

Chapitre 2. Analyse des paramètres importants à l'origine des effets de site topographiques

2.1. Méthodologie

2.1.1. Données générales sur les effets de site topographiques des versants

De nombreuses observations macrosismiques à travers le monde – France (séisme de 1909 à Lambesc, présenté dans la partie 1.2.1), Italie (séisme de 1980 en Irpinia), Etats-Unis (séisme de 1987 et de 1989 en Californie), Grèce (séisme de 1999 à Athènes, présenté dans la partie 1.2.2) – ont montré que le mouvement sismique était souvent amplifié au voisinage de la crête du versant. Ce phénomène, nommé « effet de site topographique », est la cause de la modification des caractéristiques spatiales, spectrales et temporelles du signal sismique dans un massif de versant. En présence d'une morphologie irrégulière (un versant isolé, une colline...), les ondes incidentes peuvent interférer avec celles qui sont réfléchies et réfractées sur les surfaces libres telles que la surface en amont et la surface de la pente (Figure 38a). Une amplification ou une « dés-amplification » apparaît en conséquence en surface ou au sein du versant (Figure 38b).

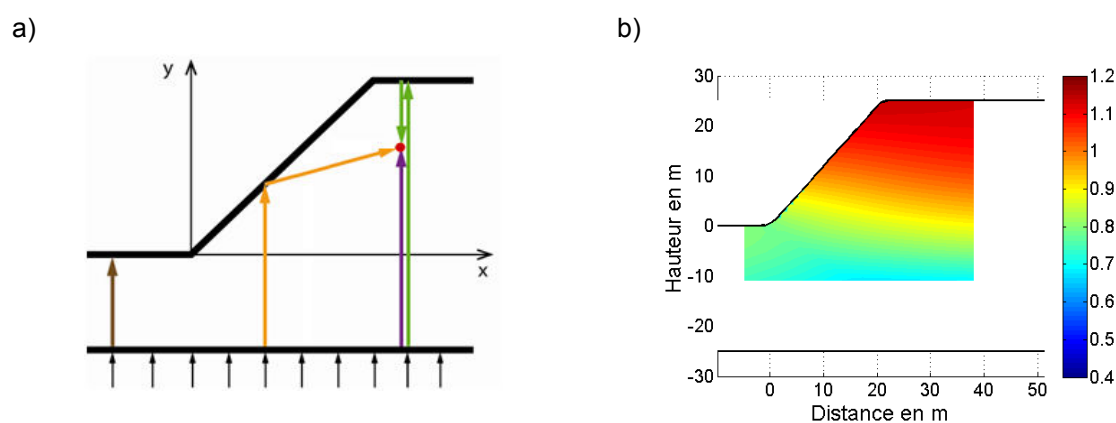


Figure 38. Illustration schématique du mécanisme et de la manifestation des effets de site topographiques a) Interférence des ondes incidentes et réfléchies b) Réponse sismique du versant (la zone rouge est celle affectée par l'amplification horizontale)

Les observations expérimentales montrent que le mouvement sismique est amplifié au sommet du versant et « dés-amplifié » au pied (quelques exemples ont été présentés dans la partie 1.2). À travers les simulations numériques, ce phénomène a été également constaté par plusieurs auteurs tels que Ashford et al., 1997^[9]; Bourdeau, 2005^[33]; Nguyen et Gatmiri, 2007^[117]; De Martin et Kobayashi, 2010^[55]; Messaoudi et al., 2011^[106]. Quelques résultats

représentatifs ont été présentés dans la partie 1.3.3. La morphologie du relief peut donc multiplier l'impact de la secousse et des effets induits. Ce fait aggrave les dommages structuraux et parfois déclenche des mouvements de versant comme le cas du glissement de Las Colinas (El Salvador) ou les mouvements de versants déclenchés par le séisme du Sichuan en 2008 (partie 1.1.2.2).

Le calcul des effets de site topographiques a été recommandé dans les règles parasismiques PS-92 (présenté dans 1.3.4.1) et plus récemment dans l'Eurocode 8 (présenté dans 1.3.4.2). Cependant, seules les conditions morphologiques ont été considérées dans ces réglementations. Les autres facteurs tels que les caractéristiques géologiques et sismiques du matériau constitutif du versant, ainsi que les caractéristiques du signal sismique n'ont pas été prises en compte. Or ces facteurs ont vraisemblablement des influences significatives sur ces phénomènes d'amplification et « dés-amplification ».

Un paramètre nommé « fréquence adimensionnelle » qui peut synthétiser plusieurs facteurs individuels dans l'évaluation des effets de site a été utilisé par plusieurs auteurs dont les résultats ont été présentés dans la partie 1.3.3. Pour rappeler, ce paramètre est défini par le rapport de la hauteur H du versant à la longueur d'onde λ du signal incident. L'équation [16] montre les paramètres considérés dans le calcul de cette fréquence adimensionnelle: hauteur du versant (H), fréquence du signal sismique (F), module d'Young (E), coefficient de Poisson (ν) et masse volumique (ρ). Ainsi, ce nouveau paramètre représente un grand potentiel en étude et en estimation des effets de site topographique. Il a été utilisé par des chercheurs dans le domaine comme un indicateur important pour évaluer les effets de site topographique des versants. (Ashford et al., 1997^[9]; Ashford et Sitar, 1997^[8]; Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]; Nguyen, 2005^[116]; Bouckovalas et Papadimitriou, 2006^[32]; Nguyen et Gatmiri, 2007^[117]; De Martin et Kobayashi, 2010^[55]; Glinsky et Bertrand, 2011^[67]; Messaoudi et al., 2011^[106]).

$$\eta = \frac{H}{\lambda} = \frac{H \times F}{V_s} = \frac{H \times F}{\sqrt{\frac{E}{2(1+\nu)\rho}}} \quad [16]$$

L'analyse des phénomènes d'effets de site topographiques des versants reste un thème de recherche, car même après simplification, le problème contient encore plusieurs variables à considérer : les paramètres géométriques et géologiques, les conditions hydrologiques, les caractéristiques du signal sismique... Pour cette raison, très peu de travaux peuvent proposer, jusqu'à présent, une méthode générale pour prédire ces phénomènes. On peut néanmoins citer spécialement les travaux de Ashford et al., 1997^[9], de Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]. Le point le plus remarquable de ces dernières études est la prise en compte de la fréquence adimensionnelle comme indice fondamental pour évaluer les effets de site topographiques. Par cette approche, le phénomène a été bien décrit et assez bien estimé à travers des simulations numériques.

La question qui peut se poser est de savoir si la fréquence adimensionnelle peut représenter de manière perfectionnée tous les paramètres intégrés. Autrement dit, tous les effets produits par les paramètres intégrés peuvent-ils être calculés en utilisant la fréquence adimensionnelle ? De plus, y a-t-il d'autres paramètres qui affectent le phénomène ? Si tel est le cas, quelles sont leurs propres influences et les éventuels effets en combinaison avec

les autres paramètres ? Quels sont les paramètres les plus importants ? Ce chapitre a pour l'objectif de répondre à toutes ces questions.

2.1.2. Critères d'analyse et de comparaison des résultats numériques

Les résultats de simulations numériques qui seront discutés dans ce chapitre sont évalués en se basant sur plusieurs critères. Ils sont divisés en 4 groupes : les facteurs d'amplification, les indicateurs de l'aire de la masse potentiellement instable, les indicateurs de la dimension de la zone affectée en crête du versant et la distribution spatiale des zones affectées. La définition ainsi que la méthode de détermination de chaque critère sont données ci-dessous.

2.1.2.1. Facteurs d'amplification

L'ampleur de l'amplification du mouvement sismique due au relief est traduite par les facteurs d'amplification : A_x (valeur maximale de l'accélération horizontale normalisée) et A_y (valeur maximale de l'accélération verticale normalisée). Ils peuvent être déterminés suivant les équations [17] et [18]. Dans celles-ci, A_{x_i} et A_{y_i} sont respectivement l'accélération horizontale normalisée et l'accélération verticale normalisée d'un point i quelconque dans le modèle. Ces valeurs représentent le rapport des maxima de l'accélération horizontale et verticale ($a_{x,i}$; $a_{y,i}$) du point i pendant toute la durée de la sollicitation et le maximum de l'accélération horizontale obtenue à un site de référence ($a_{x,rf}$). Généralement, pour être considéré comme site de référence, un site doit présenter une morphologie plane, sans irrégularités et des caractéristiques géologiques semblables à celles du massif constituant le versant. De plus, il doit se situer à la même distance de l'épicentre que le site étudié.

$$A_x = \max \{ A_{x_i} \} = \max \left\{ \frac{a_{x,i}}{a_{x,rf}} \right\} \quad [17]$$

$$A_y = \max \{ A_{y_i} \} = \max \left\{ \frac{a_{y,i}}{a_{x,rf}} \right\} \quad [18]$$

Bien que la sollicitation sismique soit une onde d'excitation purement horizontale (SV), le signal sismique en un point du versant peut contenir une composante verticale comme on l'a vu au chapitre 1 (1.3.3). Celle-ci est née suite au changement de direction de l'onde incidente après réflexion sur la pente.

Pour un enregistrement sismique au site de référence en champ libre, il ne peut pas y avoir de composante verticale. En ce point, la réponse sismique ne contient qu'une composante de l'accélération horizontale ($a_{x,rf}$). L'accélération verticale est nulle ($a_{y,rf}=0$) et donc elle ne peut pas être utilisée pour normaliser l'accélération verticale obtenue sur le site étudié. Pour cette raison, l'accélération horizontale du site de référence ($a_{x,rf}$) est utilisée pour normaliser

la réponse sismique du versant en direction horizontale mais aussi verticale comme présenté dans les équations [17] et [18].

Sous l'action des effets de site topographique, la composante horizontale du mouvement sismique d'un point i peut être amplifiée ($Ax_i > 1.0$) ou « dés-amplifiée » ($Ax_i < 1.0$). Tandis que pour la composante verticale du mouvement sismique, une valeur de Ay_i supérieure à zéro peut donc être considérée comme « traduire » non pas une réelle amplification, mais un effet de site car il n'y a jamais de composante verticale en champ libre quand le signal incident est du type SV. Par abus de langage, on parlera quand même d'amplification verticale.

2.1.2.2. Aire de la masse potentiellement instable

Les effets de site sont considérés comme l'un des principaux facteurs susceptibles de déclencher un mouvement de versant. Leurs impacts ont été étudiés et montrés dans plusieurs travaux de recherche (Havenith et al., 2003^[76]; Bourdeau, 2005^[33]; Del Gaudio et Wasowski, 2007^[56]). De plus, les observations expérimentales et numériques montrent que les zones proches ou en contact avec la partie supérieure de la pente sont particulièrement affectée par un fort mouvement sismique. De plus, sa position au sommet du versant est favorable pour former une masse instable. Pour cette raison, le deuxième critère vise à caractériser l'aire des zones où le signal sismique est amplifié et qui sont donc potentiellement instables.

Si on appelle S_T , l'aire de la zone dite « critique » délimitée dans la Figure 39 par la pente, une partie de la surface supérieure et la ligne de tirets pointillés (zone colorée en jaune) on peut définir deux aires particulières : 1) l'aire S_A (les zones rayées) qui correspond à la partie de la région « critique » affectée par une amplification horizontale ($Ax_i > 1.0$) et 2) l'aire S_{AS} (la zone avec rayures rouges) qui représente la partie de S_A en contact avec les surfaces libres (la pente, la surface horizontale en amont). Ces aires sont normalisées par l'aire de la région critique (S_T) suivant les équations [19] et [20] ce qui donne les deux indices pS_A et pS_{AS} . Il est nécessaire de noter que l'évaluation de S_{AS} est plus intéressante que celle de S_A , car les zones proches de la surface libre sont plus susceptibles de contribuer au développement d'une instabilité que celles en profondeur.

$$pS_A = \frac{S_A}{S_T} \quad [19]$$

$$pS_{AS} = \frac{S_{AS}}{S_T} \quad [20]$$

- S_T : Aire de la région critique (zone colorée en jaune), délimitée par la pente, une partie de la surface supérieure et la ligne de tirets pointillés dans Figure 39 ($S_T = 2H^2$)
- S_A : Aire des zones de S_T qui sont affectées par une amplification horizontale ($Ax_i > 1.0$). Dans la Figure 39, S_A est la réunion des aires des zones

numérotées 1 (zone avec rayures rouges) et 2 (zone avec rayures vertes), la zone 1 est parfois divisée en plusieurs zones plus petites (e.g. 1a et 1b).

S_{AS} : Part de S_A en contact avec les surfaces libres (zone avec rayures rouges).
Dans la Figure 39, S_{AS} est l'aire de la zone 1 (ou des zones 1a et 1b).

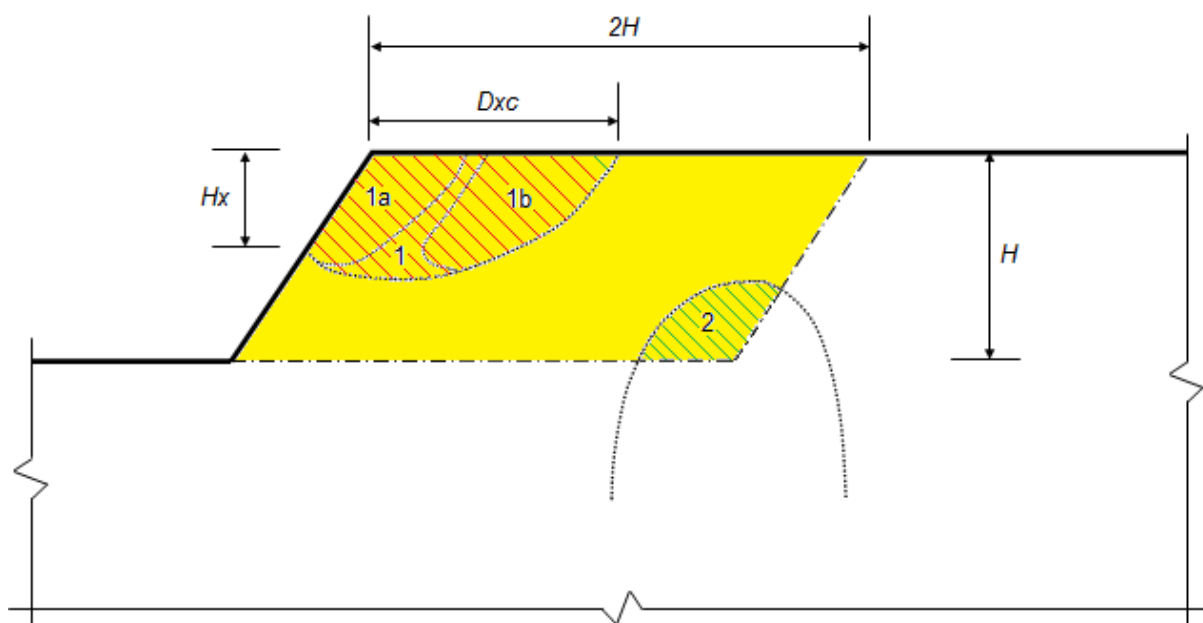


Figure 39. Illustration schématique de la localisation des zones affectées par l'amplification horizontale à l'intérieur de la région critique

Les zones affectées par une amplification verticale ($A_{y_i} > 0$) ne sont pas considérées. La raison est que l'amplification verticale affecte quasiment tout le modèle de versant et non seulement quelques zones bien définies comme l'amplification horizontale (Figure 41). C'est pourquoi, pour la composante verticale, seul le facteur d'amplification (A_y) est considéré, les autres critères relatifs aux surfaces affectées ne sont pas évalués.

2.1.2.3. Dimension de la zone affectée en crête du versant

Plusieurs travaux d'études expérimentales (Bouckovalas et Kouretzis, 2001^[29]; Gazetas et al., 2002^[65]; Assimaki D, 2004^[10]; Glinsky et Bertrand, 2012^[69]) ainsi que numériques (Bouchon, 1973^[28]; Ashford et al., 1997^[9]; Vanbrabant, 1998^[149]; Bourdeau, 2005^[33]; Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]; Nguyen, 2005^[116]; De Martin et Kobayashi, 2010^[55]; Glinsky et Bertrand, 2011^[68]; Nguyen et al., 2013^[115]) ont montré que la zone au voisinage de la crête est souvent celle qui est affectée par la plus forte amplification du mouvement sismique (horizontal et vertical). Les ouvrages en surface de cette zone sont en conséquence les plus menacés. De plus, la position de cette zone en crête de la pente, est favorable pour le déclenchement d'une instabilité. Pour toutes ces raisons, cette zone de risque élevé mérite une attention particulière. Donc, la hauteur (H_x) et l'extension en surface supérieure (D_{xc}) sont également considérées dans l'évaluation des effets de site (Figure 39).

2.1.2.4. Distribution spatiale des zones affectées

Dans le but de donner une vision globale de la distribution des zones dites « amplifiées » et « dés-amplifiées » au sein du versant, la réponse sismique en chaque point est exprimée par un code de couleur en fonction de la valeur de l'accélération normalisée correspondante. Une couleur dans la gamme de jaune à bleu (Figure 40) représente une « dés-amplification » ($A_{xi} < 1.0$), et au contraire une amplification est exprimée par une couleur plus chaude dans la gamme de jaune à rouge. De plus, la courbe d'isovaleur $A_{xi} = 1.0$ est ajoutée pour mieux montrer la limite entre les zones amplifiées et « dés-amplifiées ». Avec la pente et la surface supérieure, cette courbe délimite les zones amplifiées en contact avec les surfaces libres. Il faut noter que dans ces graphiques, l'échelle des valeurs en abscisse est différente à celle en ordonnée (distorsion des échelles).

Grâce à cette représentation, les dimensions H_x et D_{xc} de la zone amplifiée en crête peuvent être évaluées directement sur la Figure 40. Dans cet exemple, une seule zone d'amplification est trouvée à l'intérieur de la région critique (S_T), l'aire S_A est ainsi confondue avec l'aire S_{AS} .

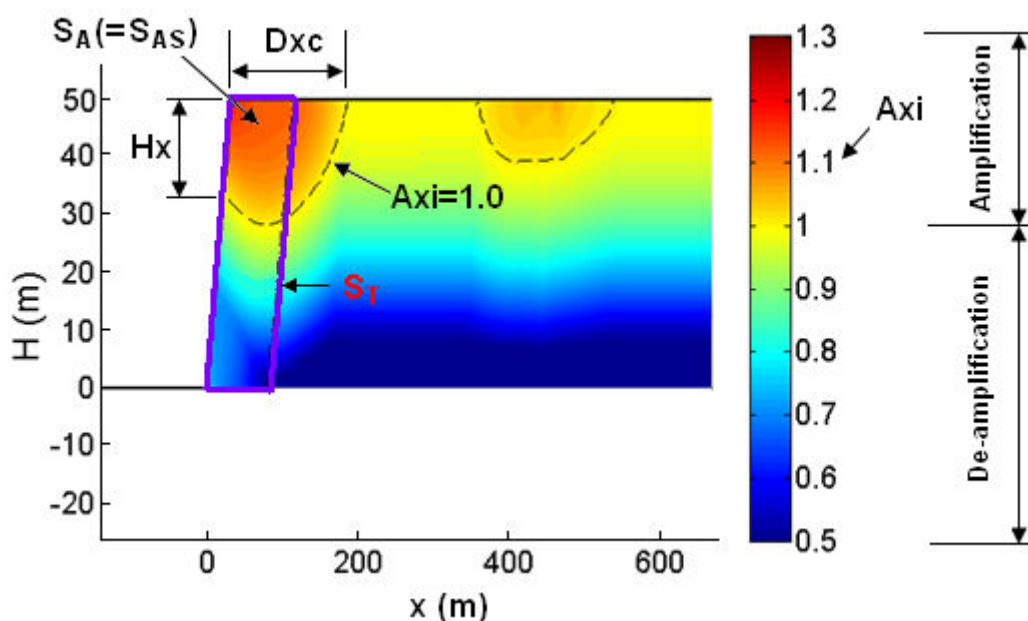


Figure 40. Exemple de la distribution spatiale de la réponse sismique horizontale d'un modèle de versant sous sollicitation d'un signal sismique sinusoïdal SV

La représentation graphique de la composante verticale de la réponse sismique du versant est réalisée de la même manière avec le même code de couleur. Cependant, les zones affectées par une composante verticale de l'accélération, et donc ce qu'on a appelé une amplification verticale, sont réparties sur tout le volume du massif (Figure 41) et ne peuvent donc pas être clairement délimitées comme dans le cas de l'amplification horizontale. Pour cette raison, la zone critique et la courbe d'iso-valeur ne sont pas présentées dans les graphiques concernant l'amplification verticale.

Il faut noter que dans le cadre de travail de recherche, on s'intéresse uniquement à la réponse sismique du massif dans le versant et non pas au niveau du substratum. Pour cette raison, les graphiques présentent uniquement les amplifications dans la région étudiée qui est délimitée par la pente et tout le massif en arrière de la pente, comme représenté dans la Figure 40 et la Figure 41.

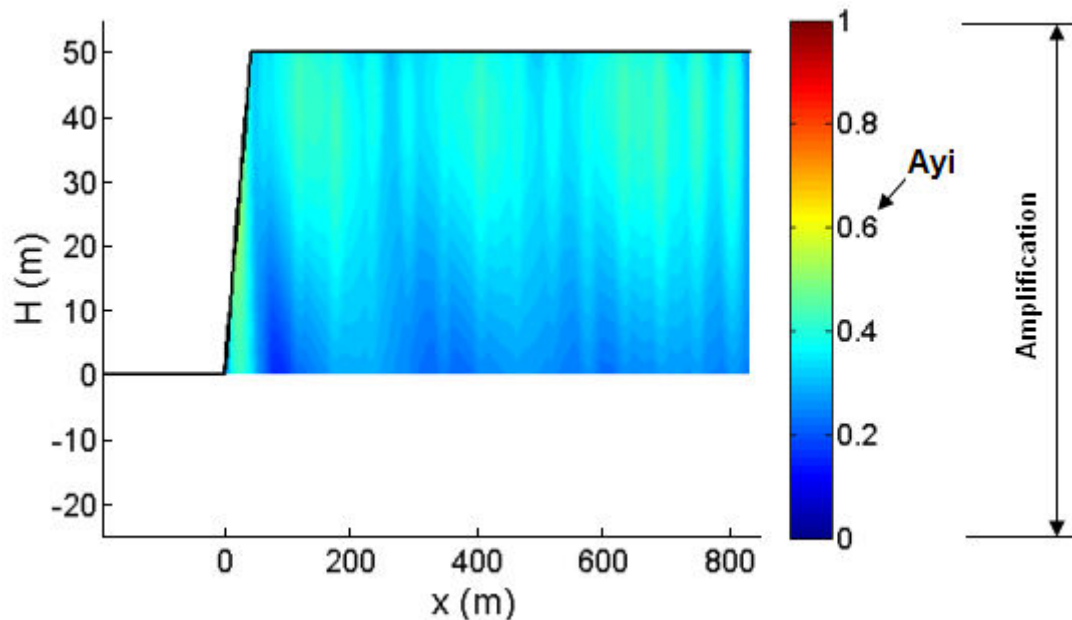


Figure 41. Exemple de la distribution spatiale de la réponse sismique verticale d'un modèle de versant sous sollicitation d'un signal sismique sinusoïdal SV

2.1.3. Modèle numérique

2.1.3.1. Présentation du logiciel utilisé

Le logiciel FLAC 2D 5.0 (Itasca), basé sur la méthode des différences finies, a été utilisé pour réaliser les simulations numériques dans le cadre de ce travail de recherche. Ce logiciel est destiné spécifiquement pour les études géotechniques et d'exploitation des mines. En comparaison avec les autres logiciels sur le marché (Plaxis, Geo5,...), FLAC est plus difficile à manipuler car il est piloté par des commandes de base, chacune réalisant une tâche particulière. L'interface graphique qui devrait permettre d'utiliser le logiciel de manière plus facile et interactive est toujours en cours de développement. Cette fonctionnalité est encore limitée notamment pour des modèles complexes ou de grandes tailles. Donc, pour utiliser le logiciel de manière la plus efficace possible, il est préférable d'écrire des fichiers de script qui contiennent la suite de commandes souhaitées. Par contre, le point fort de ce logiciel est qu'il offre la possibilité de contrôler de manière libre tous les caractéristiques souhaitées du modèle ainsi que le comportement du modèle en détail.

