



HAL
open science

Rôle du paramètre "fréquence adimensionnelle" dans l'évaluation de l'effet de site topographique en cas de séisme

Hieu Toan Nguyen, Jean-Alain Fleurisson, Roger Cojean

► To cite this version:

Hieu Toan Nguyen, Jean-Alain Fleurisson, Roger Cojean. Rôle du paramètre "fréquence adimensionnelle" dans l'évaluation de l'effet de site topographique en cas de séisme. Conférence Franco-Vietnamien CIGOS 2013 - Construction et développement durable, Apr 2013, Lyon, France. 8 p. hal-00847321

HAL Id: hal-00847321

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-00847321>

Submitted on 23 Jul 2013

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.

Rôle du paramètre « fréquence adimensionnelle » dans l'évaluation de l'effet de site topographique en cas de séisme

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)

Mines ParisTech - Centre Géosciences - 35 rue Saint Honoré-77300 Fontainebleau

Résumé :

L'effet de site topographique correspond au phénomène où le mouvement sismique est amplifié au sommet des reliefs, lequel peut entraîner des dommages aux ouvrages voire des instabilités de versant. Cette étude vise à montrer la relation entre la fréquence adimensionnelle (η), qui est le rapport de la hauteur du versant (H) à la longueur d'onde sismique (λ), avec l'effet de site topographique. Au travers de plusieurs simulations numériques, les résultats montrent que dans le cas où les versants ont une même valeur de η et une même pente topographique, la distribution des masses amplifiées et non-amplifiées est alors similaire pour tous les cas, quels que soient la hauteur, les caractéristiques géologiques et le signal excité. Dans le domaine du génie civil, la connaissance de la zone affectée par l'amplification au niveau de la surface libre est importante et indispensable pour la conception des structures. Par ailleurs, ce travail apporte aussi une évaluation détaillée du rôle des autres facteurs géomorphologiques. Enfin, suite aux observations des résultats numériques, un autre intérêt du paramètre η est de permettre une diminution de temps de calcul en réduisant les dimensions du modèle.

Mots-clés : effet de site, fréquence adimensionnelle, instabilités de versant, amplification, séisme

1. Introduction

1.1. Contexte scientifique

De nombreuses observations macrosismiques à travers le monde : en France (Lambesc, en 1909), en Italie (Irpinia, en 1980), en Californie (1987 et 1989) ont montré que le mouvement sismique est amplifié au sommet des reliefs. Ce phénomène, appelé effet de site topographique, est à l'origine de la modification des caractéristiques spatiales, spectrales et temporelles du signal vibratoire. L'effet de site topographique est causé principalement par l'interférence des ondes incidentes et des ondes réfléchies qui renvoient de l'amont ou de la pente du versant. L'interférence de ces ondes donne une amplification de l'amplitude du signal sismique en crête et une dés-amplification au pied du versant^[5,13] (Figure 1). Pour cette raison, la topographie montagneuse peut aggraver l'impact d'un séisme, ce qui peut entraîner des endommagements des constructions, voire des instabilités du versant.

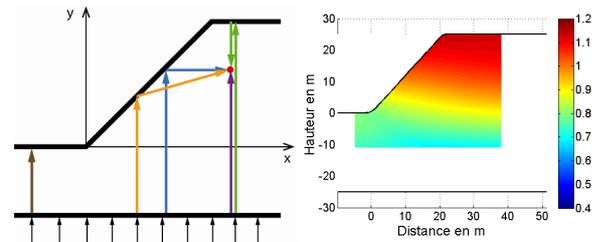


Figure 1. Effet de site topographique pur dans un versant homogène

Le rôle de l'effet de site est précisé dans la réglementation PS92 (applicable jusqu'au 31 octobre 2012) et plus récemment, dans l'Eurocode 8^[8]. Cependant, ces réglementations ne s'appuient que sur les caractéristiques morphologiques du versant. Elles omettent les caractéristiques géologiques, sismiques du versant et les caractéristiques du signal sismique. Pourtant, ces conditions ont une grande influence sur l'ampleur et la zone affectée par l'effet de site. Depuis 1993, un nouveau paramètre nommé « fréquence adimensionnelle », proposé par Dakoulas P.^[6], a montré un grand potentiel, permettant de regrouper plusieurs paramètres isolés en un seul pour représenter simplement et efficacement l'effet de site. Depuis son apparition, ce paramètre n'a pas reçu une grande attention dans les travaux scientifiques. Quelques auteurs l'ont utilisé pour les études de cas mais il n'y a pas encore de travaux étudiant spécifiquement son rôle. Pour cette

raison, ce travail met l'accent sur son potentiel rôle dans l'étude des effets de site en général et l'effet de site topographique en particulier.

