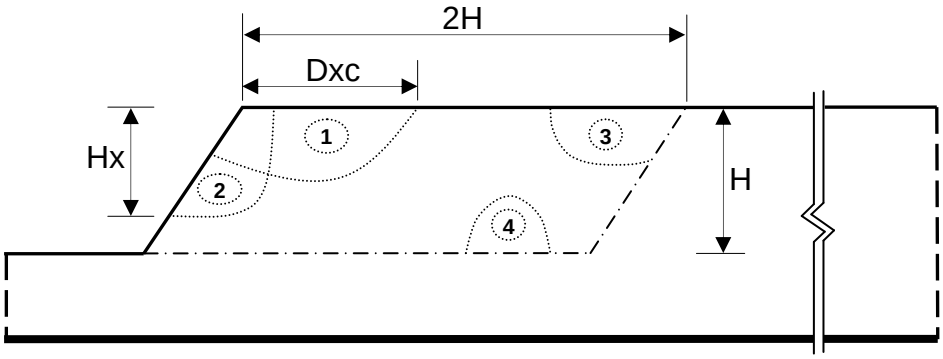


Figure 3. Locations schématiques des zones amplifiées et de la zone étudiée dans le modèle du versant

2.2. Fréquence adimensionnelle

La fréquence adimensionnelle (η) est déjà un paramètre considéré dans les travaux de recherche sur le sujet (Ashford et al., 1997; De Martin & Kobayashi, 2010; Glinsky & Bertrand, 2011; Messaoudi et al., 2011; Nguyen, 2005; Nguyen & Gatmiri, 2007). Comme le montre la formule (3), ce paramètre permet d'intégrer plusieurs paramètres géomorphologiques et sismiques : H (la hauteur du versant), F (la fréquence de l'onde sismique), E (le module Young), ν (le coefficient de Poisson), ρ (la masse volumique). Il présente une grande potentialité pour l'étude des effets de site.

$$\eta = \frac{H}{\lambda} = \frac{H \times F}{V_s} = \frac{H \times F}{\sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}} \tag{3}$$

2.3. Scénarios géomorphologiques et sismiques

Pour les paramètres morphologiques du modèle de versant : la pente est variable de 20 à 90° et de 30 à 200m pour la hauteur. Cela donne 98 scénarios morphologiques différents. Pour les paramètres géologiques, plusieurs valeurs du coefficient de Poisson (ν_1=0.2, ν_2=0.25, ν_3=0.3, ν_4=0.35) ont été testées

comme représenté dans le Tableau 1. Pour chaque scénario morphologique, les autres paramètres géologiques comme le module Young, la masse volumique et la fréquence du signal sismique sinusoïdal sont variables pour que la fréquence adimensionnelle obtienne une valeur dans le rang de 0.05 à 1.0 avec un pas de 0.05. Donc, 1960 simulations numériques ont été réalisées.

Tableau 1. *Valeurs de la hauteur, de la pente et du coefficient de Poisson appliquées aux simulations numérique d'un modèle de versant sous la sollicitation du signal sismique sinusoïdal*

H	α (°)														
m	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
30			ν_2		ν_2		ν_4								
40			ν_2		ν_2		ν_3								
50	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2	ν_2
60			ν_2		ν_2		ν_4								
70			ν_2		ν_2		ν_3								
80			ν_2		ν_2		ν_2								
90			ν_2		ν_2		ν_4								
100	ν_3	ν_4	ν_2	ν_4	ν_2	ν_4	ν_3	ν_4	ν_3	ν_4	ν_3	ν_2	ν_1	ν_2	ν_1
110			ν_2		ν_2		ν_2								
120			ν_2		ν_2		ν_4								
130			ν_2		ν_2		ν_3								
140			ν_2		ν_2		ν_3								
150	ν_4	ν_1	ν_3	ν_1	ν_3	ν_1	ν_3	ν_1	ν_2	ν_1	ν_2	ν_1	ν_2		
160			ν_2		ν_2		ν_2								
170			ν_2		ν_2		ν_2								
180			ν_2		ν_2		ν_2								
190			ν_2		ν_2		ν_2								
200	ν_4	ν_3	ν_3	ν_3	ν_3	ν_3	ν_2	ν_3	ν_2	ν_3	ν_4	ν_4	ν_4		