Les analyses sous sollicitations dynamiques peuvent être effectuées en utilisant soit un signal sismique artificiel prédéfini, sous forme d'une fonction continue (signal sinusoïdal, signal de Ricker,...), soit un signal sismique réel sous forme d'un tableau de valeurs enregistrées au cours d'un séisme. De plus, le logiciel contient un langage de programmation (FISH) interne qui est un outil puissant pour aider les utilisateurs dans les étapes de la construction du modèle, et permet des calculs à partir de scénarios préprogrammés.

2.1.3.2. Choix des conditions géomorphologiques du modèle de calcul

La prise en compte des paramètres relatifs au contexte morphologique, géologique, hydrogéologique et sismique est nécessaire pour rapprocher le modèle numérique de la réalité. Cependant, une telle étude nécessite une quantité importante de données de bonne qualité qu'il faut acquérir à partir de nombreuses investigations in situ ou d'essais de laboratoire. En raison de la limite du temps et du budget, de telles investigations ne sont pas toujours réalisables. Pour cette raison, il est indispensable de prendre des hypothèses simplificatrices. La Figure 42 présente le modèle de calcul avec les caractéristiques géomorphologiques simplifiées qui seront considérées dans le cadre de ce travail de recherche.

La morphologie du modèle de versant est simplifiée par une pente uniforme reliant deux plateaux en aval et en amont dont la taille est importante par rapport à la largeur de la pente. Le matériau est considéré comme homogène, isotrope et élastique. Concernant les sollicitations dynamiques, un amortissement mécanique est incorporé dans le modèle, le matériau a alors un comportement viscoélastique. Les analyses sont effectuées principalement sur la réponse sismique du versant pendant et juste après la sollicitation. L'influence du phénomène à long terme n'est pas considérée. Les effets particuliers qui peuvent être causés par les conditions hydrauliques (l'effet de la nappe phréatique, l'influence des précipitations...) ne sont pas pris en compte.

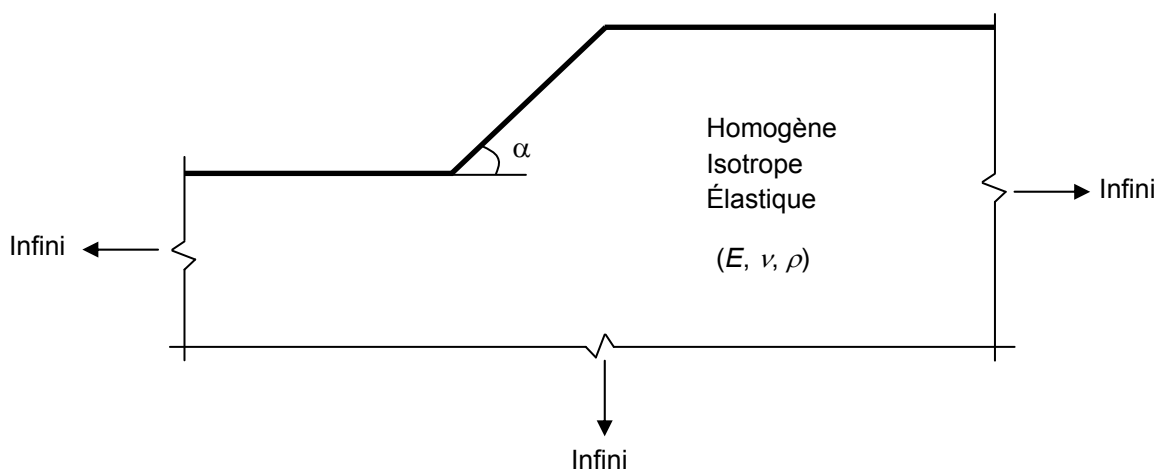


Figure 42. Conditions géomorphologiques simplifiées du modèle de calcul

2.1.3.3. Maillage du modèle de calcul

a. Largeur du maillage

Sitar et Clough (Sitar et Clough, 1983^[136]) recommandent de positionner les limites latérales du système à $8 H$ (H = hauteur du versant) de part et d'autre du pied de la pente, ce qui conduit à une extension horizontale totale du modèle égale à $16 H$. Cependant, pour le cas de faible pente, la largeur correspondant à la pente augmente, la distance entre la crête et la frontière latérale du modèle est en conséquence réduite. Des perturbations dues aux effets de bords peuvent alors toucher la zone étudiée. Donc, il est approprié de déterminer l'extension de la grille en fonction à la fois de la hauteur H et de l'angle de la pente α . Des analyses de dimension du maillage ont été effectuées par Bourdeau, 2005^[33] en considérant que les maillages ont une largeur totale égale à :

$$[\text{Extension en aval}] + [\text{Largeur de pente}] + [\text{Extension en amont}].$$

Deux tailles de maillage ont été considérées : 1) $[10 H] + [H/\tan(\alpha)] + [10 H+H/\tan(\alpha)]$ et 2) $[6 H] + [H/\tan(\alpha)] + [8 H+H/\tan(\alpha)]$. Les enregistrements du déplacement horizontal au sommet donnent des résultats comparables. Alors, en considérant la relation entre la taille du modèle et le temps de calcul, le 2^e maillage avec la largeur totale égale à $14 H+2 H/\tan(\alpha)$ est plus intéressant. Cependant, dans le cadre de ce travail, on s'intéresse non seulement à l'intensité des effets de site qui se traduisent par les amplifications maximales mais aussi la dimension des zones affectées, notamment les zones situées en crête et sur la surface en amont derrière la crête. Pour cette raison, la surface en amont du modèle de calcul est étendue jusqu'à $[15 H+H/\tan(\alpha)]$ pour élargir la zone étudiée et également la zone où se trouvent généralement les amplifications. Au contraire, la surface en aval est raccourcie à $[5 H]$ qui est suffisant pour éviter les influences de la limite latérale sur la zone étudiée. Finalement, la largeur du maillage choisie est égale à $[5 H] + [H/\tan(\alpha)] + [15 H+H/\tan(\alpha)]$ comme montré dans Figure 43.

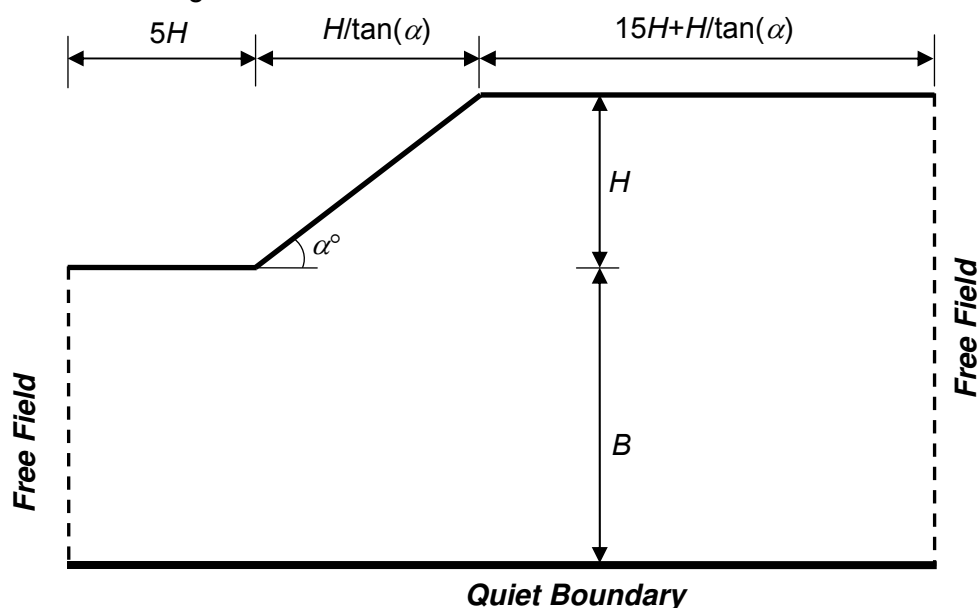


Figure 43. Dimension du modèle numérique et conditions aux limites appliquées aux deux limites latérales et à la base du modèle

b. Hauteur du maillage

La hauteur du maillage est déterminée par $H+B$ avec H la hauteur du versant et B l'épaisseur de la base (Figure 43). Concernant le choix de la valeur de B , les deux conditions suivantes doivent être considérées :

- La base doit être suffisamment profonde pour éviter les perturbations dues aux conditions aux limites à la base du modèle,
- Le temps de calcul doit être dans la limite de la faisabilité par référence à la taille du modèle et à la capacité de l'ordinateur (la mémoire, la puissance).

Une étude préliminaire est réalisée pour évaluer l'impact du choix de l'épaisseur B . Sa valeur varie de $0.5H$ à $20H$. Les calculs sont répétés sur plusieurs modèles de différentes pentes α , de différentes fréquences adimensionnelles η et de différentes hauteurs H (Tableau 5).

α (°)	η		
	0.05	0.5	1.0
30		x	
50	x	x, o	x
70		x	

Tableau 5. Valeurs de la pente (α) et de la fréquence adimensionnelle (η) utilisées pour tester l'effet de la base B du modèle de versant de $H=50\text{m}$ (x) et $H=100\text{m}$ (o)

Les résultats obtenus sont analysés en considérant ces critères d'études : l'amplification maximale de l'accélération horizontale et verticale (A_x , A_y), les aires affectées par une amplification horizontale S_A et S_{AS} et les coefficients correspondants (pS_A et pS_{AS}) ainsi que les dimensions de la zone amplifiée en crête (H_x , D_xc). La méthode utilisée pour déterminer ces critères est présentée dans la partie 2.1.2.

L'impact de l'épaisseur B est présenté dans la Figure 44, la Figure 45 et la Figure 46. Ces résultats nous montrent que :

- Pour les valeurs de B faibles ($B \leq 2H$), les résultats obtenus sont significativement affectés par le choix de B .
- Pour les valeurs de B modérées ($2H < B < 8H$), l'impact du choix de B est faible, les résultats obtenus varient très peu et commencent à atteindre l'état stable.
- Pour les valeurs de B élevé ($B \geq 8H$), les résultats obtenus sont stables, ils sont constants et indépendants du choix de B .

Le résultat de calcul pour les cas $B > 8H$ peut donc être considéré comme proche d'un cas réel où les ondes sismiques se propagent depuis une source très profonde. Cependant, il

n'est pas pratique d'utiliser un modèle numérique avec une telle épaisseur de la base, car il demande énormément de mémoire et de temps de calcul. Pour cette raison, une valeur de B dans l'intervalle modéré ($2H < B < 8H$) peut être plus intéressante.

Une évaluation générale de l'impact du choix de B est présentée dans la Figure 47. Dans ce graphique, les résultats correspondant au cas $B = 20 H$ sont considérés comme les valeurs de référence. Ensuite, pour chaque critère étudié, l'écart relatif est calculé en comparant le résultat obtenu pour chaque valeur de B avec le cas de référence. Chaque point dans le graphique de la Figure 47 représente la moyenne des écarts relatifs des 6 cas d'étude mentionnés dans le Tableau 5. Enfin, la courbe « Moy » (qui n'a pas de sens physique particulier) représente l'écart relatif moyen de tous les critères. Ce graphique montre que tous les choix de B supérieur à H sont acceptables (écart moyen inférieur à 10 %). Cette observation est cohérente avec la recommandation ($B=H$) proposée par Sitar et Clough, 1983^[136]. Cependant, pour cette valeur de B , l'amplification maximale (A_x) présente encore un écart assez significatif (> 15 %). Dans le cas où l'on considère les facteurs d'amplification (A_x, A_y) comme les critères les plus importants, on doit alors prendre $B \geq 2 H$ pour avoir un écart maximal de 10 % et $B \geq 4 H$ pour un écart maximal de 5 %.

Les illustrations de la Figure 48 et de la Figure 49 montrent que le quatrième critère d'interprétation, la distribution spatiale des zones affectées au sein du versant (voir 2.1.2.4), n'est pas influencée par le choix de l'épaisseur B .

Sur la base de ces résultats, on a décidé finalement de prendre $B = 4 H$ pour avoir un écart relatif de A_x et A_y inférieur à 5 %. Ceci est appliqué pour tous les modèles de versant dans ce travail. En considérant tous les critères d'études, ce choix conduit à un écart relatif moyen d'environ 6 %.

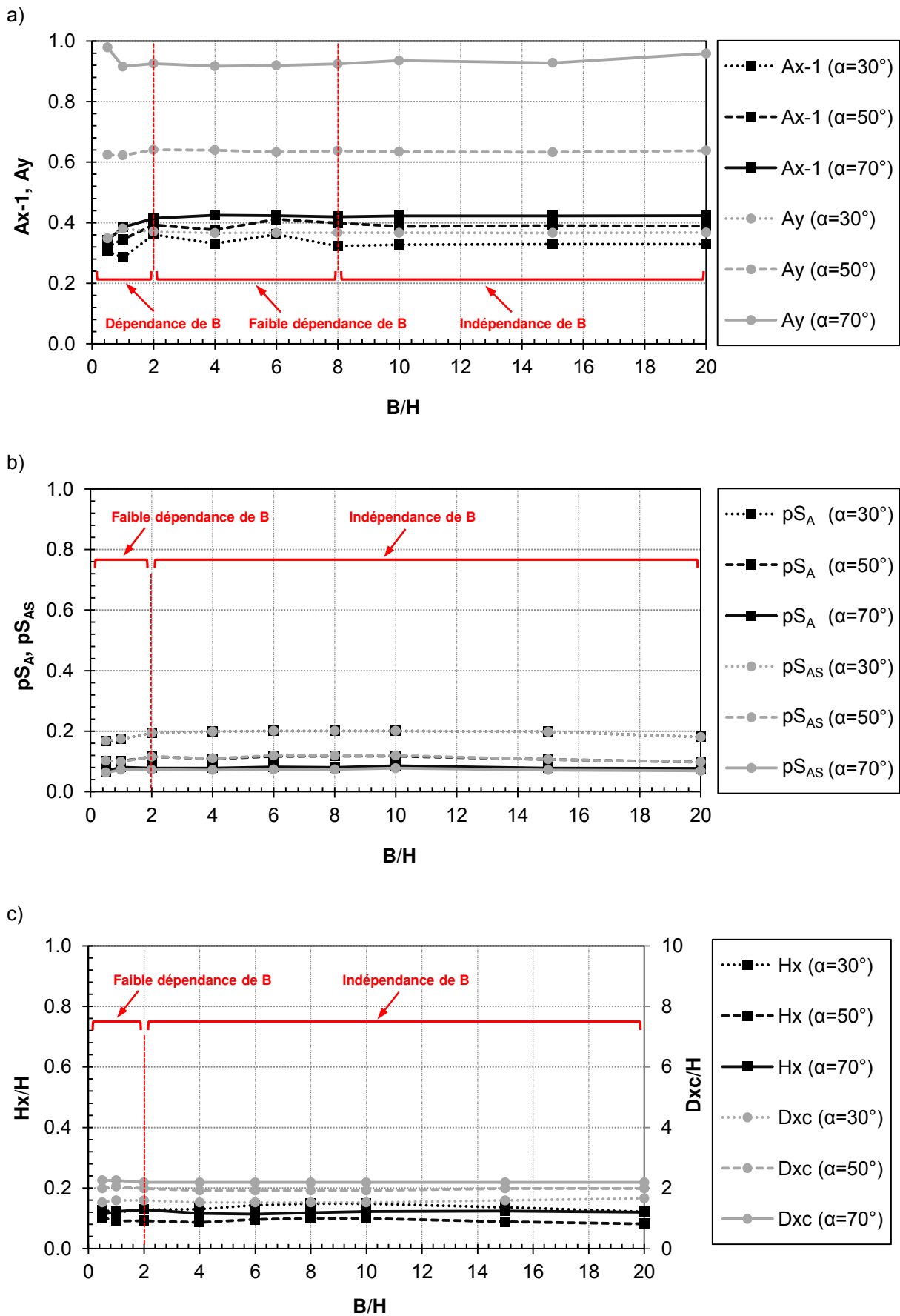


Figure 44. Influence du choix de l'épaisseur B sur les critères d'interprétation pour les modèles de pentes différentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ$)

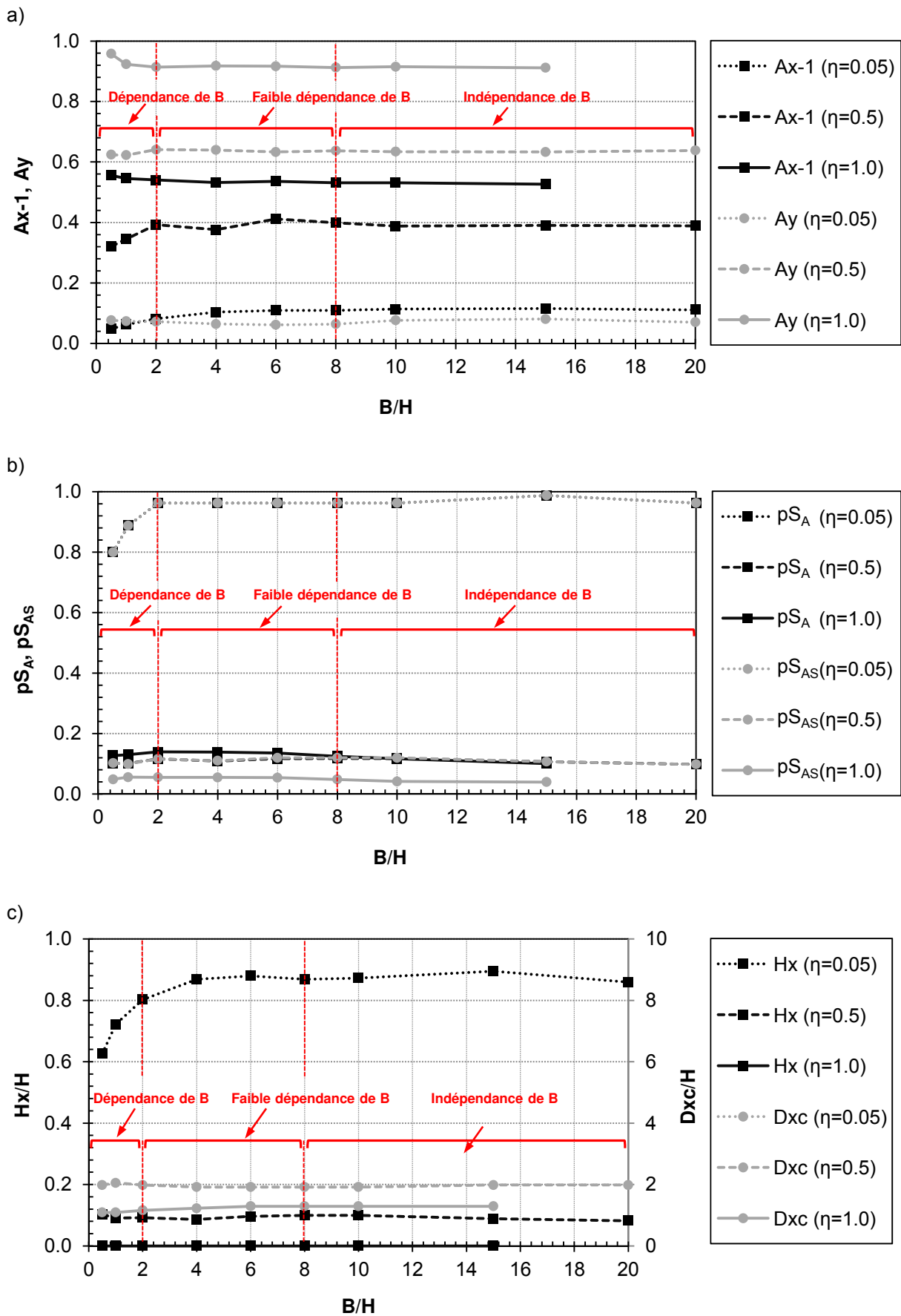


Figure 45. Influence du choix de l'épaisseur B sur les critères d'interprétation pour les modèles de valeurs différentes de la fréquence adimensionnelle ($\eta = 0.05 ; 0.5 ; 1.0$)

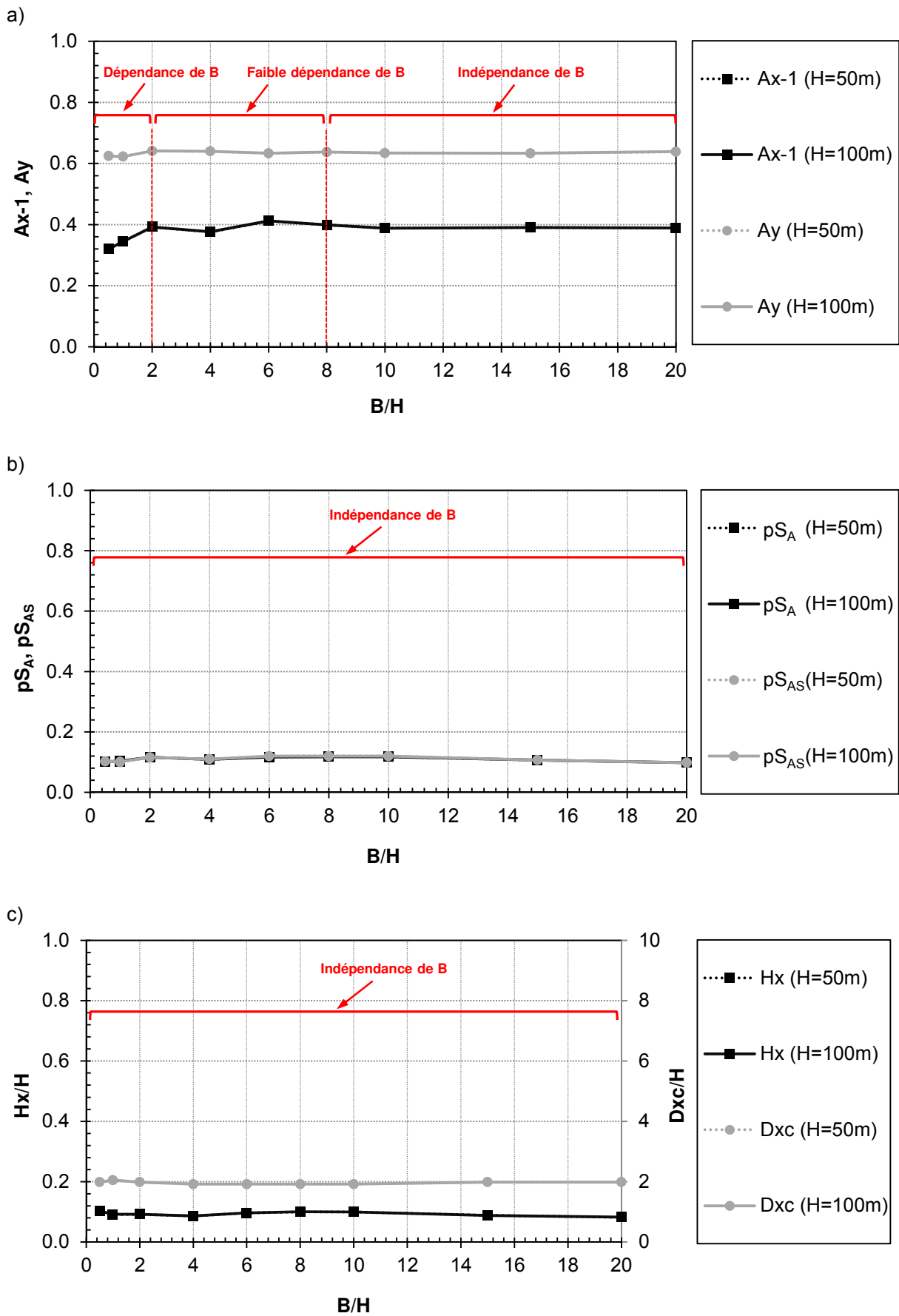


Figure 46. Influence du choix de l'épaisseur B sur les critères d'interprétation pour les modèles de hauteurs différentes ($H = 50 \text{ m}$; 100 m)