1.2. Modèle de calcul numérique

Les analyses numériques sont réalisées par la méthode des différences finies avec l'aide du logiciel Flac2D. Dans le but de limiter le nombre des variables relatives au contexte géomorphologique, le modèle du versant ne contient qu'une pente simple (Figure 2) et est considéré homogène et élastique. La dimension du maillage est déterminée en fonction de la hauteur du versant, $20H+2H/\tan(\alpha)$ et $H+20m$, respectivement pour la largeur et la hauteur (Figure 2), avec pour objectif de réduire les ondes artificielles réfléchies par les limites du modèle vers la zone étudiée.

1.2.1. Taille des mailles

Les modèles de versants simples sont construits de façon que la taille des mailles assure la transmission continue des ondes sismiques. D'après la notice de Flac 2D 5.0, cette condition est assurée quand l'expression (1) est satisfaite

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

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

Alors, pour chaque cas de calcul, en se basant sur la caractéristique de l'onde sismique qui sera appliquée au modèle, la taille des mailles est calculée de façon à ce que la condition (1) soit toujours satisfaite. Pour toutes simulations dans le cadre de cette étude, la valeur de N choisie est dans l'ordre de 30 à 100.

1.2.2. Conditions aux limites

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 appliquée à la base du modèle.

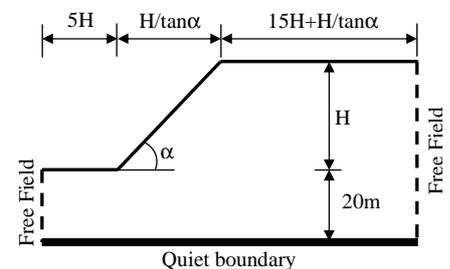


Figure 2. Dimensions et conditions aux limites

1.2.3. Signal sismique appliqué

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/s^2), ses fréquences sont variables de $0,5Hz$ à $10Hz$.

1.2.4. Conventions

L'effet de site est évalué par la méthode site/référence proposé par Borchardt(1970)^[2]. La valeur d'amplification de l'accélération horizontale maximale (A_x) est calculée par le rapport entre l'accélération horizontale maximale (x_{acc_max}) 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 le PGA du signal sismique appliqué. Un point est amplifié dans la direction horizontale quand la valeur de A_x est plus grande que 1,0 et au contraire, il s'agit une dés-amplification.

$$A_x = \frac{x_{acc_{max}}}{2PGA} \quad (2)$$

Plusieurs travaux, tels de Ashford^[1] et de Bouckovalas^[3,4], montrent que la morphologie irrégulière engendre encore l'accélération verticale, bien que la source d'excitation (onde SV) ne contienne pas cette composante. La valeur d'amplification de l'accélération verticale maximale (A_y) est déterminée par la formule (3) où $y_{acc_{max}}$ est l'accélération verticale maximale mesurée dans tout le versant pendant toute la durée de la sollicitation. Un point est amplifié dans la direction verticale quand la valeur de A_y est plus grande que zéro.

$$A_y = \frac{y_{acc_{max}}}{2PGA} \quad (3)$$

Le volume de la masse amplifiée est évalué sous forme de pourcentage de l'aire amplifiée comme représenté par les formules (4) et (5).

$$pS_A = \frac{S_A}{S_T} \times 100 \quad (4)$$

$$pS_{S,A} = \frac{S_{S,A}}{S_T} \times 100 \quad (5)$$

- S_A : l'aire amplifiée, c'est l'aire de l'union des zones déjà amplifiées pendant la sollicitation du signal sismique. Dans la Figure 3, les zones 1, 2, 3 et 4 sont amplifiées à des moments différents, la valeur de S_A est l'aire de l'union de ces quatre zones.
- $S_{S,A}$: l'aire des zones amplifiées en 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 discontinues. Cette zone a une hauteur de H et une longueur de $2H$.