3. RESULTATS

Pour chaque critère d'étude, les paramètres affectés ont été déterminés et présentés dans le travail de (Nguyen & Fleurisson, 2013). Les résultats obtenus à partir de 1960 calculs numériques sont analysés par les méthodes statistiques pour évaluer les interactions entre les paramètres affectés et pour trouver la forme générale des équations empiriques. Les facteurs de petit impact et potentiellement encombrant les équations sont éliminés. Les **A**pproches empiriques obtenus à partir des **S**imulations numériques sous l'excitation des signaux sismiques **S**inusoïdaux (ANS) sont trouvées par la méthode des régressions. Dans lesquelles, la fréquence adimensionnelle η (=H/λ) est représenté par le rapport de la hauteur H du versant et la longueur d'onde sismique λ. La pente normalisée est I=α/90° et ν est le coefficient de Poisson du matériau constituant le versant.

$$pS_{AS} = \begin{cases} -\ln(\eta)\left[0.17 + 0.11I\right] & : \ \eta \le 0.15 \\ -\ln(\eta)\left[0.39 - 0.33I\right] & : \ \eta > 0.15 \end{cases} \tag{4}$$

$$\frac{Hx}{H} = -\ln(\eta)\left(0.1 + 0.14I\right) \tag{5}$$

$$\frac{Dxc}{H} = 4\nu\eta^{-0.8} \tag{6}$$

La comparaison de deux méthodes sur les résultats de 1960 cas dans la base de données est représentée sur la Figure 4. Quand une valeur calculée par les ANS correspond bien à celle obtenue par la simulation numérique, elle se situe sur la droite « perfect agreement ». Au contraire, le symbole au-dessus ou au-dessous de cette droite représente respectivement une surestimation ou une sous-estimation des ANS par rapport au calcul numérique. Les droites en tireté représentent les valeurs de l'écart relatif (les graphes à gauche) et de l'écart absolu (les graphes à droites).