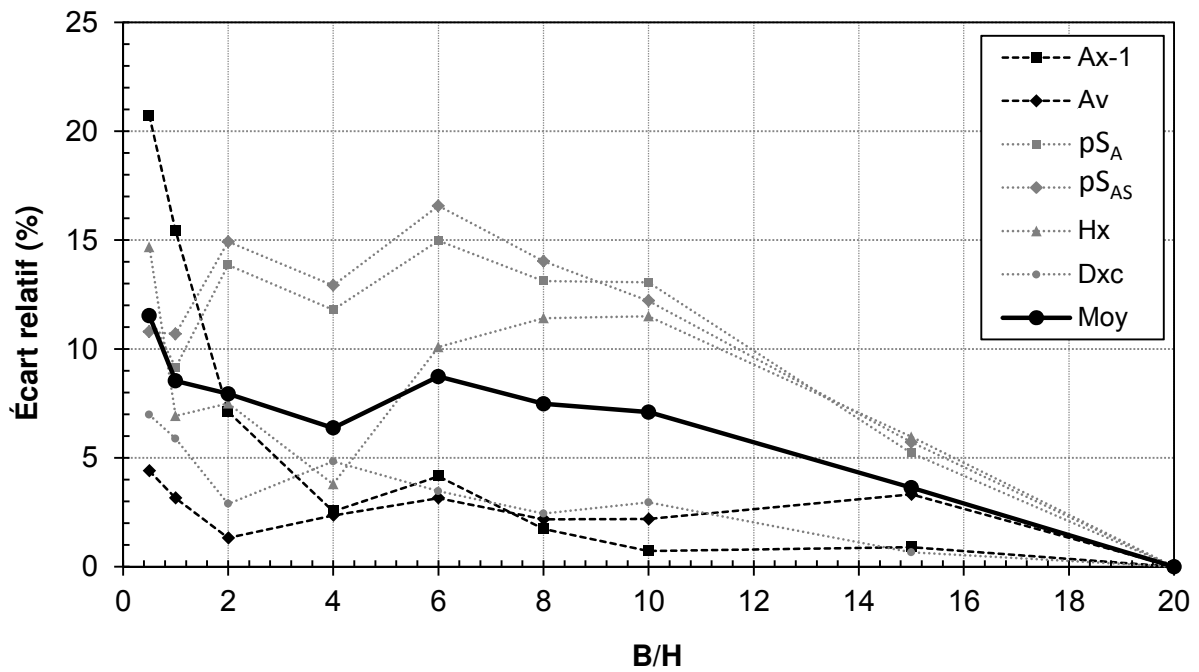


Figure 47. Écart relatif correspondant à chaque critère analysé pour les valeurs de B inférieures à $20H$ par rapport au cas de référence de $B=20H$

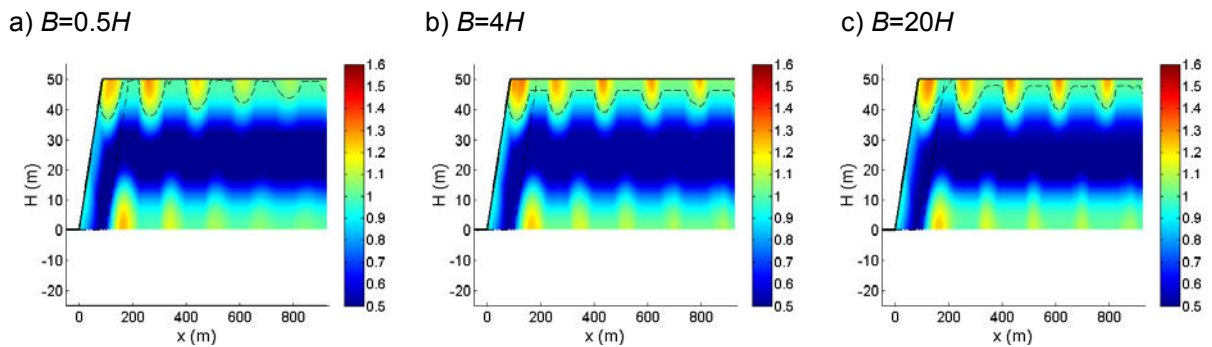


Figure 48. Réponse sismique du versant ($\alpha=30^\circ$, $H=50\text{m}$, $\eta=0.5$) en accélération horizontale normalisée (A_{xi}) pour les modèles de différentes épaisseurs B

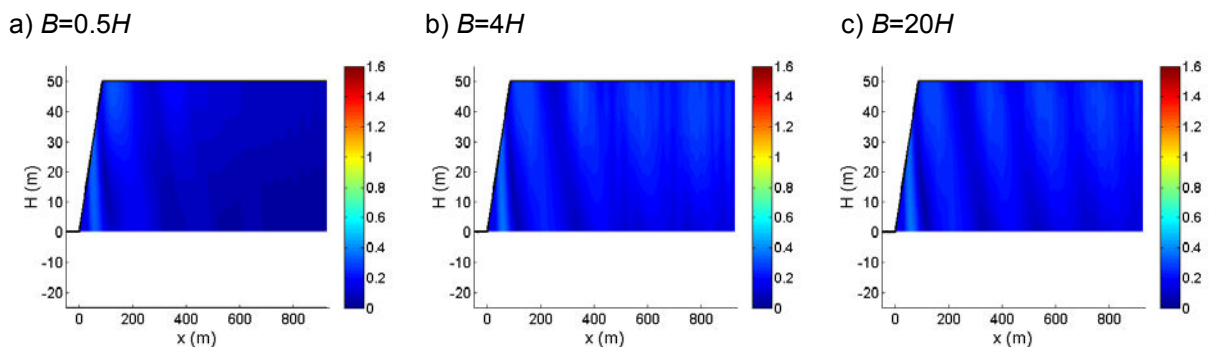


Figure 49. Réponse sismique du versant ($\alpha = 30^\circ$, $H = 50\text{ m}$, $\eta = 0.5$) en accélération verticale normalisée (A_{yi}) pour les modèles de différentes épaisseurs B

C. Conditions aux limites

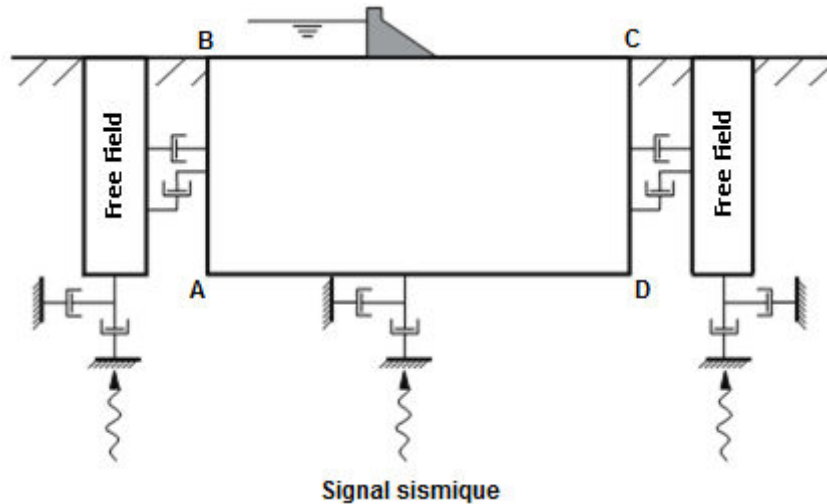


Figure 50. Modèle d'une analyse dynamique des structures en surface avec les conditions aux limites appliquées aux limites latérales et à la base du modèle (Itasca Consulting Group, 2000^[87])

En principe, lorsqu'un modèle de versant est soumis à une sollicitation dynamique, la réponse sismique aux extrémités latérales du modèle doit correspondre à la réponse sismique en champ libre. Dans certains cas, rendre fixe les éléments situés le long des limites verticales peut être suffisant. Par exemple, s'il n'y a que des ondes de cisaillement appliquées sur la base horizontale AD comme montrées dans la Figure 50, il est possible de fixer les limites latérales (AB, CD) et de les placer suffisamment loin de la zone étudiée pour minimiser les ondes réfléchies. La condition du champ libre est ainsi obtenue. Pour les sols caractérisés par un taux d'amortissement élevé, cette condition peut être atteinte pour une taille de modèle relativement faible. Par contre, pour les matériaux à taux d'amortissement faible, la taille du modèle requise devient importante, ce qui conduit à des temps de calcul élevés.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs cas de taux d'amortissement (élevé, faible ou même nul) sont envisagés. Pour cette raison, une procédure alternative est mise en œuvre : la condition aux limites *Free Field*. Dans ce cas, les limites latérales du maillage sont équipées d'amortisseurs horizontaux et verticaux (Figure 50) qui absorbent l'énergie des ondes qui atteignent les limites verticales. Ainsi, les retours dans la zone étudiée des ondes réfléchies sur les deux bords latéraux qui seraient irréalistes sont empêchés.

La base du versant est considérée comme un substratum dont la profondeur est beaucoup plus importante en comparaison de la hauteur du versant. Les retours dans la zone étudiée des ondes réfléchies sur la base artificielle du modèle ne sont alors pas réalistes. Ce phénomène peut être éliminé en utilisant un modèle de grande hauteur car l'amortissement du matériau va absorber de l'énergie des ondes réfléchies. Ces ondes ont en conséquence disparu avant de rentrer dans la zone étudiée. Cependant, cette solution demande un temps de calcul important. Alors, la procédure alternative est d'utiliser la limite absorbante *Quiet Boundary* développée par Lysmer et Kuhlemeyer, 1969^[101]. Son principe général est

d'attacher indépendamment des amortisseurs en direction normale et tangentielle à la base du modèle (Figure 50). Ces amortisseurs génèrent la contrainte normale (t_n) et de cisaillement (t_s), données respectivement par les équations [21] et [22], pour réduire les contraintes produites par des ondes sismiques. De ce fait, le mouvement sismique est considéré comme atténué.

$$t_n = -\rho \times V_p \times v_n \quad [21]$$

$$t_s = -\rho \times V_s \times v_s \quad [22]$$

- v_n, v_s : composante normale et tangentielle de la vitesse à la base
- ρ : masse volumique du matériau
- V_p, V_s : vitesse de propagation des ondes P et S

d. Taille des mailles

La taille des mailles est déterminée de manière à assurer la transmission correcte des ondes sismiques à travers le maillage. D'après la notice de FLAC, cette condition peut être garantie à condition que l'équation [23] soit satisfaite. Dans celle-ci, Δl représente la dimension maximale d'une maille élémentaire, λ est la longueur d'onde et la valeur de N doit être supérieure à 10. Il est nécessaire de noter que pour les calculs dynamiques, la taille des mailles et le pas de temps de calcul doivent être en accord. FLAC laisse les utilisateurs choisir librement la taille des mailles. Le logiciel va choisir automatiquement le pas de temps correspondant.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{N} \quad [23]$$

En général, la taille des mailles est déterminée en rapport avec la longueur d'onde qui dépend à la fois du contexte géologique du massif de versant et du contenu fréquentiel du signal sismique. De plus, le choix de la valeur de N est également important car il est lié aux erreurs dues aux calculs numériques. Des tests préliminaires, réalisés sur les modèles numériques représentant le champ libre, ont été effectués pour évaluer l'influence de ce paramètre.

Le champ libre est modélisé par une colonne de matériau homogène, isotrope et élastique. Les conditions aux limites de type *Free Field* et *Quiet Boundary* sont appliquées respectivement sur les deux côtés latéraux et à la base. L'ensemble du modèle est sollicité par un signal sismique sinusoïdal de type SV se propageant verticalement à partir de la base. L'amortissement mécanique du matériau est supposé négligeable (taux d'atténuation = 0 %). Différentes tailles de mailles sont testées en faisant varier la valeur de N . L'erreur dans le calcul numérique, due au choix de la valeur de N , peut alors être évaluée en comparant la valeur de l'accélération calculée en surface et celle déterminée par la théorie. En champ libre, quand l'onde incidente atteint la surface libre, elle donne naissance à une onde réfléchie, la superposition de ces deux ondes produit une onde de magnitude double de la magnitude de l'onde incidente. Alors, l'erreur est représentée par la différence

entre l'accélération maximale obtenue en surface libre d'un modèle et deux fois la magnitude de l'onde incidente.

La Figure 51 présente la courbe de variation de l'erreur numérique en fonction de N . Il est évident que plus N augmente (la taille des mailles diminue), plus l'erreur numérique est faible mais plus le temps de calcul est important. En prenant en compte plusieurs facteurs tels que la dimension du modèle, le temps de calcul et l'erreur numérique estimée, la valeur de N utilisée dans toutes les simulations numériques est choisie dans l'intervalle de 20 à 50, il correspond à une erreur inférieure à 5 %.

Les plus petites mailles ($N = 50$, erreur ≈ 2 %) sont utilisées spécifiquement dans les simulations pour analyser les effets secondaires des paramètres intégrés dans la fréquence adimensionnelle (partie 2.2.3) car ces analyses demandent une précision élevée pour pouvoir détecter les moindres différences dans les résultats obtenus qui sont généralement très proches. Pour les autres calculs, une erreur numérique de 5% est acceptable, la taille des mailles est alors calculée avec $N = 20$.

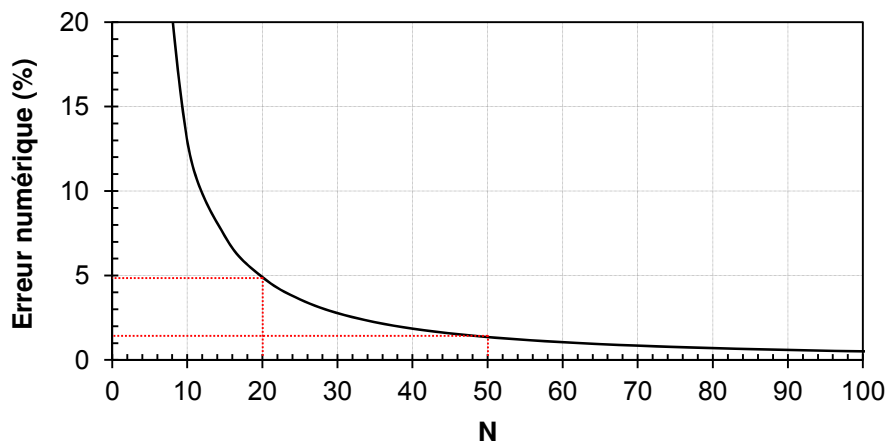


Figure 51. Variation de l'erreur numérique en fonction de la variation de la valeur de N

2.1.3.4. Sollicitation sismique

Les ondes sismiques planes de type SV sont appliquées à la base du modèle et se propagent verticalement vers le haut du versant. En raison de la présence de la limite absorbante *Quiet Boundary*, un mouvement sismique en accélération ou en vitesse ne peut pas être appliqué car ces types de sollicitations annulent l'effet de *Quiet Boundary* (d'après la notice de FLAC). Dans ce cas, le mouvement sismique en vitesse (ou en accélération) doit être converti en une onde de contraintes à l'aide des équations [24] et [25]. Le facteur 2 dans l'équation [24] tient compte du fait que la contrainte appliquée doit être double de celle que l'on veut, car la moitié de l'énergie est absorbée lors du premier passage des ondes sismiques à travers la base du modèle (équation [22]). L'autre moitié est absorbée lors du deuxième passage quand les ondes reviennent de la surface supérieure.

$$\sigma_s = 2(\rho V_s) v_s \quad [24]$$

$$V_s = \sqrt{G / \rho} \quad [25]$$

- σ_s : contrainte de cisaillement appliquée à la base du modèle
 ρ : masse volumique du matériau
 V_s : vitesse de propagation des ondes de cisaillement à travers le matériau
 v_s : mouvement sismique en vitesse à la base du modèle
 G : module de cisaillement du matériau

Le signal sismique utilisé peut être mono-fréquentiel (signal sinusoïdal) ou multifréquentiel (signal enregistré lors d'un séisme réel). Le 1^{er} type de signal est utilisé pour les études paramétriques car son contenu fréquentiel est simple et facile à contrôler. Les résultats mis en évidence dans ces études sont ensuite vérifiées avec les cas des signaux sismiques réels.

Le signal sismique sinusoïdal en accélération est déterminé par l'équation [26]. Comme l'application de la charge sismique en accélération à la base du modèle n'est pas compatible avec la présence de la condition *Quiet Boundary*, le signal doit être converti de l'accélération en vitesse par l'équation [27], et finalement en contrainte à l'aide de l'équation [24].

$$a(t) = a_{\max} \sin(2\pi Ft) \quad [26]$$

$$v(t) = \frac{a_{\max}}{2\pi F [1 - \cos(2\pi Ft)]} \quad [27]$$

- a_{\max} : amplitude du signal
 F : fréquence du signal
 $a(t)$: sollicitation sismique en accélération
 $v(t)$: sollicitation sismique en vitesse

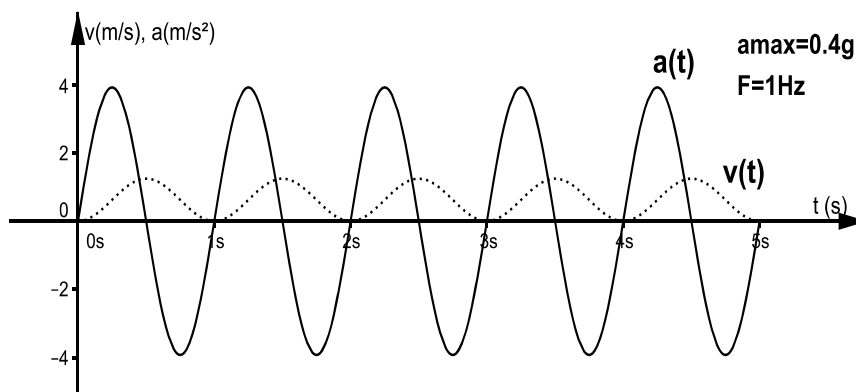


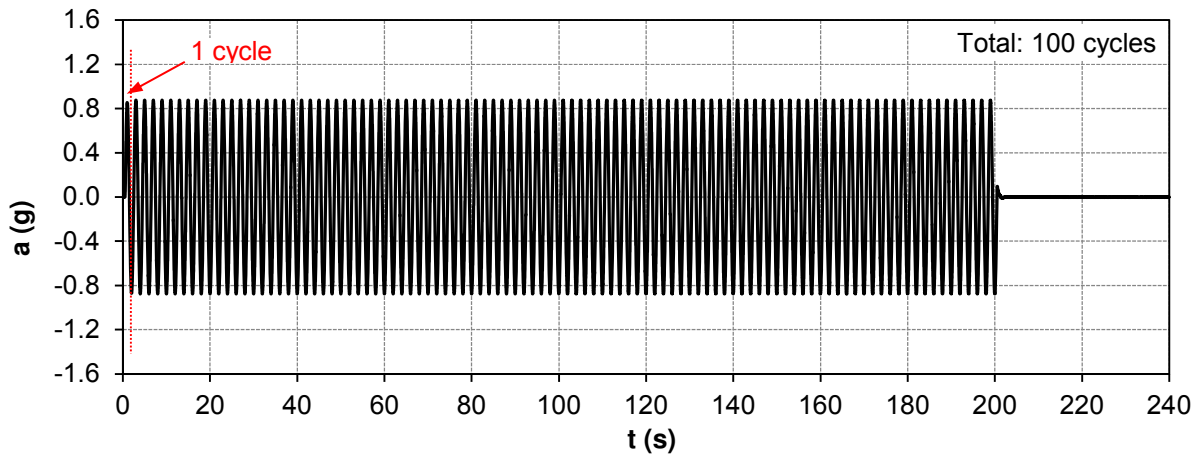
Figure 52. Exemple d'un signal sismique sinusoïdal en accélération et en vitesse utilisé dans les études paramétriques ($a_{\max}=0.4g$, $F=1\text{Hz}$)

Un signal sinusoïdal est défini principalement par trois paramètres: l'amplitude a_{max} , la fréquence F et la durée t_s .