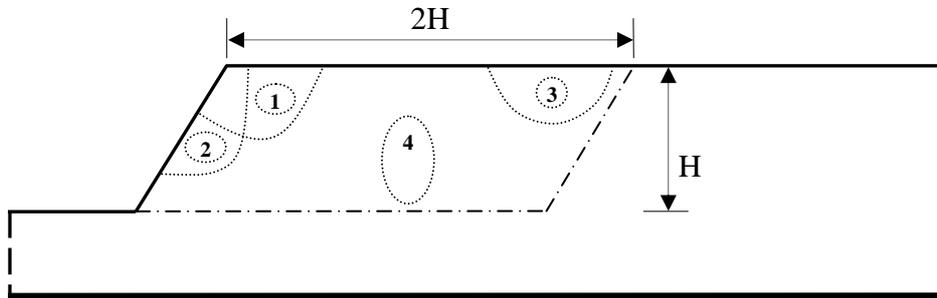


Figure 3. Zones d'amplification et dimension de la zone étudiée

2. Rôle du coefficient η dans l'étude de l'effet de site

La fréquence adimensionnelle η qui est définie par la formule (6) est déjà un paramètre considéré dans les travaux de recherche sur le sujet^[12,11,10,9,7]. Comme le montre la formule (6), 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.

$$\eta = \frac{H}{\lambda} = \frac{H \times F}{V_s} = \frac{H \times F}{\sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}} \quad (6)$$

2.1. Calcul avec pente topographique constante

2.1.1. Valeur de η constante

La valeur de η dépend de 5 facteurs : H , F , E , ν , ρ . Alors, la question posée est : quand on fait varier les valeurs de ces 5 paramètres pour avoir une même valeur de η , obtient-on le même résultat

en termes d'amplifications, d'aire amplifiée et de distribution spatiale des zones amplifiées? Pour répondre à cette question, on a lancé des simulations sur des modèles de même pente (50°) en faisant varier chaque fois 2 paramètres parmi les 5 pour que η soit toujours égal à 0,1. On a donc 10 couples de paramètres à faire varier : (F, E) ; (F, v) ; (F, ρ) ; (F, H) ; (E, v) ; (E, ρ) ; (E, H) ; (v, ρ) ; (v, H) ; (ρ , H). Les résultats sont présentés en détail dans le Tableau 1. Le graphique dans la Figure 4 représente les écarts maximaux dont chacun est le maximum de 4 petits cas a, b, c et d.

	Cas	H (m)	F (Hz)	E (MPa)	v	ρ (kg/m ³)	Vs (m/s)	Ax	Ay	pS _A (%)
(H, F)	1 a	25	4,0	5000	0,25	2000	1000	1,12	0,19	71
	b	50	2,0	5000	0,25	2000	1000	1,09	0,20	63
	c	100	1,0	5000	0,25	2000	1000	1,07	0,22	55
	d	200	0,5	5000	0,25	2000	1000	1,06	0,24	48
(H, E)	2 a	25	1,0	313	0,25	2000	250	1,12	0,19	71
	b	50	1,0	1250	0,25	2000	500	1,09	0,20	63
	c	100	1,0	5000	0,25	2000	1000	1,07	0,22	55
	d	200	1,0	20000	0,25	2000	2000	1,06	0,24	48
(H, v)	3 a	51	1,0	1250	0,201	2000	510	1,09	0,22	63
	b	50	1,0	1250	0,25	2000	500	1,09	0,20	63
	c	49	1,0	1250	0,302	2000	490	1,09	0,18	63
	d	48	1,0	1250	0,356	2000	480	1,09	0,15	63
(H, ρ)	4 a	110	1,0	5000	0,25	1653	1100	1,07	0,22	54
	b	100	1,0	5000	0,25	2000	1000	1,07	0,22	55
	c	90	1,0	5000	0,25	2469	900	1,07	0,22	56
	d	80	1,0	5000	0,25	3125	800	1,08	0,21	58
(F, E)	5 a	50	0,5	313	0,25	2000	250	1,09	0,20	63
	b	50	1,0	1250	0,25	2000	500	1,09	0,20	63
	c	50	2,0	5000	0,25	2000	1000	1,09	0,20	63
	d	50	4,0	20000	0,25	2000	2000	1,09	0,20	63
(F, v)	6 a	50	5,30	33750	0,2015	2000	2650	1,09	0,22	63
	b	50	5,20	33751	0,2482	2000	2600	1,09	0,21	63
	c	50	5,10	33751	0,2976	2000	2550	1,09	0,18	63
	d	50	5,00	33750	0,35	2000	2500	1,09	0,16	63
(F, ρ)	7 a	50	2,10	5000	0,25	1814	1050	1,09	0,20	63
	b	50	2,00	5000	0,25	2000	1000	1,09	0,20	63
	c	50	1,90	5000	0,25	2216	950	1,09	0,20	63
	d	50	1,80	5000	0,25	2469	900	1,09	0,20	63
(E, v)	8 a	50	1,0	1200	0,2	2000	500	1,09	0,22	63
	b	50	1,0	1250	0,25	2000	500	1,09	0,20	63
	c	50	1,0	1300	0,3	2000	500	1,09	0,18	63
	d	50	1,0	1350	0,35	2000	500	1,09	0,16	63
(E, ρ)	9 a	50	1,0	1125	0,25	1800	500	1,09	0,20	63
	b	50	1,0	1250	0,25	2000	500	1,09	0,20	63
	c	50	1,0	1500	0,25	2400	500	1,09	0,20	63
	d	50	1,0	1750	0,25	2800	500	1,09	0,20	63
(v, ρ)	10 a	50	1,0	1300	0,2	2167	500	1,09	0,22	63
	b	50	1,0	1300	0,25	2080	500	1,09	0,20	63
	c	50	1,0	1300	0,3	2000	500	1,09	0,18	63
	d	50	1,0	1300	0,35	1926	500	1,09	0,16	63