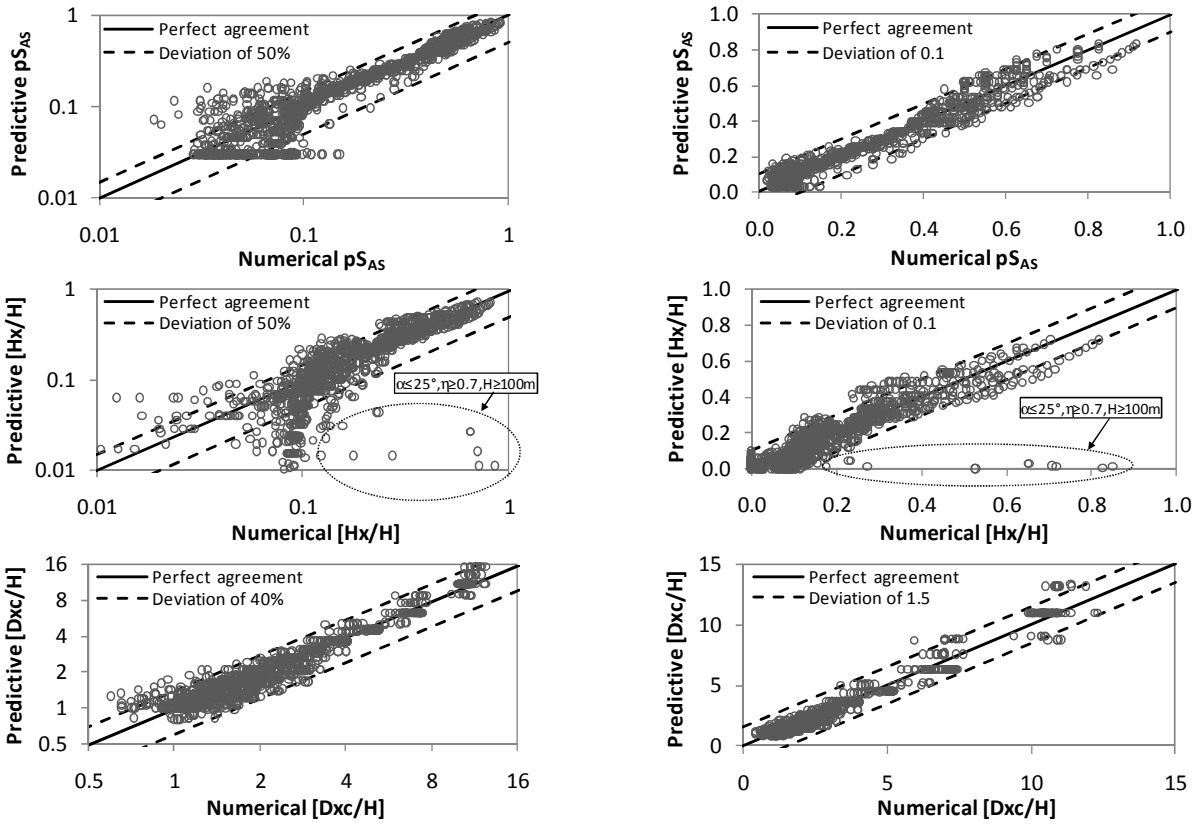
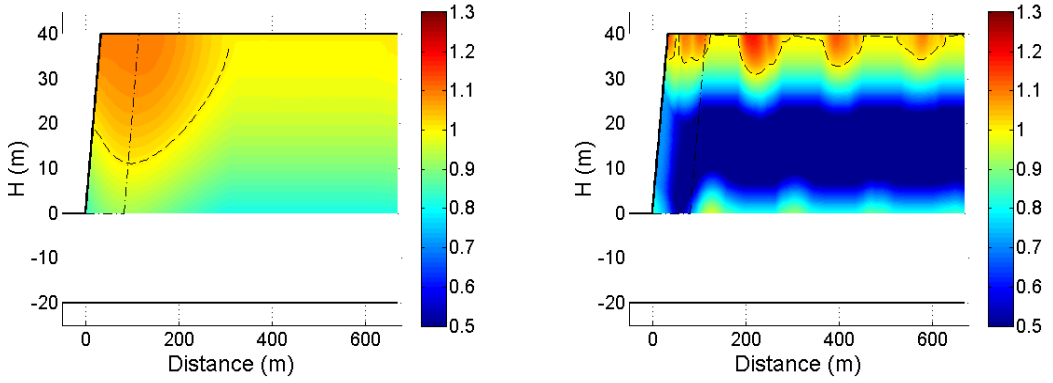


Figure 4. Comparaison de pS_{AS}, Hx et Dxc obtenus par les ANS et ceux des simulations numériques pour les 1960 cases dans la base de données

Au titre d'exemple, un modèle de versant : α=50°, H=40m, E=832MPa, ν=0.3, ρ=2000kg/m^3, Vs=400m/s est appliqué successivement à un signal sismique sinusoïdal (PGA=0.4g) de fréquence F=1.0Hz et F=4.0Hz. Les valeurs de η calculées pour ces 2 cas sont de 0.1 et 0.4. La Figure 5 représente la distribution spatiale des amplifications dans le modèle de versant de ces 2 cas. La courbe en tireté est la courbe d'iso-valeur, l'amplification égale à 1.0. Le parallélogramme limité par la surface libre et les lignes de tirets et de points mêlés est la zone étudiée de référence (S_T).



a) η=0.1 b) η=0.4

Figure 5. Distribution spatiale des amplifications dans les versants de η différents

La comparaison détaillée portant sur les valeurs des critères d'études calculées par deux méthodes est donnée par le Tableau 2. Les autres comparaisons portant sur les modèles de versant sollicités par le signal sismique des séismes réels sont aussi réalisées. Un bon accord est trouvé pour les signaux sismiques possédant une bande de fréquence centrale relativement étroite. Au contraire, pour un signal de bande de fréquence large, les ANS ne peuvent pas donner des valeurs prédictives, mais juste des intervalles prédictifs.