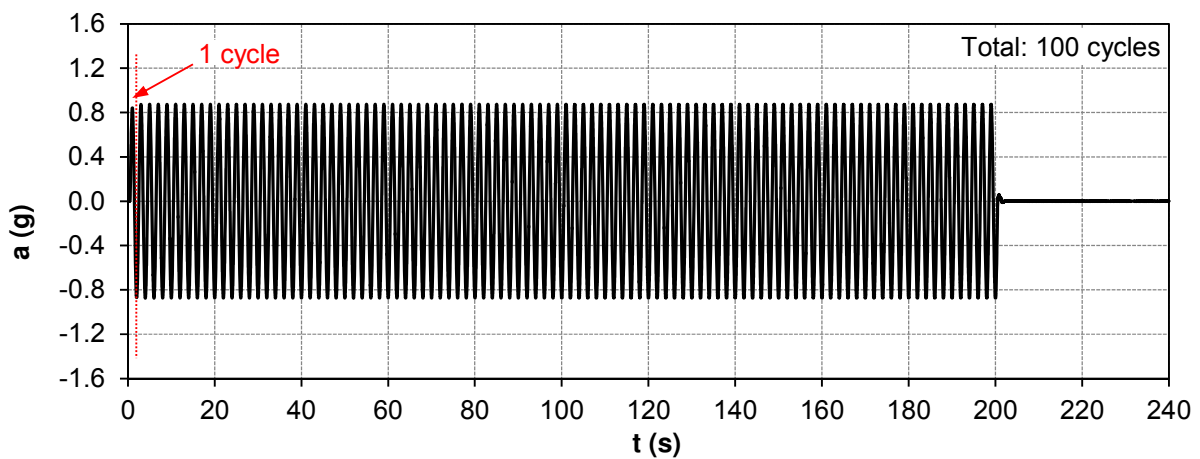
- Dans le cadre de cette étude, le choix de l'amplitude du signal d'excitation n'influence pas les critères d'interprétation, car on n'évalue pas la réponse sismique du versant en valeur absolue mais en normalisation avec la réponse du site de référence. Donc, une valeur de a_{max} modérée (0.4 g) a été choisie pour tous les calculs.
- La fréquence du signal est variable dans l'intervalle de 0.5 à 10 Hz. C'est la bande large des fréquences prédominantes généralement observées pour les signaux de séismes réels. La Figure 52 montre un exemple du signal sinusoïdal avec une fréquence égale à 1 Hz.
- Concernant la durée d'application du signal sismique, cette valeur doit être suffisante pour que la réponse sismique du versant atteigne un état stable. Cependant, elle ne doit pas être trop élevée de manière à limiter le temps de calcul. Un test a été réalisé pour un modèle de versant, avec $H = 50$ m, $B = 4 H$, $\alpha = 50^\circ$ et $V_s = 500$ m/s. Ce versant est sollicité par les signaux sismiques sinusoïdaux de 0.5 Hz, 5 Hz et 10 Hz pendant une durée correspondant à 100 cycles. Les points de mesure se situent en surface et à une distance D de 0 H (la crête), H , 2 H , 4 H , 6 H , 8 H , 10 H et 12 H derrière la crête. En analysant ces enregistrements, on trouve que :
 - Pour le signal de fréquence faible ($F = 0.5$ Hz), la réponse sismique du versant atteint un état stable très rapidement, juste après un ou deux cycles d'oscillation (Figure 53).
 - Pour le signal de fréquence modérée ($F = 5$ Hz), le nombre de cycles nécessaire pour que la réponse sismique du versant atteigne un état stable est plus élevé, il est dans la limite de 30 cycles (Figure 54).
 - Pour le signal de fréquence élevée ($F = 10$ Hz), le mouvement sismique en surface du versant ne se stabilise qu'au bout de 20 à 40 cycles (Figure 55).

Sur la base de ces résultats, le nombre de cycles d'excitation ainsi que la durée d'application du signal sismique (t_s) ont été choisis et présentés dans le Tableau 6. Après l'arrêt de la sollicitation à la base du modèle, le calcul dynamique se poursuit pendant un certain temps pour assurer que les dernières ondes peuvent atteindre la surface libre (la pente ou la surface en amont). Pour les ondes qui se propagent vers la surface en amont, une durée de temps correspondant à un trajet égal à la hauteur du modèle ($H+B = 250$ m) est suffisante. Pour les ondes qui se propagent vers la pente, quelques-unes peuvent se diriger vers la surface en amont après la réflexion sur la pente. La durée totale nécessaire pour que ces ondes atteignent la surface en amont est en conséquence plus longue. Pour une vitesse de propagation de 500 m/s, ce temps est d'environ 2s (pour un trajet de 20 H ou 1000m). On a choisi alors une durée de calcul supplémentaire de 2s après l'arrêt de sollicitation. Ainsi, la durée totale du calcul dynamique (t_c) est : $t_c = t_s + 2$ (s).

a) $D=0H$ (la crête)



b) $D=6H$



c) $D=12H$

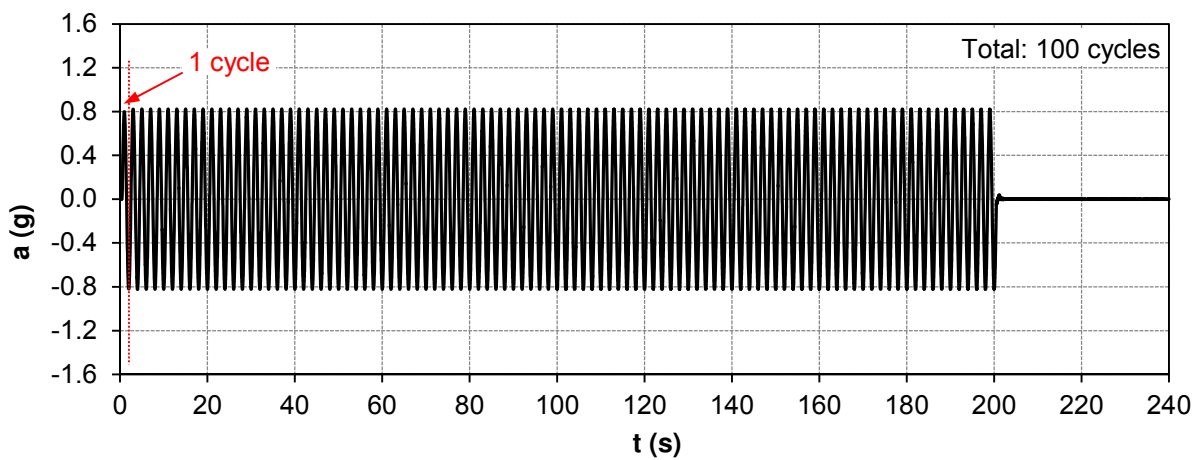
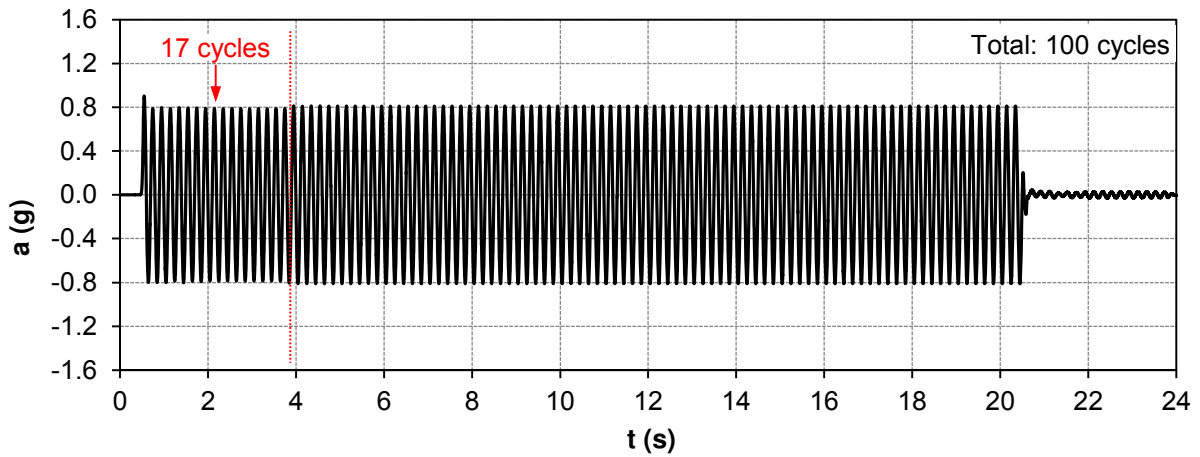
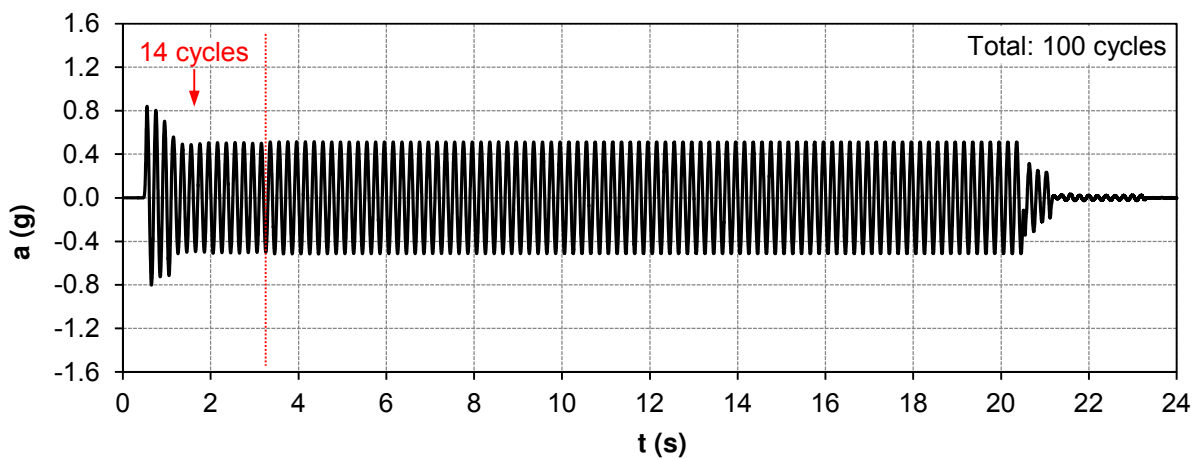


Figure 53. Accélérogrammes enregistrés aux points de mesure en surface supérieure du versant pour une sollicitation sinusoïdale de fréquence $F=0.5\text{Hz}$

a) $D=0H$ (la crête)



b) $D=6H$



c) $D=12H$

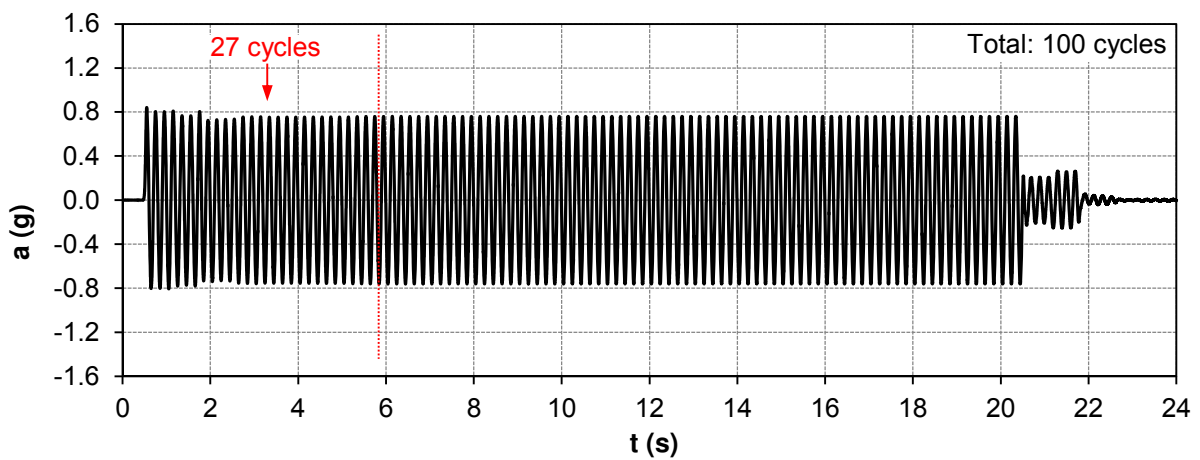
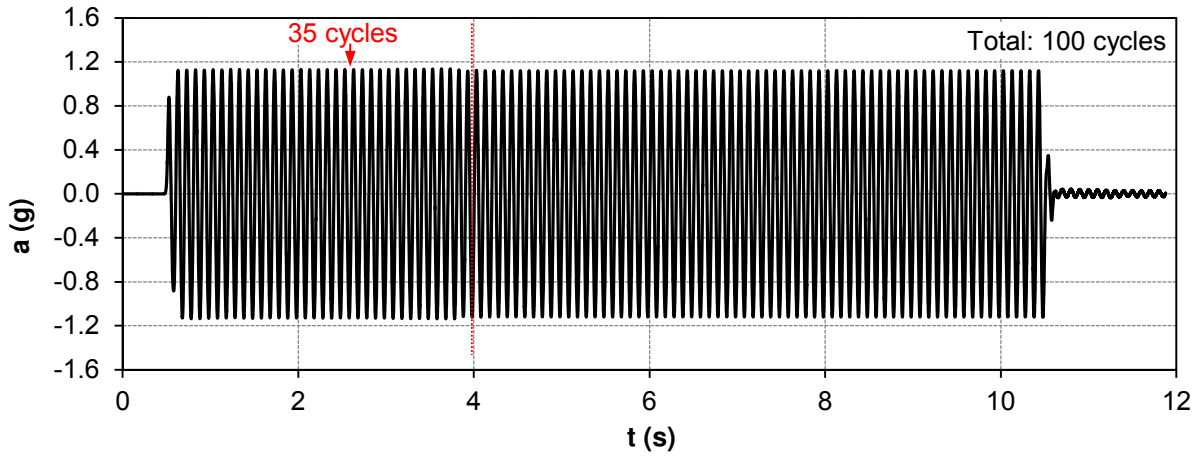
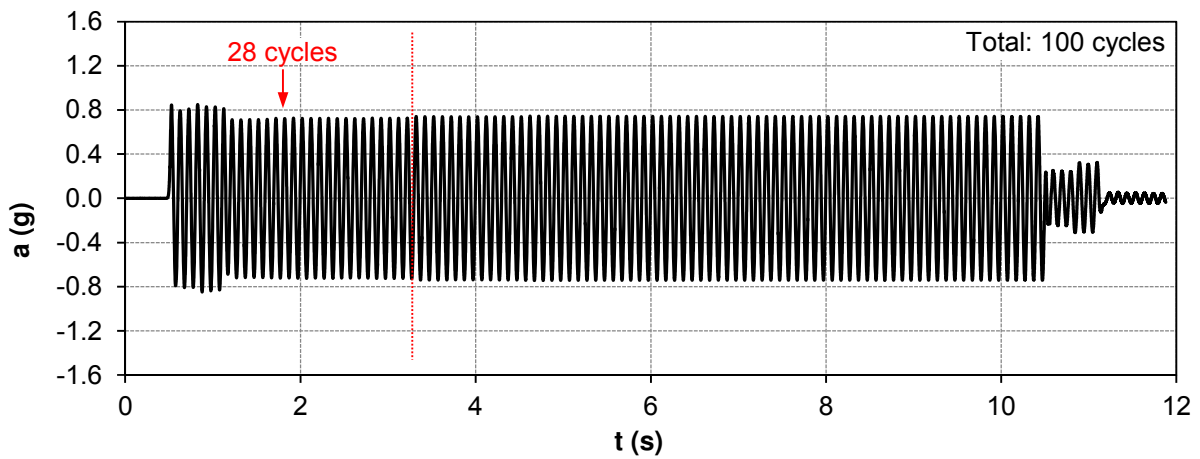


Figure 54. Accélérogrammes enregistrés aux points de mesure en surface supérieure du versant pour une sollicitation sinusoïdale de fréquence $F=5\text{Hz}$

a) $D=0H$ (la crête)



b) $D=6H$



c) $D=12H$

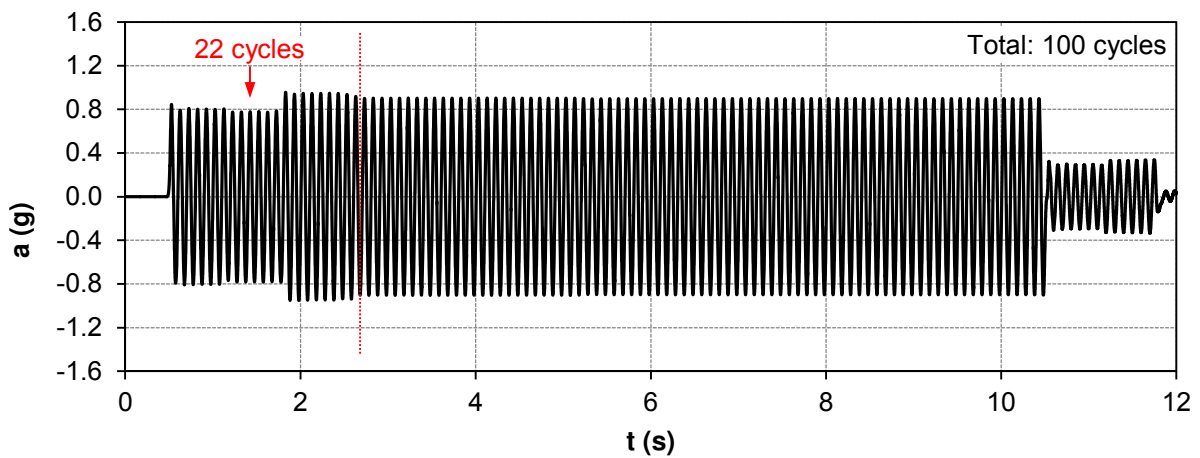


Figure 55. Accélérogrammes enregistrés aux points de mesure en surface supérieure du versant pour une sollicitation sinusoïdale de fréquence $F=10\text{Hz}$

Tableau 6. Nombre de cycle, durée d'application de la sollicitation sismique et durée de calcul dynamique pour différentes valeurs de fréquence du signal sismique

F(Hz)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cycles	10	10	20	20	20	30	30	30	40	40	40
t_s (s)	20	10	10	6.67	5	6	5	4.28	5	4.44	4
t_c (s)	22	12	12	8.67	7	8	7	6.28	7	6.44	6

2.1.3.5. Amortissement du mouvement sismique

Pour l'étude de la propagation des ondes et l'évaluation des effets de site, le matériau du modèle est considéré comme élastique. En conséquence, l'énergie de l'onde sismique n'est pas dissipée, même après une longue distance de propagation tant qu'elle n'est pas absorbée par les limites absorbantes aux frontières du modèle. Dans la réalité, le mouvement sismique est atténué en fonction des caractéristiques du matériau et de la distance de propagation. Cette atténuation est à l'origine de la perte d'énergie principalement due aux frottements internes dans le matériau. Alors, pour s'approcher de la réalité, un coefficient d'amortissement doit être ajouté dans le modèle pour simuler l'atténuation spatiale du mouvement sismique. Ainsi, le comportement du matériau est considéré, dans ce cas, comme viscoélastique.

L'amortissement de Rayleigh, un type d'amortissement mécanique intégré dans FLAC, est recommandé pour les analyses dynamiques. Ce procédé a été initialement utilisé pour des analyses de structures et pour un milieu élastique continu afin d'amortir les modes d'oscillation naturelle du système. La matrice d'amortissement C est déterminée en fonction de la matrice de la masse M et de la matrice de la rigidité K .

$$C = \alpha M + \beta K \quad [28]$$

α : constante d'amortissement proportionnelle à la masse

β : constante d'amortissement proportionnelle à la rigidité

Pour un système à plusieurs degrés de liberté, le taux d'amortissement critique (ξ_i) appliqué à une fréquence F_i quelconque du système peut être déterminé par l'équation [29] qui a été établie en se basant sur les travaux de Bathe et Wilson, 1976^[19] et présentée dans la notice de FLAC. Les constantes d'amortissement α et β proportionnelles respectivement à la masse et à la rigidité sont déterminées à partir des équations [30] et [31]. Ces constantes sont déterminées en fonction de la fréquence centrale (F_c) ou la fréquence prédominante du signal appliqué et le taux d'amortissement prévu pour cette fréquence (ξ_{min}).

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{2\pi F_i} + \beta 2\pi F_i \right) \quad [29]$$

$$\alpha = \xi_{\min} 2\pi F_c \quad [30]$$

$$\beta = \xi_{\min} / (2\pi F_c) \quad [31]$$

- F_c : fréquence centrale du signal sismique appliqué
 ξ_{\min} : coefficient d'amortissement correspondant à la fréquence F_c
 ξ_i : coefficient d'amortissement appliqué à une fréquence F_i quelconque différente de F_c

L'amortissement de Rayleigh est dépendant de la fréquence car il incorpore deux éléments visqueux (dans lesquels l'énergie absorbée dépend de la fréquence). Or, l'amortissement dans les roches et les sols est indépendant de la fréquence (amortissement hystérétique). Pour approcher la réalité, les effets dépendant de la fréquence dans l'amortissement de Rayleigh sont dimensionnés de manière à s'annuler aux fréquences intéressées. Par cette méthode, l'amortissement de Rayleigh est approximativement indépendant de la fréquence sur une bande de fréquence souhaitée.

À titre d'exemple, la Figure 56 présente la variation du coefficient d'amortissement (courbe *total*) en fonction de la fréquence, avec un taux d'amortissement de 5% choisi pour une fréquence prédominante de 3 Hz. D'après la notice de FLAC, ce coefficient d'amortissement doit être constant dans l'intervalle de $(0.5 \div 1.5) F_c$. En effet, dans l'intervalle de 1.5 Hz à 4.5 Hz de cet exemple, ce taux est toujours proche de 5%. Hors de cette limite, il augmente considérablement.

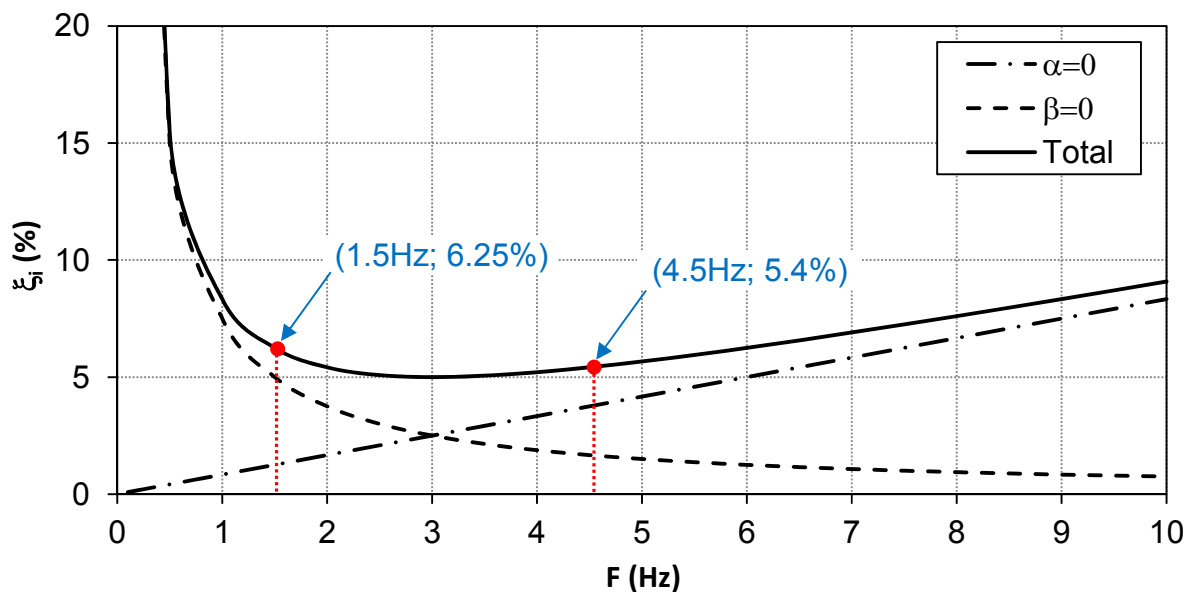


Figure 56. Variation du coefficient d'amortissement en fonction de la fréquence

2.2. Études paramétriques

2.2.1. Étude du rôle de la fréquence adimensionnelle

2.2.1.1. Problématique

La fréquence adimensionnelle (η), représentée par le rapport de la hauteur du versant (H) à la longueur d'onde (λ), est considérée dans plusieurs travaux de recherche, dont quelques-uns sont présentés dans 1.3.3, comme un paramètre important pour caractériser le phénomène des effets de site. Cependant, la plupart de ces études ne s'intéresse qu'aux valeurs de η inférieures à 1.0 (intervalle des valeurs souvent rencontrées en pratique). Pourtant, il existe parfois des cas où η est plus élevée, par exemple : un versant de faibles caractéristiques mécaniques (V_s faible) ou un versant de grande hauteur (H élevée) sollicité par un signal sismique de haute fréquence (F élevée). Dans ce cas, les résultats obtenus peuvent-ils être encore applicables ? De plus, ce paramètre peut-il être également utilisé comme un indice pour prévoir le développement d'une instabilité ?