Tableau 1. Comparaison les résultats en faisant varier les 5 paramètres de base ($\eta=0,1$)

En termes de Ax, sur le graphique de la Figure 4, les écarts sont visibles (environ de 5%) pour les cas 1 et 2 avec une variation importante de la hauteur du versant. Pour ces même cas, on obtient

aussi des valeurs bien différentes, de l'ordre de 25%, en termes de pS_A . Les illustrations de la Figure 5^{(1),(2)} montrent que : plus la hauteur est faible plus l'amplification horizontale et la zone affectée sont importantes. Pour les autres cas, quand la hauteur est constante ($H=50m$), même la valeur des autres paramètres est variable, on obtient toujours la même valeur de A_x (1,09) et de pS_A (63%), la distribution spatiale des zones amplifiées et non amplifiées est identique à celle illustrée dans la Figure 5b.

Figure 4. Ecarts de résultats en faisant varier les valeurs de 5 paramètres de base

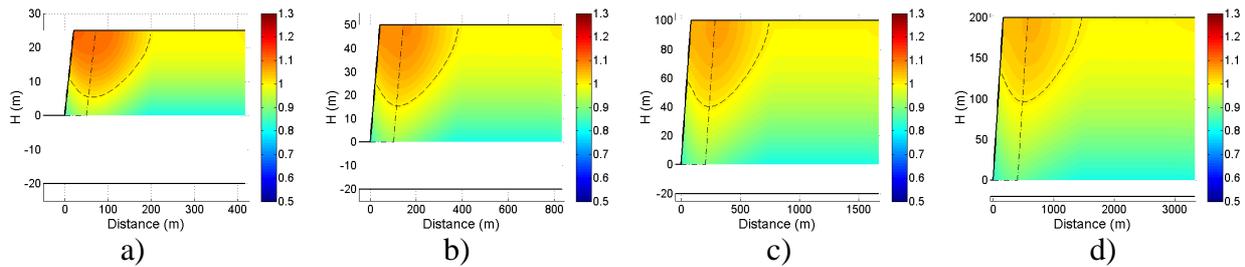
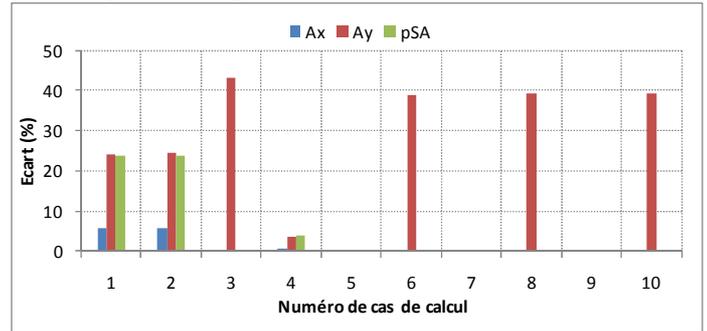