Tableau 2. *Comparaison des résultats obtenus par deux méthodes : les simulations numériques et les ANS*

	η=0.1			η=0.4		
	pS_{AS}	Hx/H	Dcx/H	pS_{AS}	Hx/H	Dcx/H
Simulation numérique	0.68	0.53	7.65	0.16	0.14	2.38
ANS	0.53	0.41	7.57	0.19	0.16	2.49

4. CONCLUSION

Ce papier met en évidence le rôle de la fréquence adimensionnelle. Celui-ci est considéré comme un critère important pour évaluer l'ampleur de la masse d'amplification. En observant les exemples et les équations, on trouve que plus cette valeur est élevée plus la masse affectée est réduite.

Cette étude vise à trouver un outil simple, sans lancer les simulations numériques, pour prédire le volume de la masse instable. L'instabilité ne touche peut-être pas toute la masse d'amplification mais celle-ci porte toujours un risque élevé. Pour avoir une prédiction plus réaliste, il faut tenir compte des autres impacts comme l'existence d'une couche de sub-surface de faible résistance sismique, la nappe phréatique, la précipitation, la plantation…et ainsi que ses interactions. Une telle étude demande des investigations détaillées et couteuses. Alors, pour une étude préliminaire, basé sur les conditions géomorphologiques basiques du versant, les approches empiriques proposées permettent d'estimer l'ampleur de la masse la plus potentiellement instable ainsi que la hauteur et l'extension de la zone affectée. Ces connaissances sont nécessaires et importantes non seulement dans le domaine de la gestion des risques naturels mais aussi dans le domaine du génie civil.

REFERENCES

Ashford, S. A. et al. 1997. Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 87: 701-709.

Borcherdt, R. D. 1970. Effects of local geology on ground motion near San Francissco bay. *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 60: 29-61.

Bourdeau, C. & Havenith, H.-B. 2008. Site effects modelling applied to the slope affected by the Suusamyr earthquake (Kyrgyzstan, 1992). *Engineering Geology*, vol. 97: 126-145.

Cojean, R. et al. (2009). *Glissement de terrain et barrages naturels induits par le séisme du 12 mai 2008 au Sichuan (Chine)-Retour d'expérience*.

De Martin, F. & Kobayashi, H. (2010). *Etude des effets d'une topographie sur le mouvement sismique*. Rapport BRGM/RP-59103-FR.

Del Gaudio, V. & Wasowski, J. 2007. Directivity of slope dynamic response to seismic shaking. *Geophysical Research Letters*, vol. 34: L12301, doi:10.1029/2007GL029842-.

Glinsky, N. & Bertrand, E. 2011. Etude numérique d'effets de site topographiques par une méthode éléments finis discontinus. *8ème Colloque National AFPS 2011-Vers une maîtrise durable du risque sismique.* September 06-08, 2011. Paris, France. p.723-732.

Havenith, H.-B. et al. 2003. Initiation of earthquake-induced slope failure: influence of topographical and other site specific amplification effects. *Journal of Seismology*, vol. 7: 397-412.

Itasca Consulting Group. (2000). FLAC Optional Features.p.3-1-3-99.

Messaoudi, A. et al. 2011. Effet de la topographie des pentes sur les réponses sismiques. *8ème Colloque National AFPS 2011-Vers une maîtrise durable du risque sismique.* September 06-08, 2011. Paris, France. p.285-294.

Nguyen, H. T. & Fleurisson, J.-A. 2013. Rôle du paramètre "fréquence adimensionnelle" dans l'évaluation de l'effet de site topographique en cas de séisme. *Conférence Franco-Vietnamienne CIGOS 2013 - Construction et développement durable.* April 04-05, 2013. Lyon, France. Paper No: CIGOS206, 8pp.

Nguyen, V. K. (2005). *Étude des effets de site dus aux conditions topographiques et géotechniques par une méthode hybride éléments finis/éléments frontières*. Ph.D. thesis defense January 17 2005. Ecole des Ponts ParisTech.

Nguyen, V. K. & Gatmiri, B. 2007. Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 27: 183-188.

Yin, Y. et al. 2010. Catastrophic landslide associated with the M8.0 Wenchuan earthquake. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 70: 15-32.