2.2.1.2. Analyse paramétrique

Des simulations numériques ont été réalisées pour des modèles de versant de même hauteur ($H = 50$ m) et de même condition géologique ($V_s = 500$ m/s, $\rho = 2000$ kg/m³, $\nu = 0.25$, $E = 1.25$ GPa). La fréquence du signal sismique incident est modifiée de telle sorte que la fréquence adimensionnelle varie entre 0.05 et 3.0. Plus précisément, pour les versants de faible pente (20° et 25°) la valeur de η est modifiée 12 fois (0.05 ; 0.1 ; 0.2 ; 0.3 ; ... ; 0.9 ; 1.0 ; 1.5). Pour les autres versants, on ajoute deux valeurs de η plus élevées : 2.0 et 3.0. Le Tableau 7 présente le nombre de simulations correspondant à chaque valeur de la pente. Il y a au total 122 simulations à réaliser.

Tableau 7. Nombre des simulations correspondant à chaque angle de la pente considéré

Pente (°)	20	25	30	40	50	60	70	80	90
Nombre de simulations	12	12	14	14	14	14	14	14	14

Les résultats sont ensuite analysés et présentés en graphique pour évaluer l'impact de la fréquence adimensionnelle sur la variation des critères d'analyse. Pour les cas particuliers où l'impact de la fréquence adimensionnelle n'est pas constant mais influencé par la pente, les analyses doivent être réalisées en prenant en compte à la fois l'effet de la fréquence adimensionnelle et l'effet de la pente.

a. Facteurs d'amplification (A_x , A_y)

Les résultats des simulations numériques montrent que les facteurs d'amplification (A_x , A_y) ont tendance à augmenter avec la fréquence adimensionnelle (Figure 57). Cependant, cet effet n'est pas le même sur tout l'intervalle de η considéré. À partir d'une certaine valeur de η , les valeurs des critères d'analyse varient peu et commencent à se stabiliser, l'impact de η est par conséquent moins important. À titre d'exemple, le graphique de la Figure 58 présentent les courbes d'évolution de A_x en fonction de η pour les versants de pente égale à 20° ; 50° et 70° . On observe que la valeur de η à partir de laquelle les critères évoluent peu n'est pas constante mais varie en fonction de la pente, par exemple : $\eta_{seuil} \approx 0.4$ pour $\alpha = 20^\circ$, $\eta_{seuil} \approx 1.4$ pour $\alpha = 50^\circ$ et $\eta_{seuil} \approx 1.2$ pour $\alpha = 70^\circ$. Par contre, pour le facteur A_y , les analyses des résultats obtenus montrent que ce seuil est quasiment invariable. Comme le montre le graphique de la Figure 59, cette valeur limite est toujours autour de 1.0.

La Figure 60 montre l'évolution des valeurs de A_x sur l'intervalle de la fréquence adimensionnelle $\eta \leq 1.0$ qui sont des valeurs souvent rencontrées dans la réalité. On observe une forte augmentation de A_x pour les valeurs de η entre 0.1 et 0.3. Le pic le plus remarqué est obtenu pour $\eta = 0.2$. De plus, ce phénomène est d'autant plus important que la pente du versant est raide. Le même phénomène a été observé par Ashford et al., 1997^[9]. Ils ont expliqué ce phénomène par l'effet de résonance. Cet effet s'est produit quand la fréquence dominante du signal sismique (F) est proche de la fréquence caractérisant la morphologie du versant (F_t), qui peut être déterminée de façon simple par $V_s/5H$ (Ashford et al., 1997^[9]). Quand ces deux fréquences sont confondues, la valeur de $\eta (=HF_t/V_s)$ est égale à 0.2, c'est la valeur où l'on obtient le pic d'augmentation de A_x . Il faut noter que le phénomène de résonance est observé uniquement sur le facteur d'amplification horizontale A_x et non sur la composante verticale A_y .

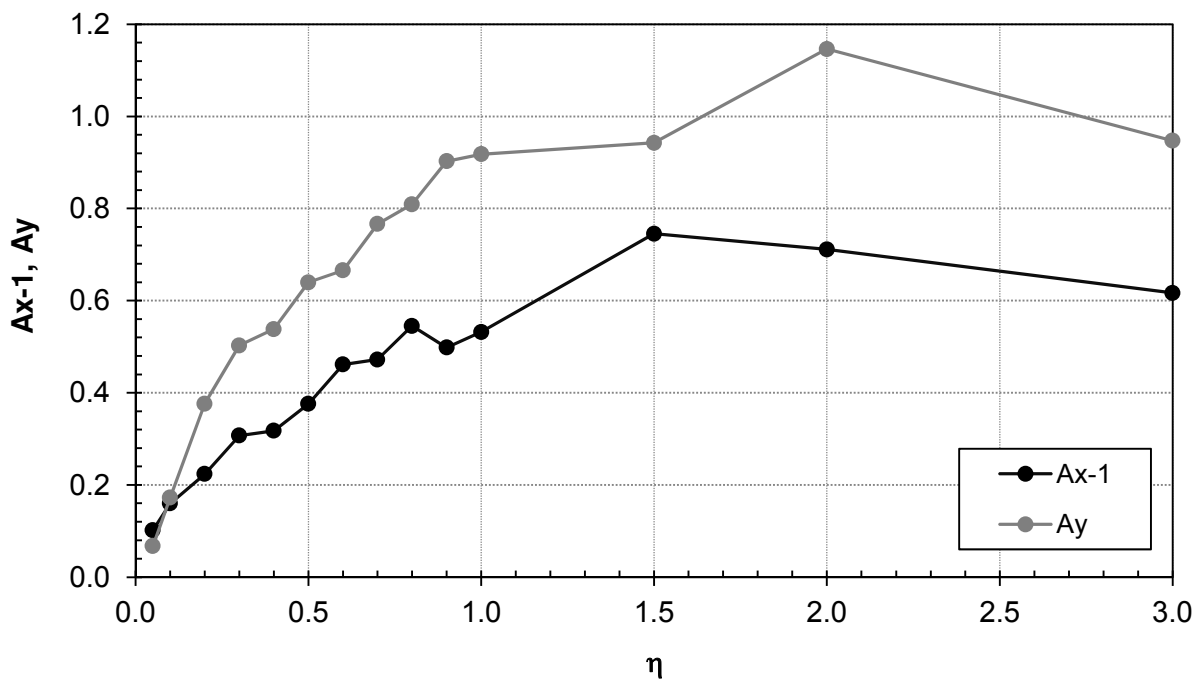


Figure 57. Évolution des facteurs d'amplification en fonction de la fréquence adimensionnelle pour un versant de pente $\alpha=50^\circ$

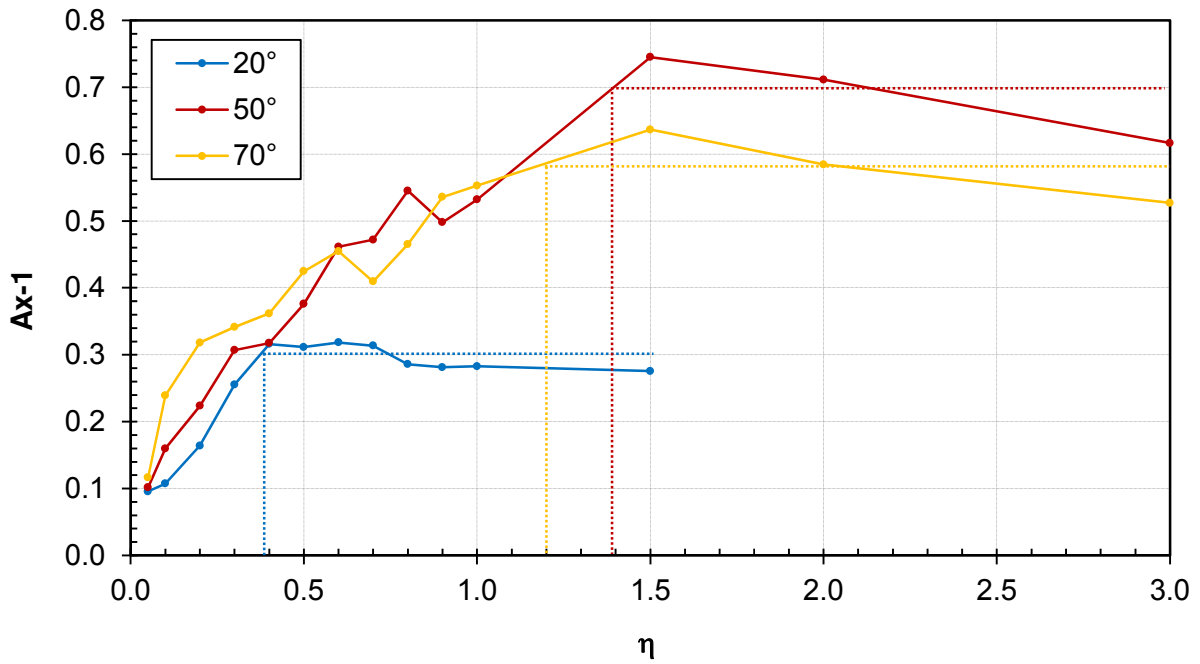


Figure 58. Courbes de A_{x-1} des versants de différentes pentes ($\alpha=20^\circ$; 50° ; 70°) et seuils de stabilité correspondants

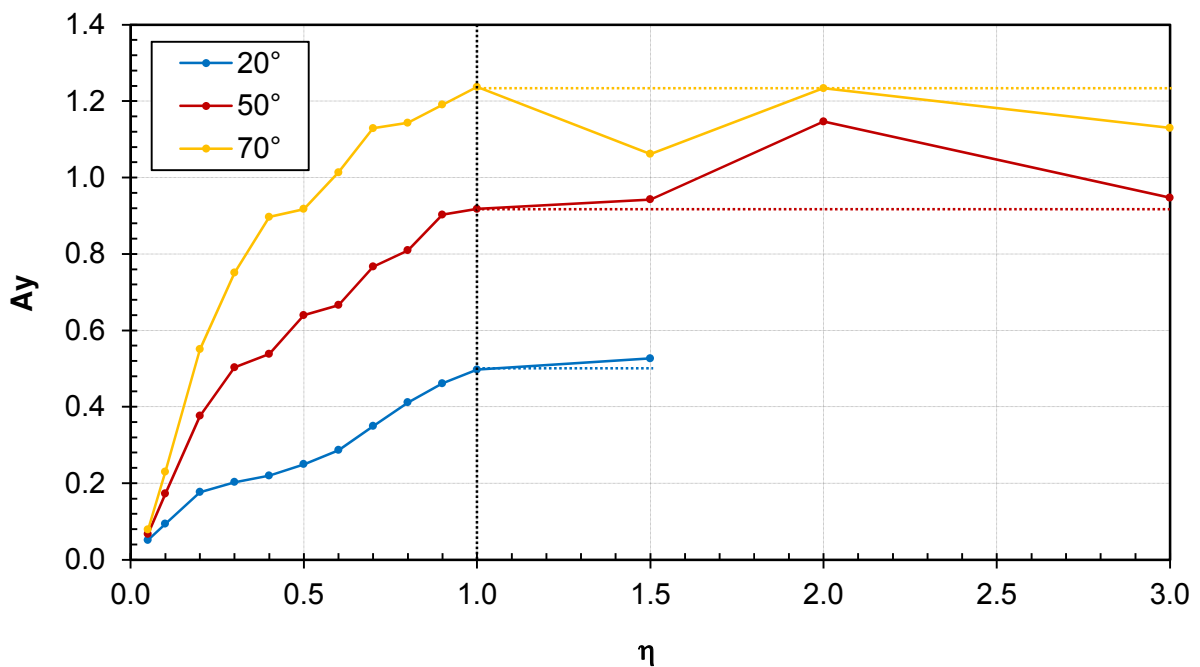


Figure 59. Courbes de A_y des versants de différentes pentes ($\alpha=20^\circ$; 50° ; 70°) et seuils de stabilité correspondants

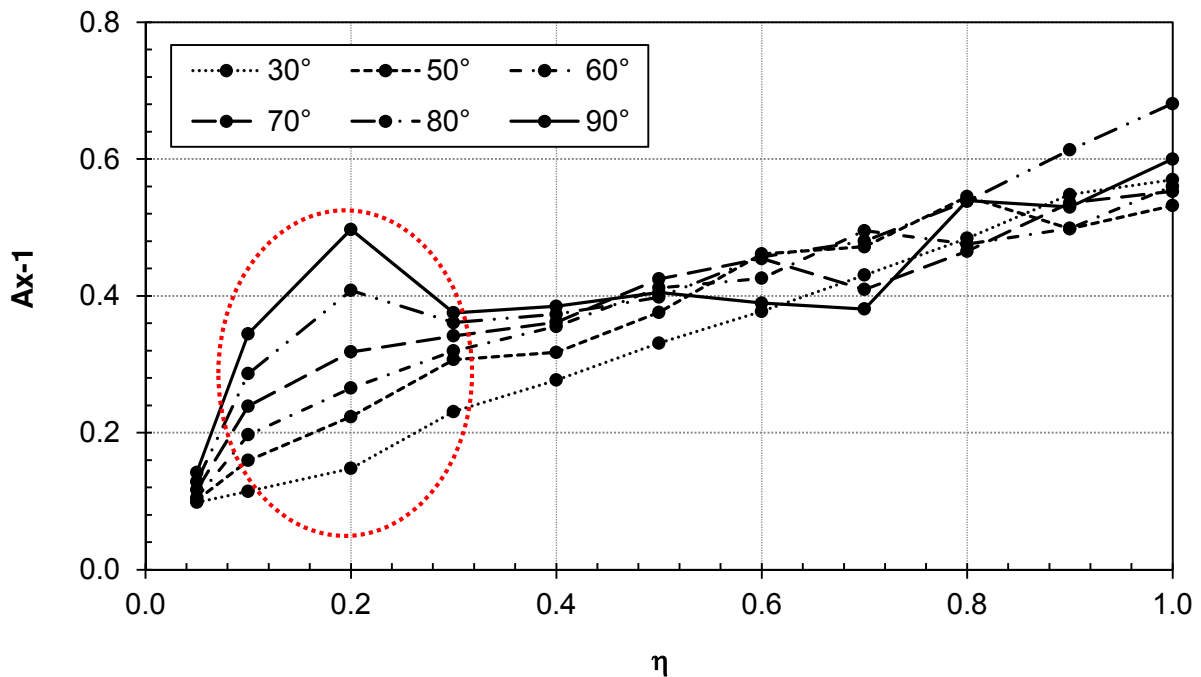


Figure 60. Phénomène de résonance observé pour les valeurs de fréquence adimensionnelle proches de 0.2 ($0.1 \leq \eta \leq 0.3$)

b. Aire des zones affectées par les amplifications

Concernant l'amplification de l'accélération horizontale, l'aire des zones affectées montre une tendance globale à diminuer quand la fréquence adimensionnelle augmente. Le graphique de la Figure 61 présente l'exemple d'un versant avec une pente de 50°. On voit bien que plus η augmente plus les rapports pS_A , pS_{AS} diminuent. Cependant, ce phénomène est prononcé seulement quand η est inférieure à 1.0. Si η dépasse cette limite, ce critère varie très peu ou reste constant et l'effet de la fréquence adimensionnelle devient par conséquent négligeable.

Une autre observation est que les courbes pS_A et pS_{AS} sont confondues pour les faibles valeurs de η . La limite de cet intervalle est égale à 0.5 pour un versant de pente 50° (Figure 61). Quand la valeur de η dépasse cette limite, les deux courbes commencent à se séparer. Ceci signifie que, quand η est inférieure à 0.5, toutes les zones où l'accélération horizontale est amplifiée sont en contact avec les surfaces libres ($S_A = S_{AS}$). Pour les autres cas ($\eta > 0.5$), l'apparition de zones d'amplification en profondeur induit une différence entre pS_A et pS_{AS} . Une analyse réalisée sur l'ensemble des résultats obtenus montre que cette limite peut varier entre 0.4 et 0.6 en fonction de la pente, mais reste toujours autour de 0.5.

La Figure 62 présente un exemple de la variation des zones d'amplification au sein du versant en faisant varier la fréquence adimensionnelle. La pente du versant dans cet exemple est de 50°. Dans la figure, on voit bien que quand η est inférieure à 0.5 (graphiques a, b et c), toutes les zones d'amplification sont en contact avec la surface supérieure ($pS_A = pS_{AS}$). Pour une valeur de η plus grande ($\eta = 0.6$), comme présenté dans la Figure 62d,

des zones d'amplification apparaissent aussi en profondeur dans le massif du versant ($pS_A \neq pS_{AS}$).

Ces illustrations graphiques conduisent encore à faire une remarque concernant le nombre des zones d'amplification en accélération horizontale dans le massif du versant. Cette observation a été vérifiée plusieurs fois avec des versants de pentes différentes. Pour tous les cas, on trouve que, pour une valeur de η inférieure à 0.15, il n'y a qu'une seule zone d'amplification dans tout le massif et elle se situe au voisinage de la crête de la pente (Figure 62a). Au contraire, si η est supérieure à 0.15, des zones d'amplification supplémentaires apparaissent en arrière de la crête, le long de la surface horizontale en arrière de la crête (Figure 62b, c et d).

Concernant la distribution spatiale de l'amplification verticale, les zones les plus affectées sont situées toujours le long de la pente. De plus, plus la fréquence adimensionnelle augmente plus les amplifications ont tendance à se concentrer vers la surface en amont. Le phénomène est plus prononcé pour les cas où la valeur de η est supérieure à 0.5.

À titre d'exemple, les figures ci-dessous présentent la distribution spatiale des accélérations verticales normalisées (A_{y_i}) dans tout le massif de versant (Figure 63 pour $\alpha = 50^\circ$, Figure 64 pour $\alpha = 70^\circ$, Figure 65 pour $\alpha = 90^\circ$). On observe que le phénomène de concentration des fortes amplifications la surface supérieure commence à apparaître quand η est égale ou supérieure à 0.5 (graphiques b, c et d de chaque figure) pour toutes les pentes. Au contraire, quand η est plus faible ($\eta = 0.3$), les amplifications se répartissent régulièrement dans le massif. Il faut noter que pour tous les cas, il existe toujours une concentration des fortes amplifications le long de la pente.

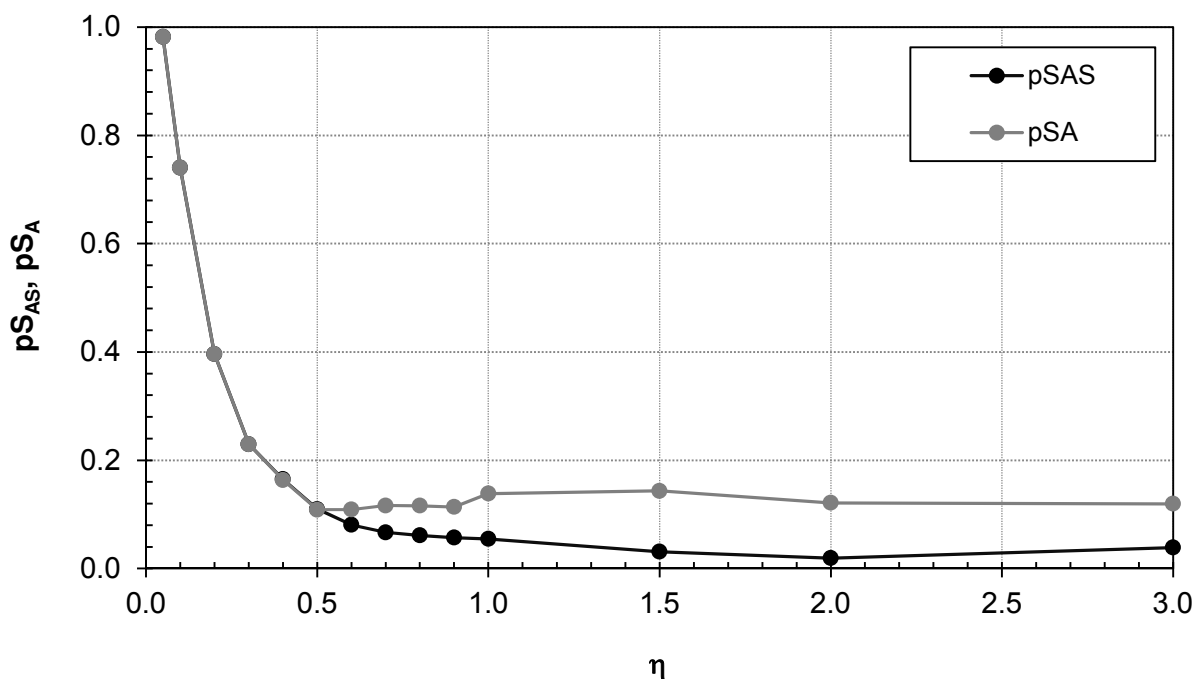


Figure 61. Évolution de la valeur des critères caractérisant l'aire des zones d'amplification en fonction de la fréquence adimensionnelle pour le cas du versant de pente $\alpha = 50^\circ$

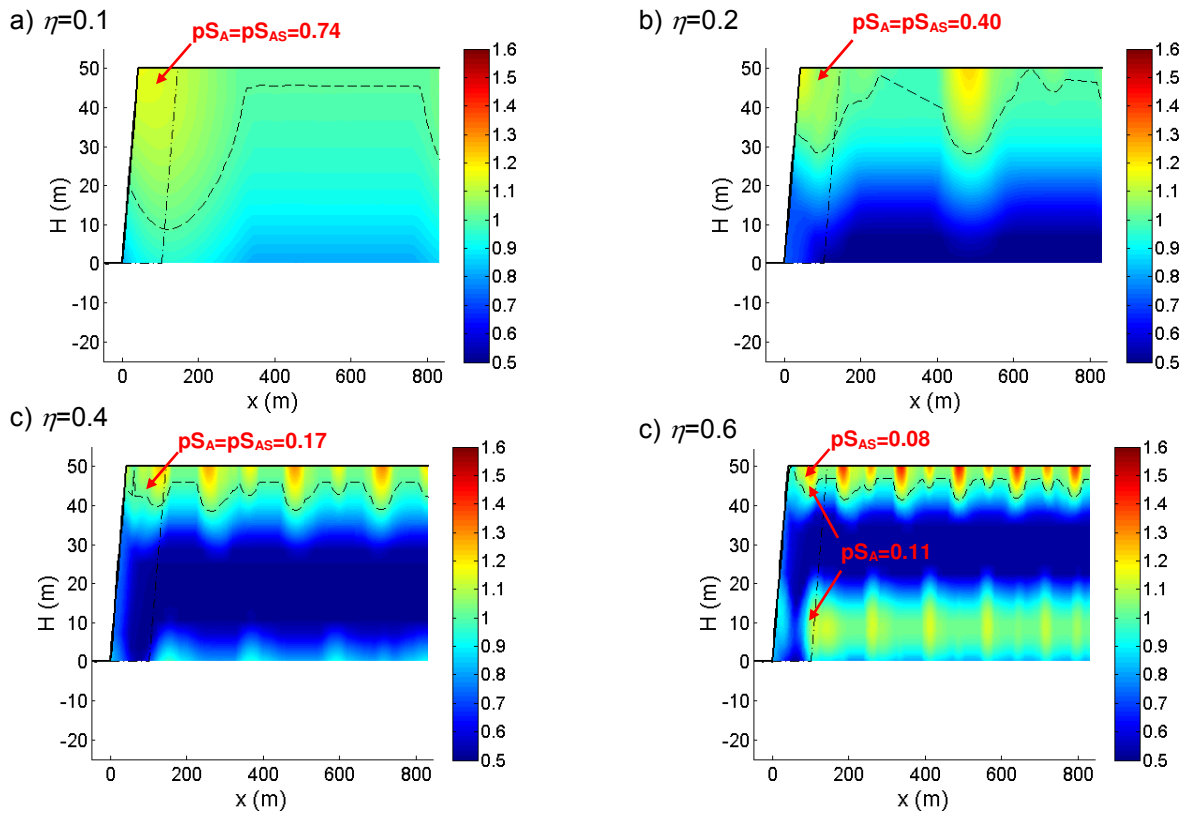


Figure 62. Amplification horizontale dans les versants de même pente ($\alpha = 50^\circ$) et pour différentes valeurs de la fréquence adimensionnelle (η)