Figure 5. Distribution spatiale des zones amplifiées en accélération horizontale (A_x) dans le cas où les versants ont une même valeur de η (0,1) et une hauteur variable (cas 1 et 2)

En ce qui concerne l'amplification verticale (A_y), il y a 6 cas où les écarts sont significatifs. Ce sont : les cas 1 et 2 qui correspondent à une variation importante de la hauteur, et les cas 3, 6, 8 et 10 qui correspondent à une variation de la valeur du coefficient de Poisson (ν). La valeur de A_y dépend alors en même temps de H et de ν . Cette composante de l'amplification est encore plus aggravée quand le versant possède une hauteur importante ou une valeur de coefficient de Poisson faible.

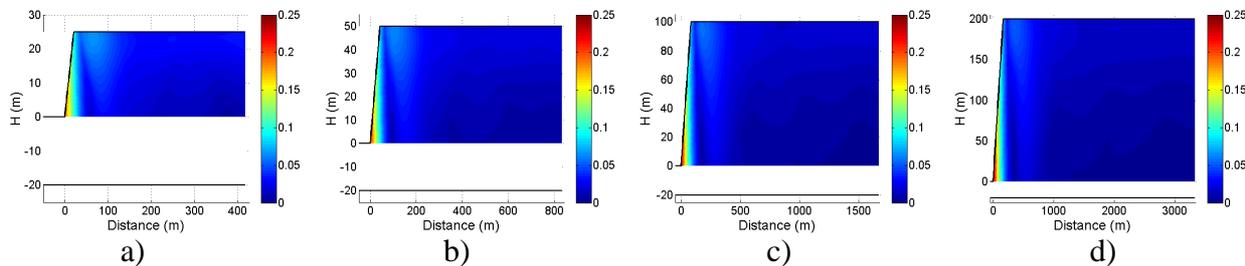


Figure 6. Distribution spatiale des zones amplifiées en accélération verticale (A_y) dans le cas où les versants ont une même valeur de η (0,1) et une hauteur variable (cas 1 et 2)

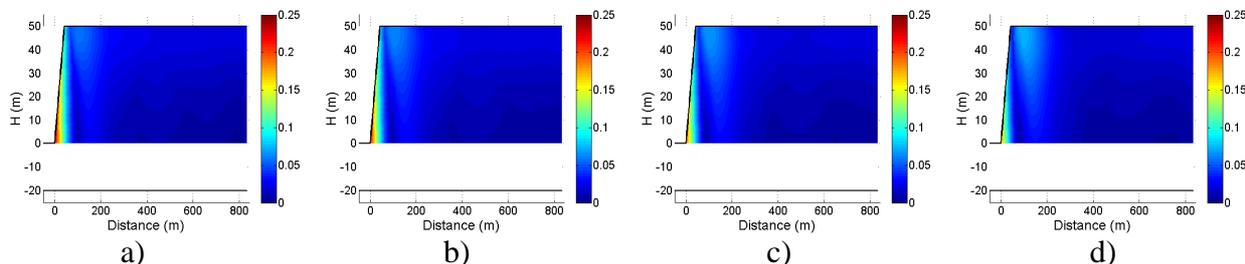


Figure 7. Distribution spatiale des zones amplifiées en accélération verticale (A_y) dans le cas où les versants ont une même valeur de η (0,1) et une valeur de ν variable (cas 3, 6, 8 et 10)

(1) La courbe discontinue en trait représente la courbe d'équivalence sur laquelle tous les points ont une même valeur de 1,0
 (2) La zone qui est délimitée par la surface libre, y compris la pente, et les segments discontinus en trait-pointillé désigne la zone étudiée (S_T) dans la formule (4)

Plus généralement, pour l'amplification de chaque composante de l'accélération, on observe que la distribution spatiale des zones amplifiées et non-amplifiées est similaire pour tous les cas de même valeur de η . Par exemple, quand la valeur de η est égale à 0,1, la seule zone amplifiée en accélération horizontale est autour de la crête, et la zone la plus amplifiée en accélération verticale se trouve le long de la pente, surtout au pied du versant.