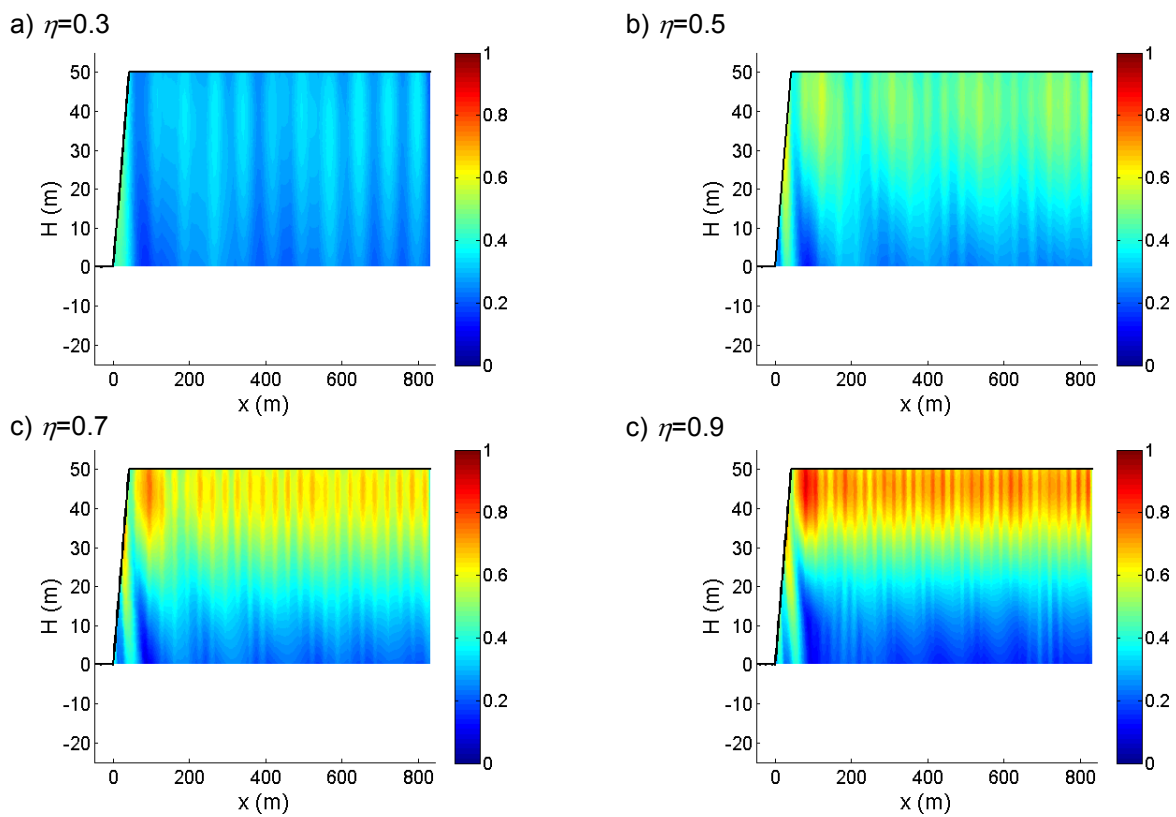


Figure 63. Amplification verticale dans les versants de même pente ($\alpha = 50^\circ$) et pour différentes valeurs de la fréquence adimensionnelle (η)

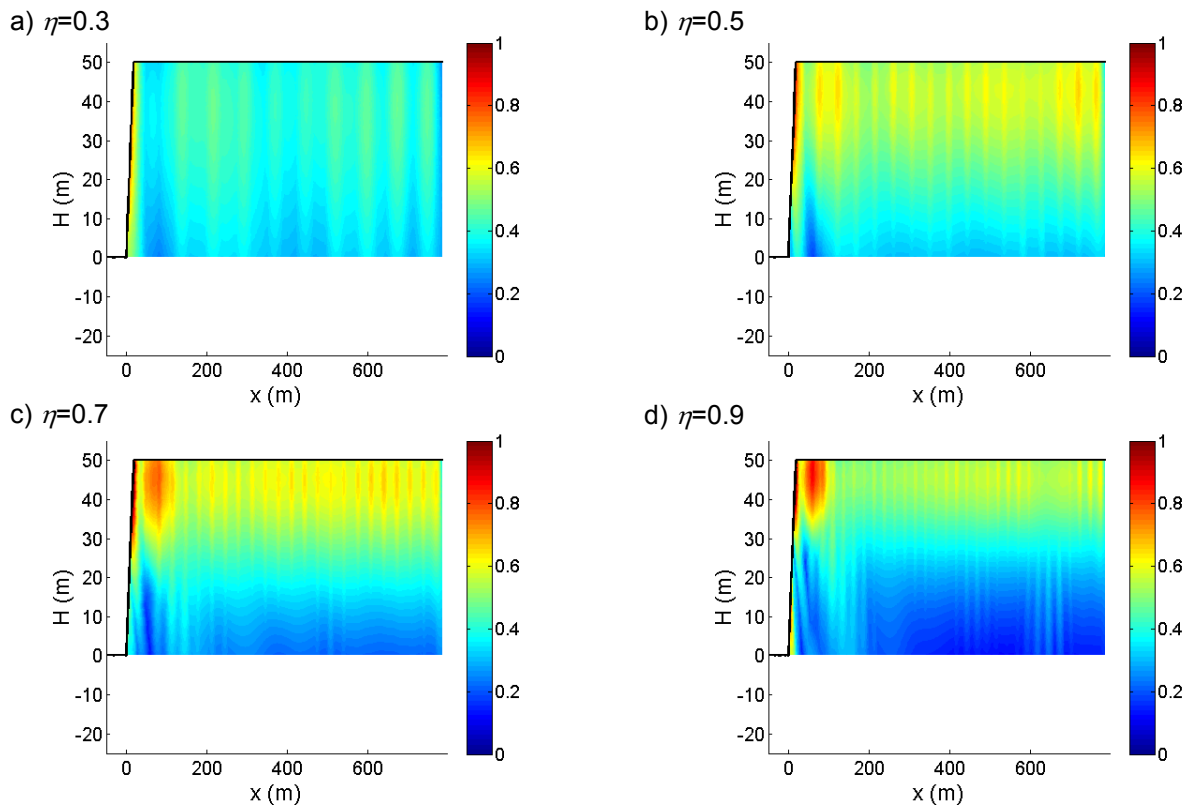


Figure 64. Amplification verticale dans les versants de même pente ($\alpha = 70^\circ$) et pour différentes valeurs de la fréquence adimensionnelle (η)

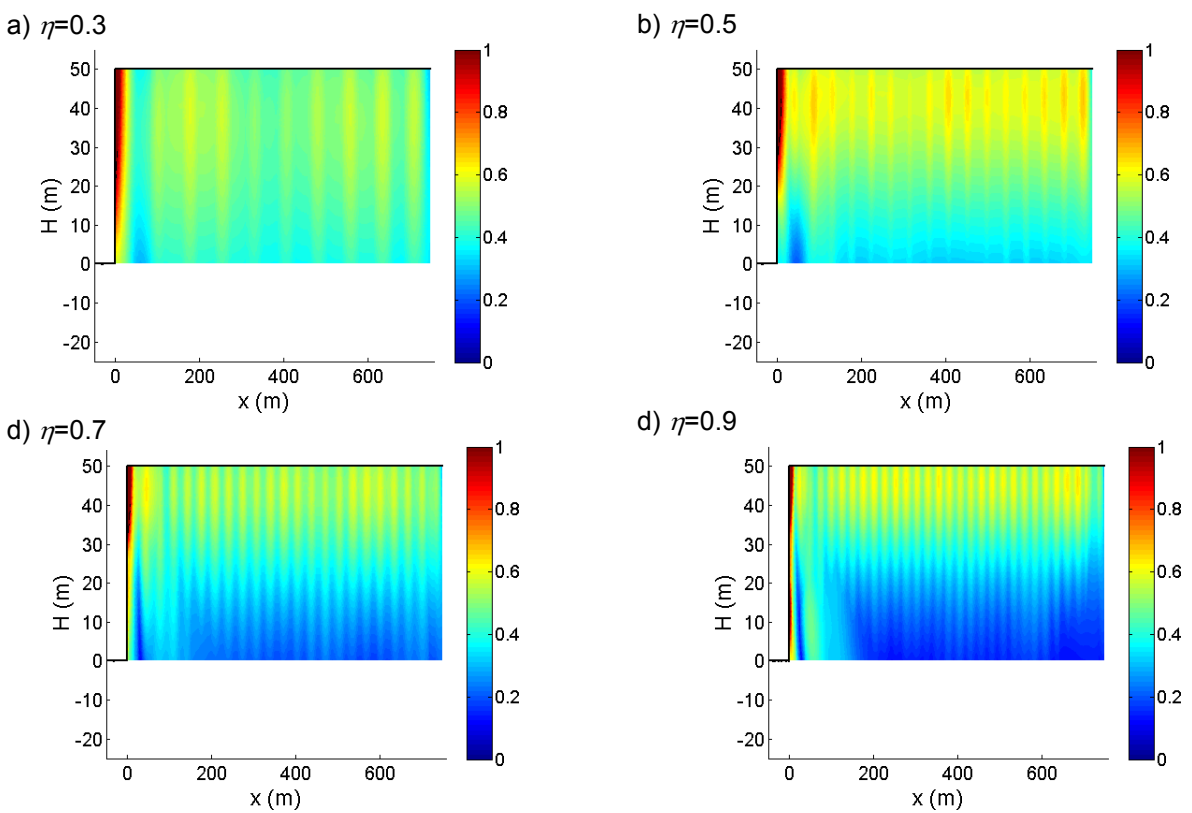


Figure 65. Amplification verticale dans les versants de même pente ($\alpha = 90^\circ$) et pour différentes valeurs de la fréquence adimensionnelle (η)

C. Dimension de la zone potentiellement instable en crête (H_x , D_{xc})

La Figure 66 présente la variation de H_x en fonction de η dans le cas d'un versant de pente 50° . Elle montre que les valeurs de H_x et D_{xc} ont tendance à diminuer avec l'augmentation de la fréquence adimensionnelle. Cette décroissance est significative pour les valeurs de η inférieures à 1.0 et il n'y a presque plus de variation au-delà. D'un point de vue général, la variation des dimensions H_x et D_{xc} de la zone d'amplification en crête est semblable à celle observée pour le rapport ρS_{AS} présentée dans la Figure 61, ce qui semble logique car plus l'aire est grande, plus ses dimensions sont élevées.

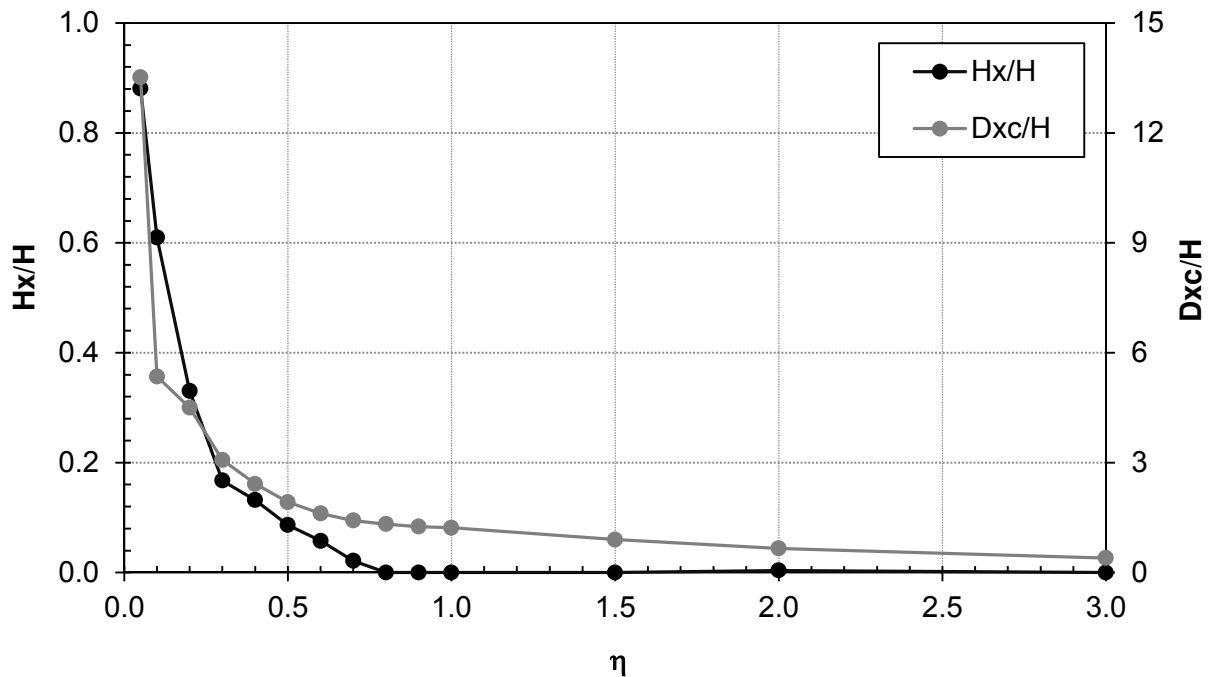


Figure 66. Évolution de la dimension de la zone amplifiée en crête (H_x et D_{xc}) en fonction de la fréquence adimensionnelle pour un versant de pente $\alpha = 50^\circ$

2.2.1.3. Évaluation générale de l'impact de la fréquence adimensionnelle

L'effet global de la fréquence adimensionnelle est évalué au moyen du coefficient de variation (CV) qui représente la dispersion des résultats due à la variation de η . Dans le cadre de cette étude, on a au total :

122 simulations numériques x 6 critères d'interprétation = 732 valeurs de résultats

Comme présenté le Tableau 7 (p. 74), pour chaque pente de versant, 12 ou 14 valeurs de la fréquence adimensionnelle ont été testées. Alors, pour chaque valeur de pente et pour chaque critère d'interprétation, on obtient une valeur de CV correspondant à ces 12 ou 14 variations de η . Alors, on a au total :

9 pentes x 6 critères d'analyse = 54 valeurs de CV

La dispersion des 732 valeurs de résultats est caractérisée par ces 54 valeurs de CV. Cependant, il faut se rappeler que, pour toutes les simulations réalisées, la taille des mailles du modèle est déterminée d'après l'équation [23] avec la valeur de N égale à 20. Ceci entraîne une erreur numérique de 5 % (Figure 51, p. 66). En ajoutant une erreur d'environ 1 % produite par les étapes de calcul du CV, l'erreur numérique totale estimée est de 6 %. Les valeurs de CV obtenues représentent alors la dispersion des résultats causée à la fois par les erreurs numériques et par l'effet de la fréquence adimensionnelle. Il est donc important de séparer ces deux effets.

Dans le but d'évaluer la dispersion des résultats purement produite par la variation de la fréquence adimensionnelle, on a utilisé la valeur de $CV^*(\%)$ qui est déterminé par la différence $CV(\%) - 6(\%)$. Ces valeurs de CV^* sont présentées dans le graphique de la Figure 67.

La première observation est que toutes les valeurs de CV^* sont positives, ceci confirme l'impact de la fréquence adimensionnelle sur la dispersion des résultats obtenus. Pour évaluer la répartition des valeurs de CV^* , on se base sur un critère statistique nommé *intervalle de confiance* (IC), qui détermine un intervalle dans lequel on trouve une majorité des points. Si la moyenne est m et l'écart-type est σ , on trouve au moins 95 % des points dans l'intervalle $[m-1.96\sigma, m+1.96\sigma]$.

Dans Figure 67, la majorité des points varient entre 9 et 152 %. Ceci montre qu'une variation de η dans l'intervalle de 0.05 et 3.0 provoque des différences significatives de résultats des critères d'analyses, particulièrement les critères concernant les aires et les dimensions des zones d'amplifications.

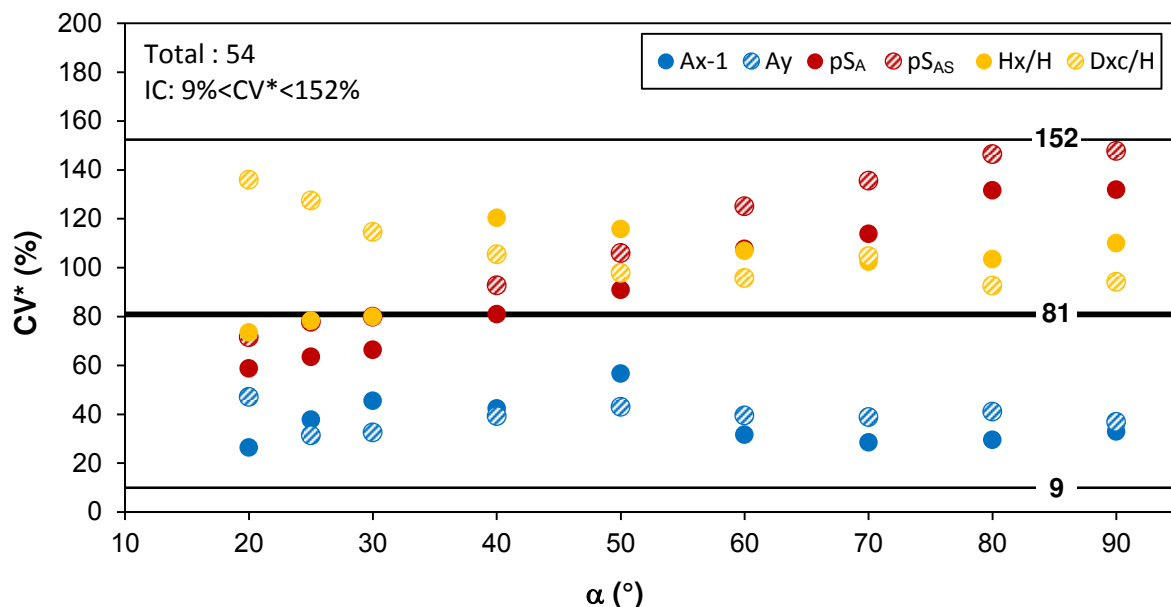


Figure 67. Évaluation de la dispersion des résultats purement causée par la variation de la fréquence adimensionnelle

2.2.1.4. Conclusion

La fréquence adimensionnelle est considérée comme l'indice principal permettant de prédire le développement et l'ampleur des effets de site topographiques sur la base des critères d'analyse : A_x , A_y , pS_A , pS_{AS} , H_x , Dxc .

En général, il y a deux phases de variation des critères d'analyse en fonction de la fréquence adimensionnelle. La première phase correspond à une forte dépendance : plus la fréquence adimensionnelle est élevée, plus la valeur des facteurs d'amplification est importante, et plus les zones d'amplification en crête sont réduites. La deuxième phase représente un état plus stable : les critères d'analyse varient très peu ou sont même invariables. La limite entre ces deux phases correspond à une fréquence adimensionnelle de 1.0 pour la plupart des critères d'étude (A_y , pS_A , pS_{AS} , H_x , Dxc), et variable en fonction de la pente pour le facteur A_x .

Un phénomène important qui doit être pris en compte dans l'évaluation de A_x est l'effet de résonance. Ce phénomène se produit quand la fréquence du signal incident est proche de la fréquence propre du versant ou autrement dit quand la fréquence adimensionnelle est proche de 0.2. La conséquence est une forte augmentation de A_x dans un intervalle de η très limité ($0.1 \leq \eta \leq 0.3$).

Les analyses réalisées sur l'ensemble des résultats obtenus permettent de mettre en évidence deux valeurs de η qui sont particulièrement remarquables : 0.15 et 0.5

- Pour l'amplification de l'accélération horizontale
 - $\eta < 0.15$: seule la zone en crête est affectée par l'amplification.
 - $0.15 \leq \eta < 0.5$: les zones amplifiées se multiplient et apparaissent également derrière la crête le long de la surface horizontale supérieure.
 - $\eta > 0.5$: l'amplification affecte aussi des zones en profondeur du massif du versant.
- Pour l'amplification de l'accélération verticale, en plus des fortes amplifications toujours présentes le long de la pente :
 - $\eta < 0.5$: les amplifications sont réparties régulièrement dans le massif de versant.
 - $\eta < 0.5$: les fortes amplifications se concentrent vers la surface supérieure.

Les analyses statistiques montrent qu'une variation de η entre 0.05 et 3.0 peut causer une dispersion générale des résultats de 9 à 152 %. La dispersion moyenne est de 81 %.

2.2.2. Étude du rôle de la pente

2.2.2.1. Problématique

L'angle de la pente est considéré comme un des paramètres les plus importants qui contrôlent l'intensité des effets de site topographiques ainsi que le développement des zones affectées par des amplifications. Son rôle a été montré dans plusieurs travaux de recherche : Ashford et al., 1997^[9]; Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]; Bourdeau, 2005^[33]; Nguyen et Gatmiri, 2007^[117]; Di Fiore, 2010^[59]; Messaoudi et al., 2011^[106]... Le paramètre pente a été également pris en compte dans le calcul du facteur d'amplification topographique (en accélération horizontale) recommandé par les normes françaises et européennes (PS-92, 1995^[122]; Eurocode 8, 2005^[61]).

Cependant, l'impact de ce paramètre sur les critères comme l'amplification verticale et la dimension des zones affectées a été peu étudié. De plus, on peut se demander si l'effet de la pente est influencé par l'effet de la fréquence adimensionnelle. Si tel est le cas, quelle est cette interaction ?

2.2.2.2. Analyse paramétrique

Les résultats des simulations numériques réalisées dans l'étude de la fréquence adimensionnelle (§ 2.2.1) sont réutilisés pour analyser l'effet de la pente. Pour rappel, ces simulations ont été réalisées sur les modèles de versants de même hauteur ($H = 50$ m) et de mêmes conditions géologiques ($V_s = 500$ m/s, $\rho = 2000$ kg/m³, $\nu = 0.25$, $E = 1.25$ GPa). La pente du versant a varié de 20° à 90° ($\alpha = 20^\circ$; 25° ; 30° ; 40° ; ... ; 90°).

De plus, la fréquence du signal sismique et la fréquence adimensionnelle ont été choisies dans l'intervalle des valeurs communes qui sont souvent observées dans la pratique : $F = 0.5 \div 10$ Hz et $\eta = 0.05 \div 1.0$. En combinant les variations de pente et de fréquence adimensionnelle, ces calculs permettent d'évaluer l'influence de la pente de manière plus complète, non seulement son impact direct sur l'amplification, mais aussi son interaction avec la fréquence adimensionnelle. Les paragraphes suivants présentent dans le détail l'influence de l'angle de pente sur chaque critère d'analyse.

a. Facteur d'amplification horizontale A_x

Le graphique de la Figure 68 présente les valeurs du facteur d'amplification horizontale pour quelques versants représentatifs ($\alpha = 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$). On voit bien que ces valeurs ont tendance à augmenter de manière importante avec la pente quand η est inférieure à 0.4. Par contre, quand η est plus élevée, l'influence de la pente sur la variation de A_x est faible et moins prononcée. À titre d'exemple, les courbes de variation de $A_x - 1$ en fonction de la pente pour les versants de différente fréquence adimensionnelle (0.2 ; 0.4 ; 0.6 et 0.8) sont illustrées dans la Figure 69. L'augmentation du facteur A_x avec la pente est clairement

observée pour les courbes $\eta = 0.2$; 0.4 , et se montre plus faible pour les courbes de η plus élevée $\eta = 0.6$ et 0.8 . Les représentations graphiques des amplifications dans tout le massif de versant données dans la Figure 70 montrent également que plus la pente augmente plus les amplifications dans le versant sont élevées et notamment pour les zones en contact avec les surface libres. La couleur de ces zones passe de jaune pour une pente de 30° à rouge pour une pente de 90° .

Une analyse plus détaillée réalisée sur les résultats des versants de 20 à 90° (par incrément de pente $\Delta\alpha = 10^\circ$) a montré que, même pour des valeurs de $\eta \leq 0.4$, l'effet de la pente est moins significatif pour les versants de faible pente. Le graphique de la Figure 71 montre que l'amplification maximale (courbe $Ax-1$) est quasiment invariable pour les pentes entre 20° et 30° . En revanche, quand la pente est supérieure à 30° , l'amplification maximale augmente considérablement avec la pente. Ashford et al., 1997^[9] ont fait la même observation dans leur étude. Les résultats de ces auteurs ont été également présentés dans la Figure 71.

Il est important de noter que la méthode de détermination du facteur d'amplification horizontale n'est pas la même pour tous les auteurs. Dans cette étude, A_x correspond à la valeur maximale de l'accélération horizontale normalisée dans tout le massif de versant. Par contre, A_x correspond à la valeur maximale observée uniquement sur la surface en amont dans les travaux de Bouckovalas (Bouckovalas et Kouretzis, 2001^[29]; Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]) et ne concerne que le maximum en crête comme dans les travaux de Ashford (Ashford et al., 1997^[9]; Ashford et Sitar, 1997^[8]). C'est pour cette raison que les valeurs de A_x dans notre étude sont parfois confondues avec les valeurs des autres auteurs (quand l'accélération maximale est localisée en surface au niveau de la crête) mais dans la plupart des cas, elles sont plus élevées. À titre d'exemple, sur la Figure 71, on observe que les résultats obtenus dans ce travail et ceux des études de Ashford sont très proches pour les courbes $\eta = 0.1$. Au contraire, une grande différence est observée pour la courbe $\eta = 0.3$. Ceci montre que l'amplification maximale ne se trouve pas toujours exactement au sommet de la pente. Les analyses dans cette étude montre que ce pic d'amplification peut se situer en crête ou à une certaine distance derrière la crête. En particulier dans le cas d'une pente de 30° , Assimiki et al. ont estimé que cette distance est d'environ 0.2 fois la longueur de l'onde incidente (Assimiki D et al., 2005^[14]). Notre propre analyse montre que cette distance est généralement située dans entre 0.1 et 0.3 fois la longueur de l'onde incidente pour les versants de pente variable entre 20 et 90° .

$$D_{Ax} = (0.1 \div 0.3) \lambda \quad [32]$$

D_{Ax} (m) : distance entre la crête et la position de l'amplification horizontale maximale en arrière de la crête

λ (m) : longueur d'onde prédominante du signal sismique

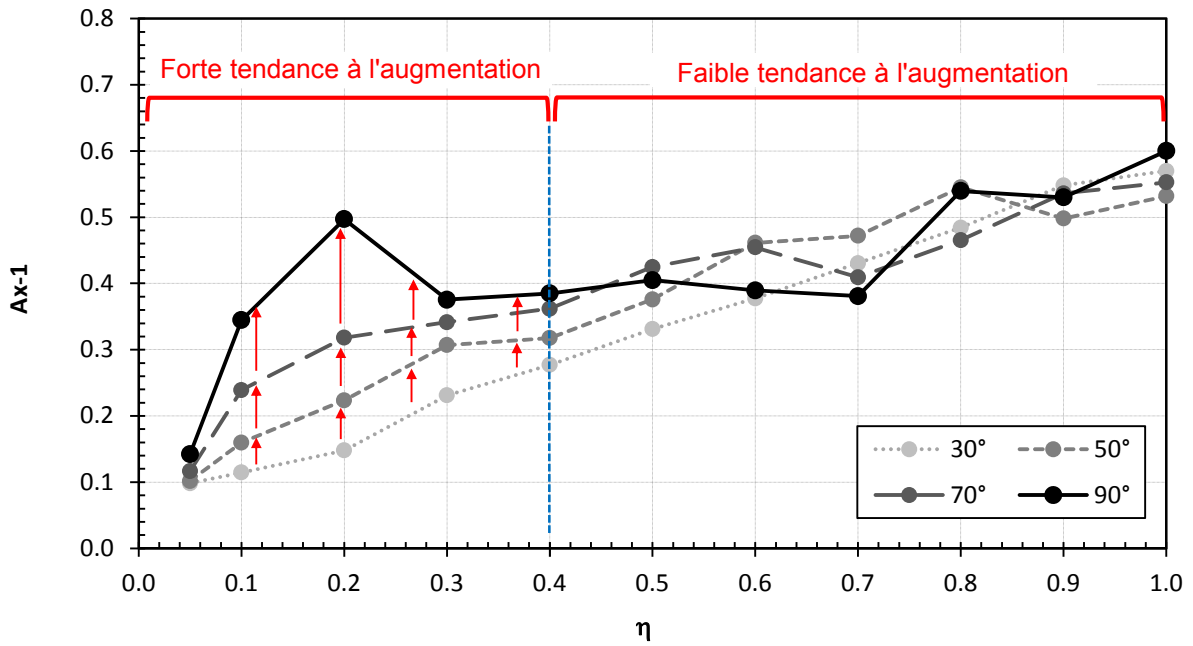


Figure 68. Évolution de Ax en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$)

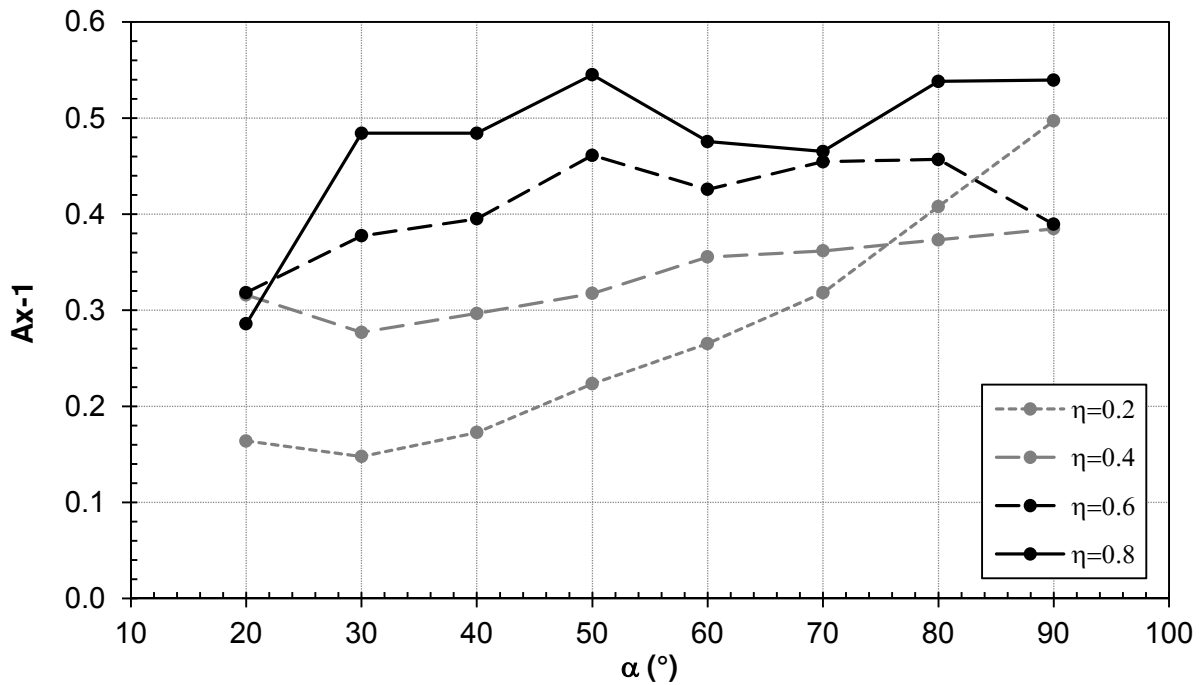


Figure 69. Évolution de Ax en fonction de la pente pour des versants de différentes fréquences adimensionnelles ($\eta = 0.2 ; 0.4 ; 0.6$)

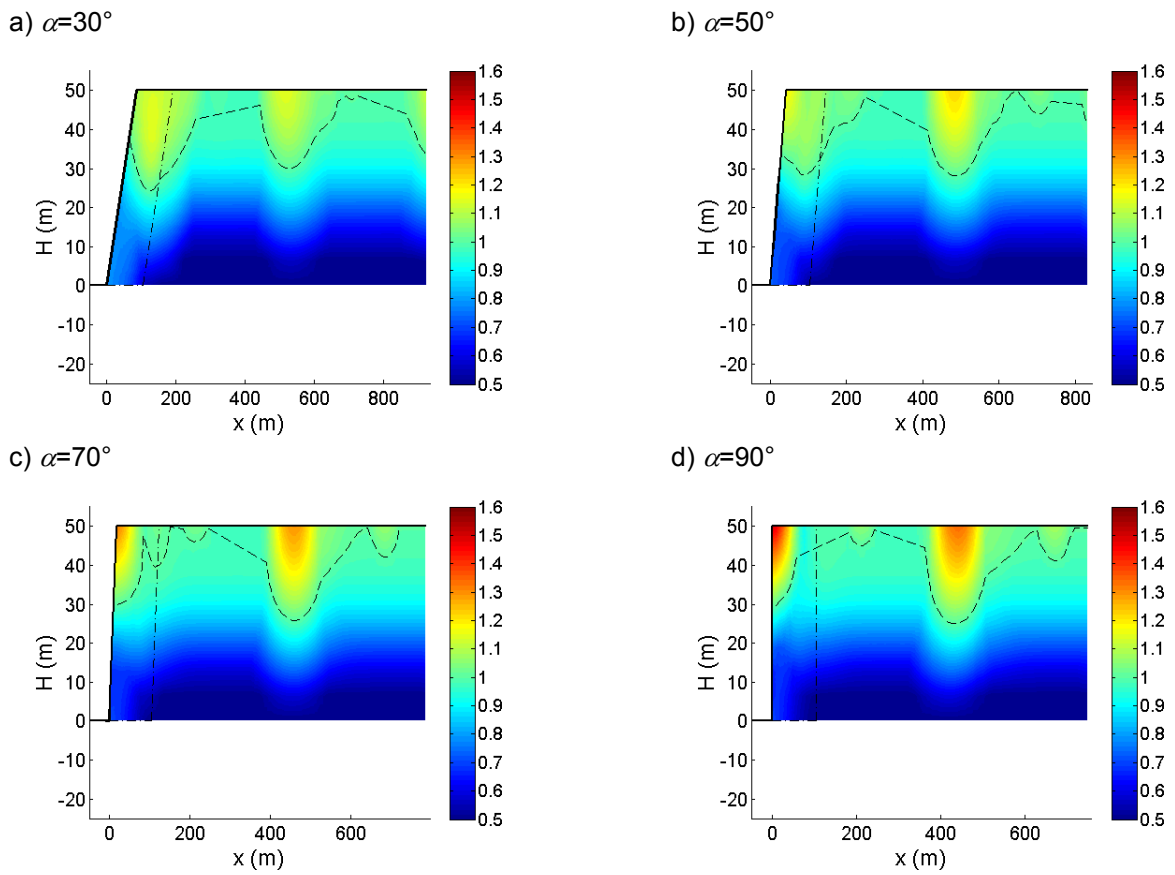


Figure 70. Amplifications horizontales normalisées dans les versants de pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$) et de même valeur de fréquence adimensionnelle $\eta = 0.2$

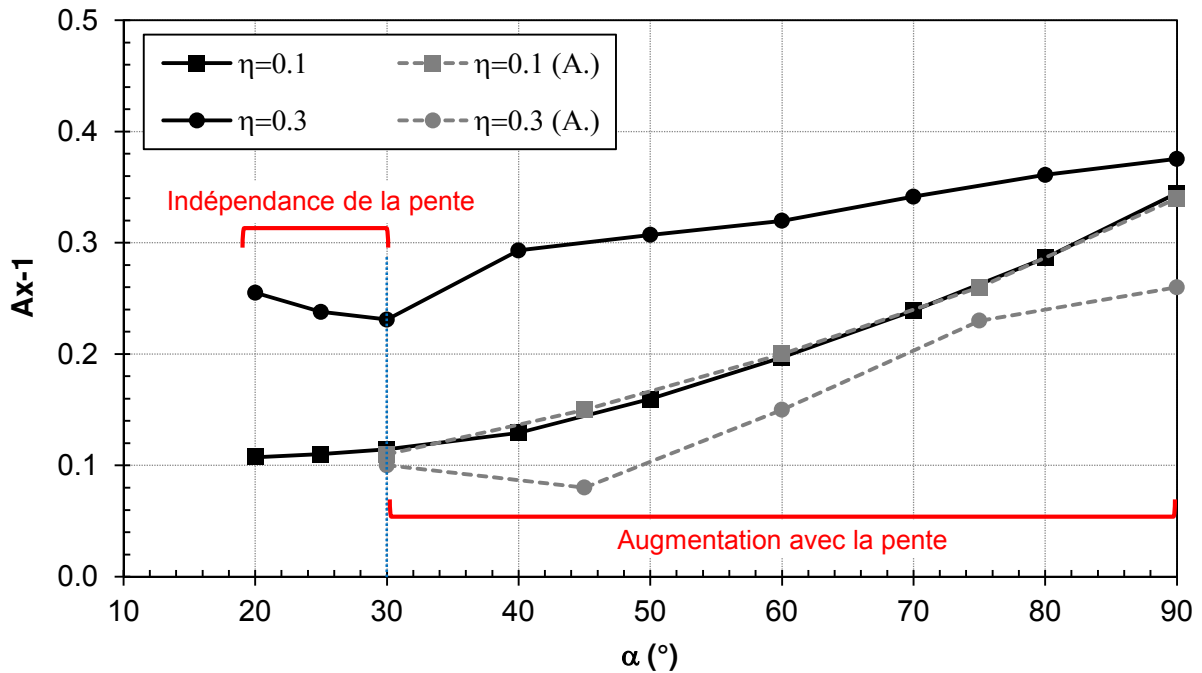


Figure 71. Courbes de variation de Ax^{-1} en fonction de la pente pour les versants de différente fréquence adimensionnelle ($\eta = 0.1 ; 0.3$) de cette analyse et des travaux de Ashford (A.)

b. Facteur d'amplification verticale A_y

Les valeurs du facteur d'amplification verticale A_y de versants de différentes pentes ($\alpha=30^\circ$, 50° , 70° , 90°) sont présentées dans la Figure 72. On observe clairement que A_y augmente avec la pente sauf pour les très faibles valeurs de η . De plus, cette tendance est visible sur tout l'intervalle de η considéré et non pas sur un intervalle localisé comme le cas de A_x ($\eta \leq 0.4$). Ce phénomène se voit encore mieux sur le graphique de la Figure 73 qui présente la variation de A_y en fonction de la pente pour les versants avec différentes fréquences adimensionnelles ($\eta=0.2$; 0.4 ; 0.6 et 0.8). Sur le graphique, on voit que la variation de la pente donne un effet considérable sur l'évolution de A_y , et il est visiblement plus important que dans le cas de A_x . La variation de A_y n'est pas linéaire et semble être beaucoup plus importante à partir de 60° .

L'effet de la pente peut être analysé en considérant la distribution des amplifications dans tout le massif de versant comme montré dans la Figure 74. L'augmentation de la pente entraîne une amplification de l'accélération verticale homogène dans l'ensemble du massif. C'est différent du cas de l'amplification horizontale où l'effet de la pente ne se manifestait que sur quelques zones localisées.

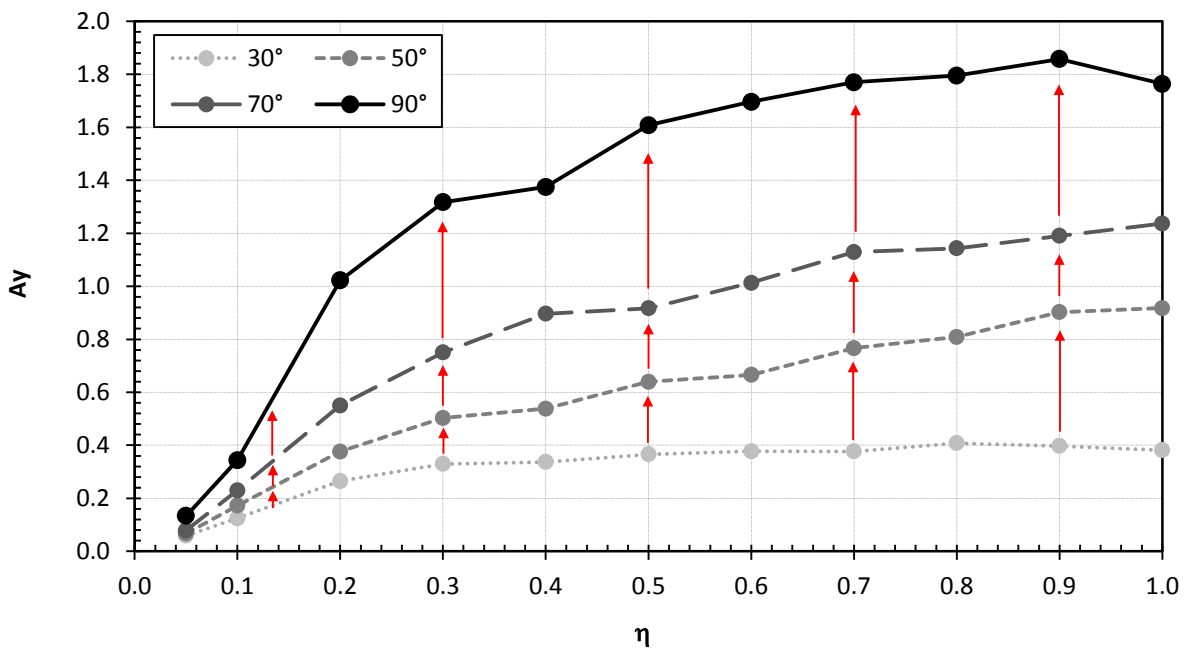


Figure 72. Évolution de A_y en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ$; 50° ; 70° ; 90°)

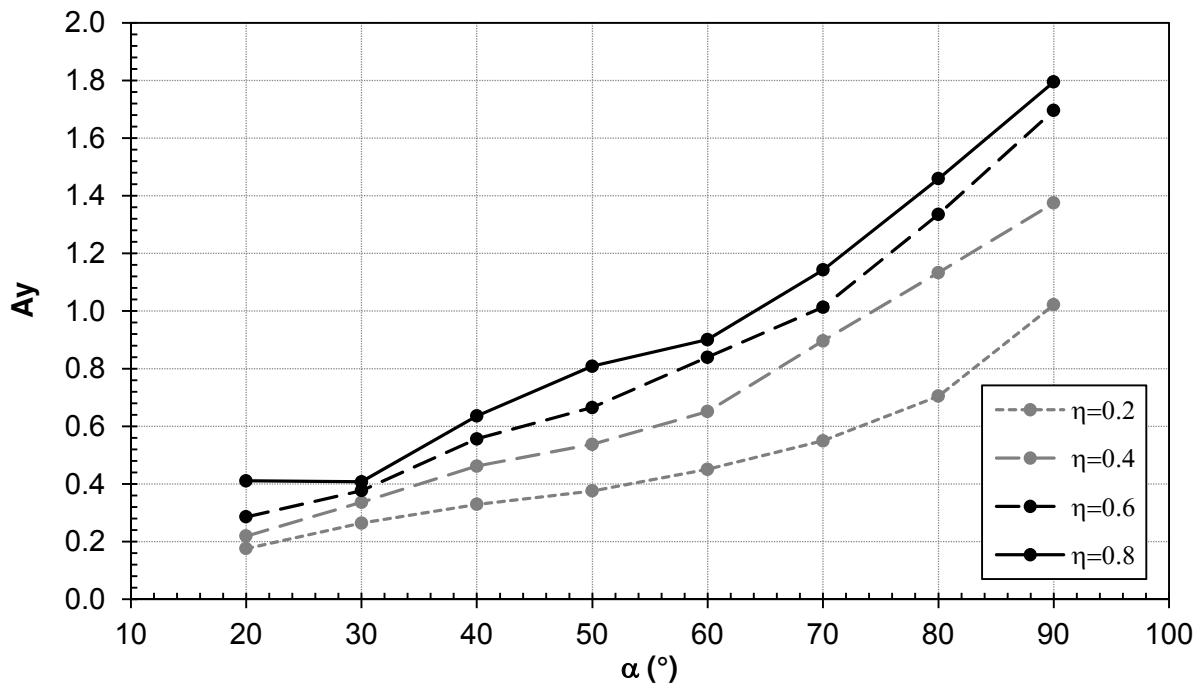


Figure 73. Évolution de A_y en fonction de la pente pour des versants de différentes fréquences adimensionnelles ($\eta = 0.2 ; 0.4 ; 0.6$)

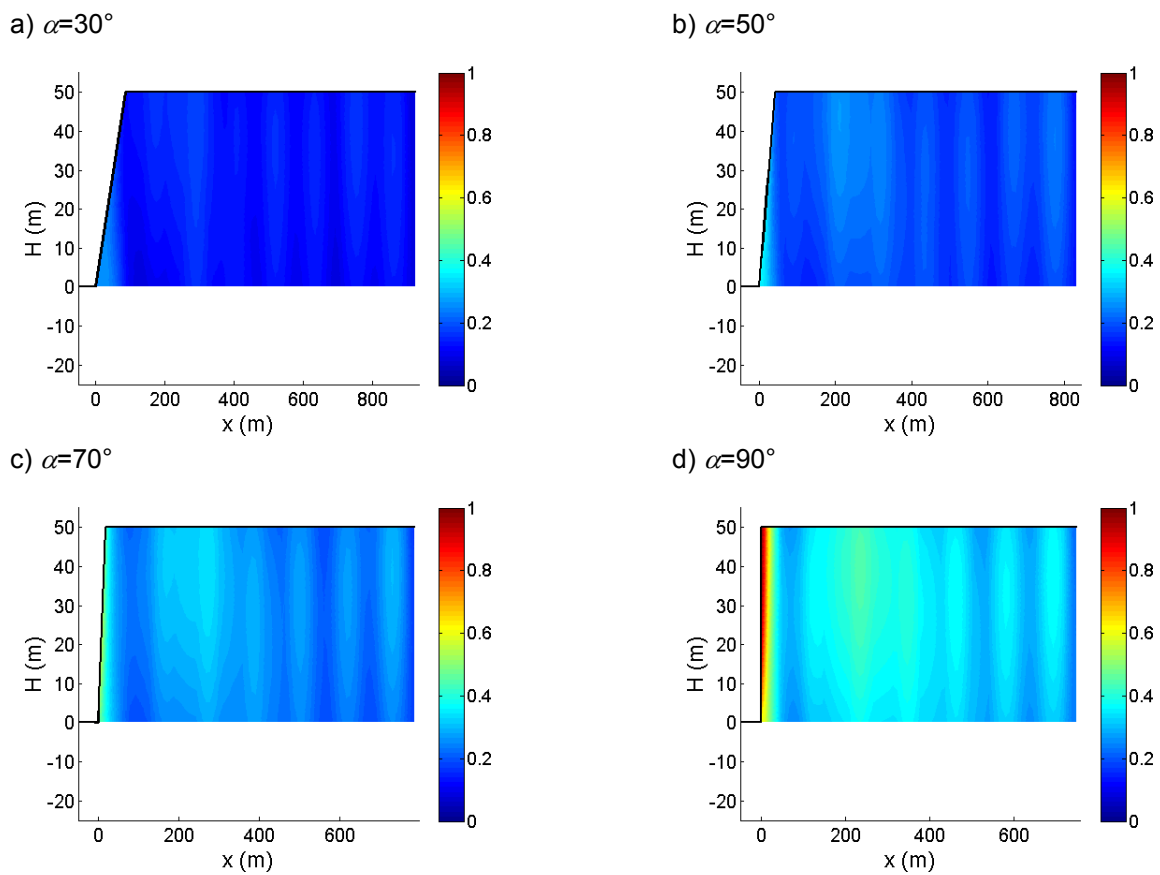


Figure 74. Amplifications verticales normalisées dans les versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$) et de même valeur de fréquence adimensionnelle $\eta = 0.2$

Comme pour le facteur A_x , la définition de l'accélération verticale maximale (A_y) considérée dans ce travail est légèrement différente de celle utilisée dans les travaux d'autres auteurs. Dans cette étude, A_y est la valeur maximale observée dans tout le massif du versant, y compris en surface le long de la pente et de la partie amont, alors que c'est la valeur maximale obtenue en crête pour Ashford et al., 1997^[9] ou le long de la surface supérieure pour Bouckovalas et Papadimitriou, 2005^[31]. Pour cette raison, les valeurs de A_y obtenues dans ces travaux sont différentes, mais les tendances de variation de A_y avec la pente ou les valeurs de η sont similaires. La Figure 75 présente une illustration de cette différence en faisant référence aux travaux de Ashford et al. Sur le graphique, on observe la même tendance de variation de A_y mais les courbes de deux études ne sont pas identiques. Les valeurs de A_y de Ashford et al. sont inférieures à celles obtenues dans notre étude. Ceci résulte du fait que la valeur maximale mesurée en crête n'est pas tout le temps la valeur maximale dans tout le massif de versant.