2.1.2. Valeur de η variable

Les modèles de versant de même caractéristique morphologique (hauteur et pente) sont soumis à des signaux sismiques sinusoïdaux de différentes fréquences, de façon à ce que la valeur de η calculée varie de 0,05 à 1,0. Le graphique (Figure 8) montre que les valeurs de l'amplification (horizontale et verticale) ont tendance croître en fonction de η , et à l'inverse pour l'aire de la masse amplifiée (pS_A et pS_{SA}).

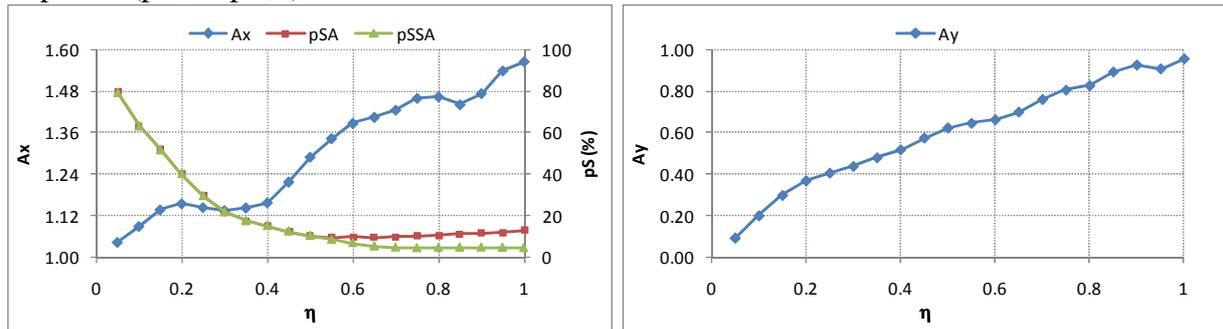


Figure 8. Variation de A_x , pS_A et A_y en fonction de η

En ce qui concerne la distribution spatiale des zones amplifiées et non amplifiées, la Figure 9 montre que, plus la valeur de η est grande, plus le nombre des zones avec amplification du signal augmente. À partir de plusieurs calculs numériques, on trouve que :

- Pour l'accélération horizontale, il y a deux seuils de η : 0,15 et 0,5
 - $\eta \leq 0,5$: il n'y a que des zones amplifiées en surface ;
 - $\eta \leq 0,15$: une seule zone d'amplification se situe en crête ;
 - $\eta > 0,15$: d'autres zones amplifiées apparaissent en arrière ;
 - $\eta > 0,5$: des zones amplifiées profondes apparaissent au sein du versant.
- Pour l'accélération verticale, la zone la plus amplifiée est toujours le long de la pente.

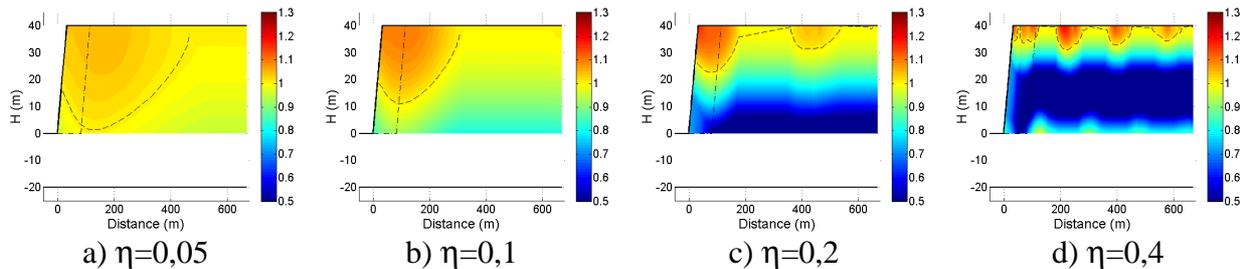


Figure 9. Amplifications de l'accélération horizontale dans les versants pour différentes valeurs de η sous la sollicitation d'un signal sismique sinusoïdal

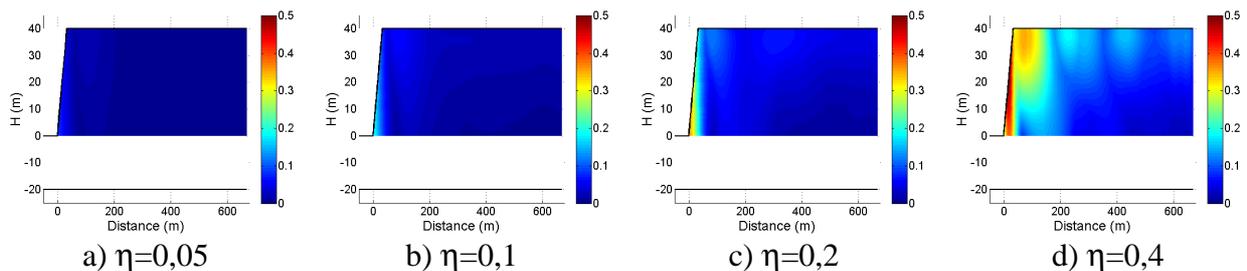


Figure 10. Amplifications de l'accélération verticale dans les versants pour différentes valeurs de η sous la sollicitation d'un signal sismique sinusoïdal

2.2. Calculs avec pente topographique variable

La pente du versant joue un rôle très important non seulement sur la valeur d'amplification maximale, mais aussi sur l'aire de la masse de terrain amplifié. Pour étudier son rôle, on a réalisé différentes simulations en faisant varier la pente du modèle de versant de 30° à 80° avec un pas de 10°. Les graphiques de la Figure 11 montrent, en général, que les valeurs de l'amplification maximale (A_x et A_y) sont proportionnelles à l'angle de la pente. Tandis que la variation de l'aire amplifiée dépend encore de η , c'est proportionnel quand la valeur de η est inférieure à 0,15, et si la valeur de η dépasse ce seuil, la relation entre pS_A (ou pS_{SA}) et la pente est inversement proportionnelle.

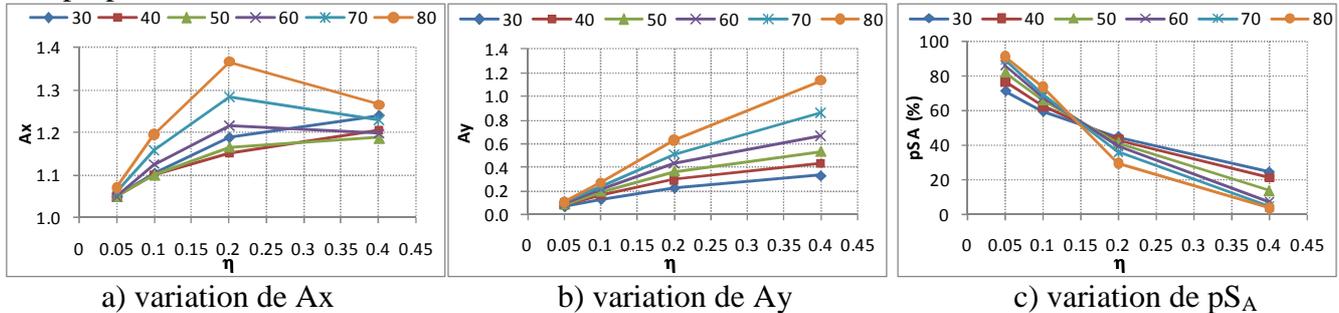


Figure 11. Variation des valeurs de A_x , A_y et pS_A en fonction de l'angle de la pente α (de 30° à 80°)

3. Conclusion

Ce travail a mis l'accent sur le rôle de la fréquence adimensionnelle (η), ce paramètre intègre plusieurs paramètres géomorphologiques et sismiques. Alors, au lieu d'évaluer l'effet de site sous l'action de plusieurs facteurs isolés, le coefficient η permet de les remplacer comme un paramètre pertinent, tout au moins pour les cas simplifiés étudiés. Cependant, le rôle de quelques paramètres ne peut pas être éliminé totalement comme la hauteur H et le coefficient v . Mais, par rapport à η , ces facteurs jouent un rôle moins important. Le Tableau 2 récapitule la relation, proportionnelle (P) ou inversement proportionnelle (IP), de tous les facteurs qui influencent les valeurs de l'amplification (A_x , A_y) et le pourcentage de l'aire amplifiée (pS). Ces facteurs sont mis dans l'ordre de la croissance de l'importance de haut en bas.

Quelques applications sont envisagées en se basant sur les résultats de ce travail :

- Pour un versant donné, avec les paramètres géomorphologiques et sismiques connus, avec l'aide du paramètre de η , on peut estimer l'ampleur de l'amplification et les zones affectées.
- Au cas où une précision élevée n'est pas demandée, avec un écart d'environ 10%, on peut lancer le calcul numérique avec un modèle de taille réduite, à condition que la valeur de η soit toujours constante par rapport au modèle initial. Ce fait aide à économiser considérablement le temps de calcul.

	A_x	A_y	pS
H	IP	P	IP
v	-	IP	-
α	P	P	P ($\eta \leq 0,15$) IP ($\eta > 0,15$)
η	P	P	IP $\eta \leq 0,5$: amplification en surface $\eta \leq 0,15$: une zone amplifiée en crête $\eta > 0,15$: plusieurs zones amplifiées $\eta > 0,5$: amplification profonde

Tableau 2. Tableau récapitulatif des influences des facteurs géomorphologiques et sismiques sur l'effet de site topographique

4. Perspectives

D'autres études sont en cours pour trouver une méthode générale permettant de déterminer le plus précisément possible les valeurs de l'amplification et les zones affectées, sans avoir recours à des simulations numériques. Et bien sûr, cette méthode devrait être simple et facile à mettre en œuvre. Ces résultats sont nécessaires pour la conception d'un ouvrage. En plus, on peut prévoir aussi la dimension de la masse instable au cas où le séisme déclencherait un glissement de versant.

5. Référence

- [1] ASHFORD Scott A., SITAR Nicholas, LYSMER John, et DENG Nan. **1997**. "*Topographic effects on the seismic response of steep slopes*". Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 87, p.701-709.
- [2] BORCHERDT R.D. **1970**. "*Effects of local geology on ground motion near San Francisco bay*". Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 60, p.29-61.
- [3] BOUCKOVALAS George D. et PAPADIMITRIOU Achilleas G. **2005**. "*Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion*". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 25, p.547-558.
- [4] BOUCKOVALAS George D. et PAPADIMITRIOU Achilleas G. **2006**. "*Aggravation of seismic ground motion due to slope topography*". First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology.p.1171-1181. Geneva, Switzerland.
- [5] BOURDEAU Céline. **2005**. "*Effets de site et mouvements de versant en zones sismiques : apport de la modélisation numérique*". Thèse soutenue le 8 Juillet 2005. Ecole des Mines ParisTech.
- [6] DAKOULAS P. **1993**. "*Earth dam-canyon interaction effects for obliquely incident SH waves*". Journal of Geotechnical Engineering, vol. 119, p.1696-1716.
- [7] DE MARTIN F. et KOBAYASHI H. **2010**. "*Etude des effets d'une topographie sur le mouvement sismique*". Rapport BRGM/RP-59103-FR.
- [8] Eurocode 8. **2005**. "*Calcul des structures pour leur résistance aux séismes. Partie 5: Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques*".
- [9] GLINSKY Nathalie et BERTRAND Etienne. **2011**. "*Etude numérique d'effets de site topographiques par une méthode éléments finis discontinus*". 8ème Colloque National AFPS 2011.p.723-732. Pars, France.
- [10] MESSAOUDI Akila, LAOUAMI Nasser, et MEZOUER Nourredine. **2011**. "*Effet de la topographie des pentes sur les réponses sismiques*". 8ème Colloque National AFPS 2011.p.285-294. Paris, France.
- [11] NGUYEN K.V. **2005**. "*Étude des effets de site dus aux conditions topographiques et géotechniques par une méthode hybride éléments finis/éléments frontières*". Thèse soutenue le 17 Janvier 2005. Ecole des Ponts ParisTech.
- [12] NGUYEN K.V. et GATMIRI B. **2007**. "*Evaluation of seismic ground motion induced by topographic irregularity*". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 27, p.183-188.
- [13] VANBRABANT Frédéric. **1998**. "*Prise en compte des effets de site topographiques dans l'étude de la stabilité des pentes soumises à des sollicitations dynamiques*". Thèse soutenue le 23 Novembre 1998. Ecole des Mines ParisTech.