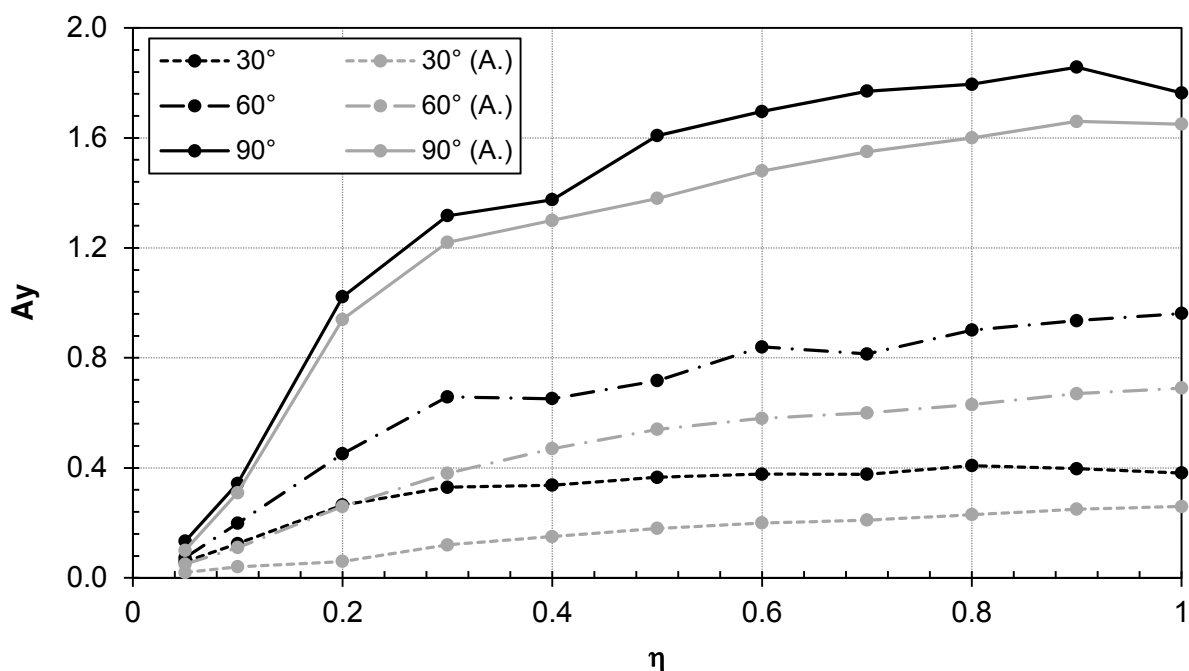


Figure 75. Comparaison de l'évolution de A_y pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 60^\circ ; 90^\circ$) dans cette analyse et dans l'étude de Ashford (A.)

C. Aire des zones d'amplification proches de la surface libre pS_{AS}

Les courbes de pS_{AS} présentées dans la Figure 76 montrent que ce critère montre deux tendances de variation globale. Quand η est inférieure à 0.15, pS_{AS} augmente avec l'angle de la pente. Au contraire, pour les valeurs de η supérieures à 0.15, pS_{AS} a tendance à diminuer quand la pente augmente. Une autre manière de présenter les résultats est donnée dans la Figure 77 dans laquelle on voit bien que, quand η est égale à 0.1 (< 0.15), la courbe de pS_{AS} est croissante, tandis que les courbes pour $\eta = 0.2 ; 0.4 ; 0.8$ (> 0.15) sont décroissantes. De plus, ces graphiques montrent également que plus la pente et la fréquence adimensionnelle sont élevées moins l'impact de la variation de la pente est significatif. En effet, quand la valeur

de η est supérieure à 0.5 et la pente supérieure à 50°, l'impact de la pente est très faible voire négligeable.

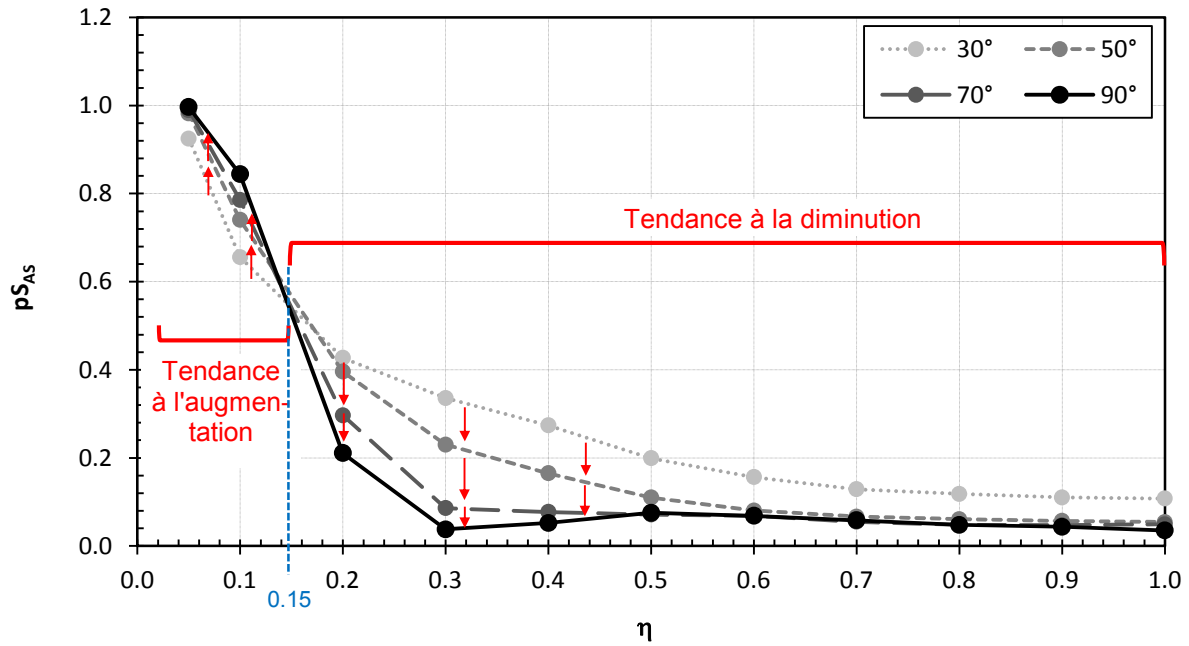


Figure 76. Évolution de pS_{AS} en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$)

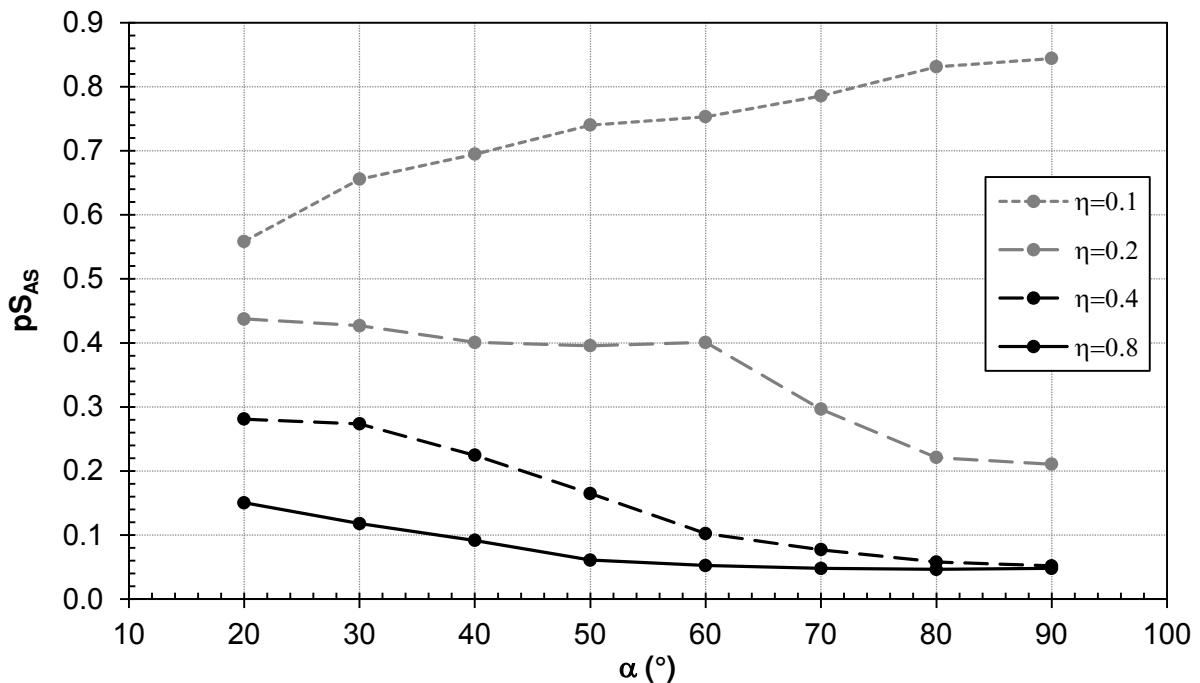


Figure 77. Évolution de Ay en fonction de la pente pour des versants de différentes fréquences adimensionnelles ($\eta = 0.1 ; 0.2 ; 0.4 ; 0.8$)

Pour mieux illustrer l'effet de la pente sur le changement de pS_{AS} , la Figure 78 et la Figure 79 montrent la distribution des amplifications représentées par un code couleur dans le massif pour différentes valeurs de pente. Pour une valeur de η inférieure à 0.15 (Figure 78 avec $\eta = 0.1$), une légère augmentation de la taille de la zone d'amplification (zone S_{AS} à l'intérieur de la région critique S_T) est observée quand la pente augmente. Au contraire, pour le cas η supérieure à 0.15 (Figure 79 avec $\eta = 0.3$), la variation de la pente influence énormément la taille de la zone amplifiée en crête. Plus la pente est élevée plus cette zone est réduite.

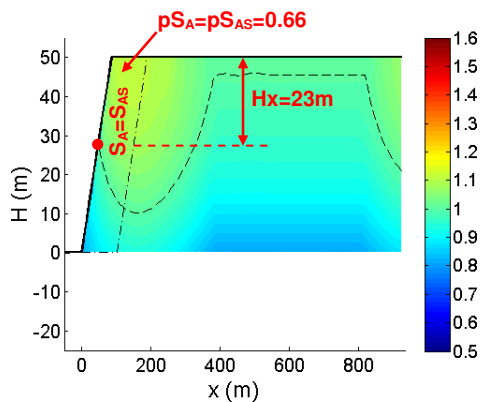
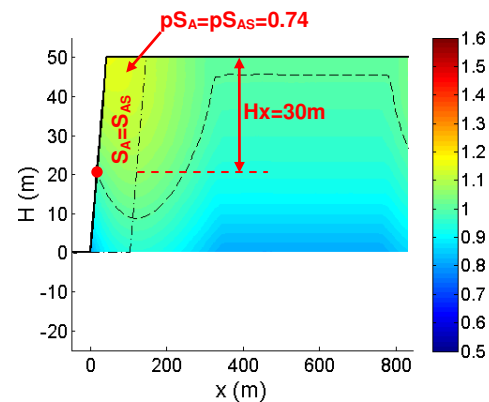
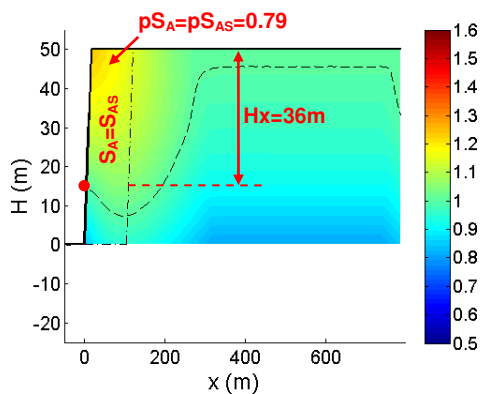
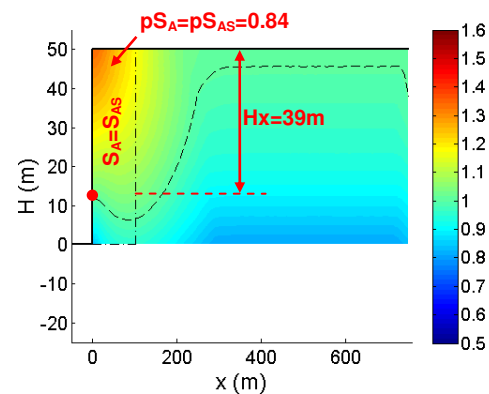
 a) $\alpha=30^\circ$

 b) $\alpha=50^\circ$

 c) $\alpha=70^\circ$

 d) $\alpha=90^\circ$


Figure 78. Amplifications horizontales normalisées dans les versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$) et de même valeur de fréquence adimensionnelle $\eta = 0.1$

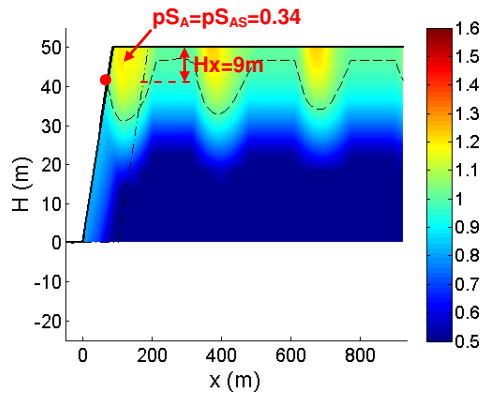
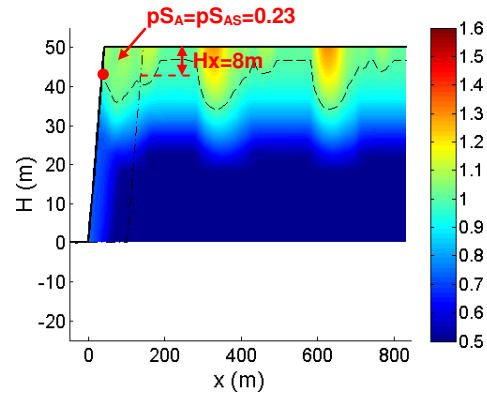
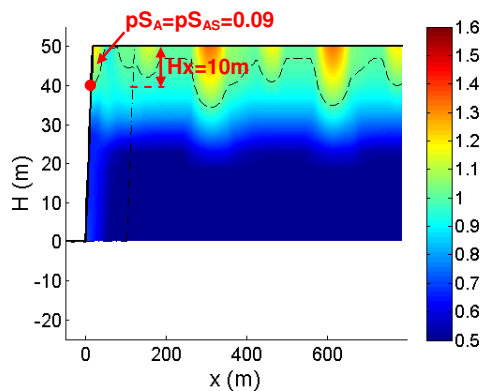
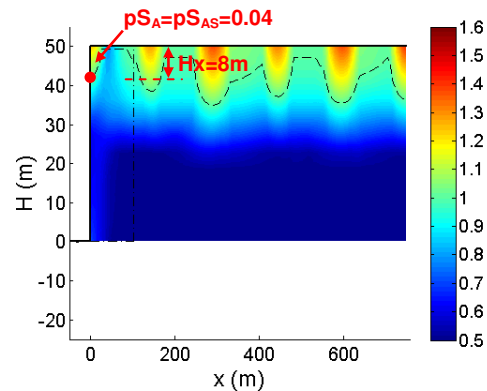
a) $\alpha=30^\circ$

 b) $\alpha=50^\circ$

 c) $\alpha=70^\circ$

 d) $\alpha=90^\circ$


Figure 79. Amplifications horizontales normalisées dans les versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$) et de même valeur de fréquence adimensionnelle $\eta = 0.3$

d. Aire totale des zones d'amplifications à l'intérieur de la région critique (pS_A)

Comme montré dans l'étude de l'impact de la fréquence adimensionnelle (rubrique *b* du § 2.2.1.2, p.77), pour les valeurs de η inférieures à 0.5, les surfaces S_A et S_{AS} sont confondues. Pour les valeurs plus élevées de η , la surface S_A est légèrement plus grande que S_{AS} . Ceci explique la similitude entre la Figure 76 et la Figure 80. Dans les deux graphiques, on observe les mêmes tendances de variation globale des critères pS_A et pS_{AS} : une augmentation avec la pente quand η est inférieure à 0.15 et une diminution quand η est supérieure à 0.15.

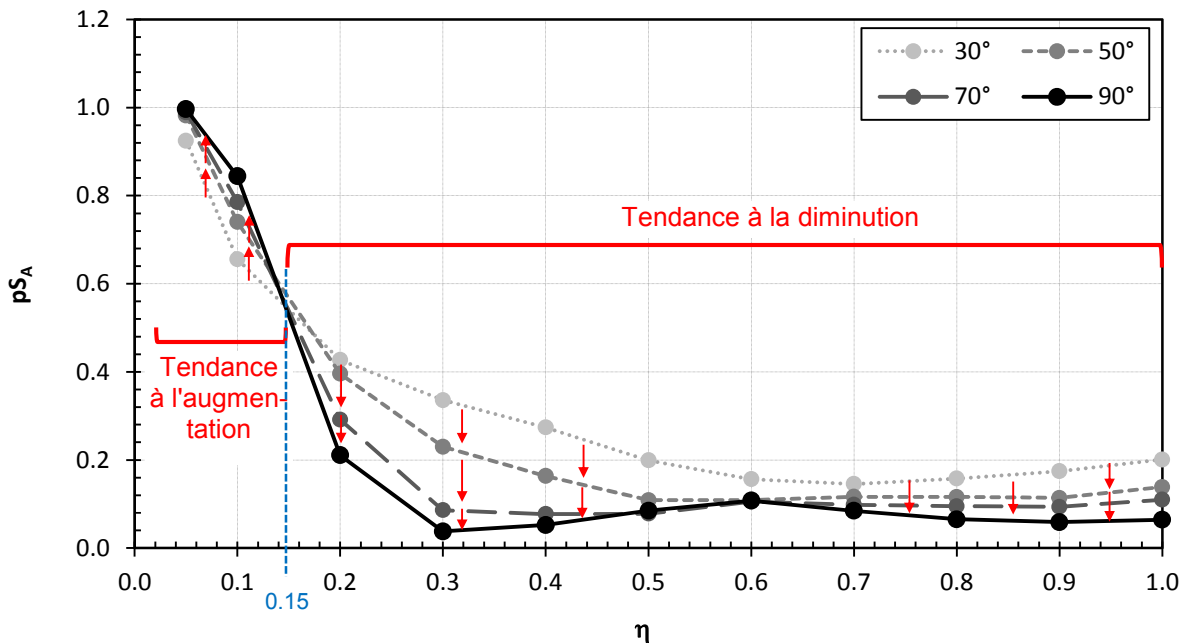


Figure 80. Évolution de pS_A en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$)

e. Hauteur H_x de la zone amplifiée en crête

La variation de la pente présente un impact assez faible sur la hauteur H_x de la zone amplifiée en crête. La Figure 81 montre qu'il y a une tendance à une légère augmentation de H_x avec la pente quand la fréquence adimensionnelle est inférieure à 0.3. Au-delà de ce seuil, le rôle de la pente n'est plus significatif voire négligeable. Ce phénomène est également visible sur le graphique de la Figure 82 dans laquelle sont présentées les courbes de H_x/H en fonction de la pente. H_x augmente avec la pente quand la fréquence adimensionnelle est égale à 0.1 et 0.2 (< 0.3). Par contre, quand η est supérieure à 0.3, la variation de H_x est quasiment indépendante de la pente.

Il faut noter qu'une variation de la hauteur H_x n'engendre pas nécessairement une variation de la surface de la zone d'amplification correspondante. À titre d'exemple, dans la Figure 78, la valeur de H_x croît (de 23 à 39 m) avec l'extension de la zone d'amplification S_{AS} au sommet de la pente (pS_{AS} augmente de 0.66 à 0.84). En revanche, dans la Figure 79, l'aire de cette zone est réduite significativement (pS_{AS} diminue de 0.34 à 0.04) mais la hauteur H_x reste quasiment invariable (autour de 9 m).

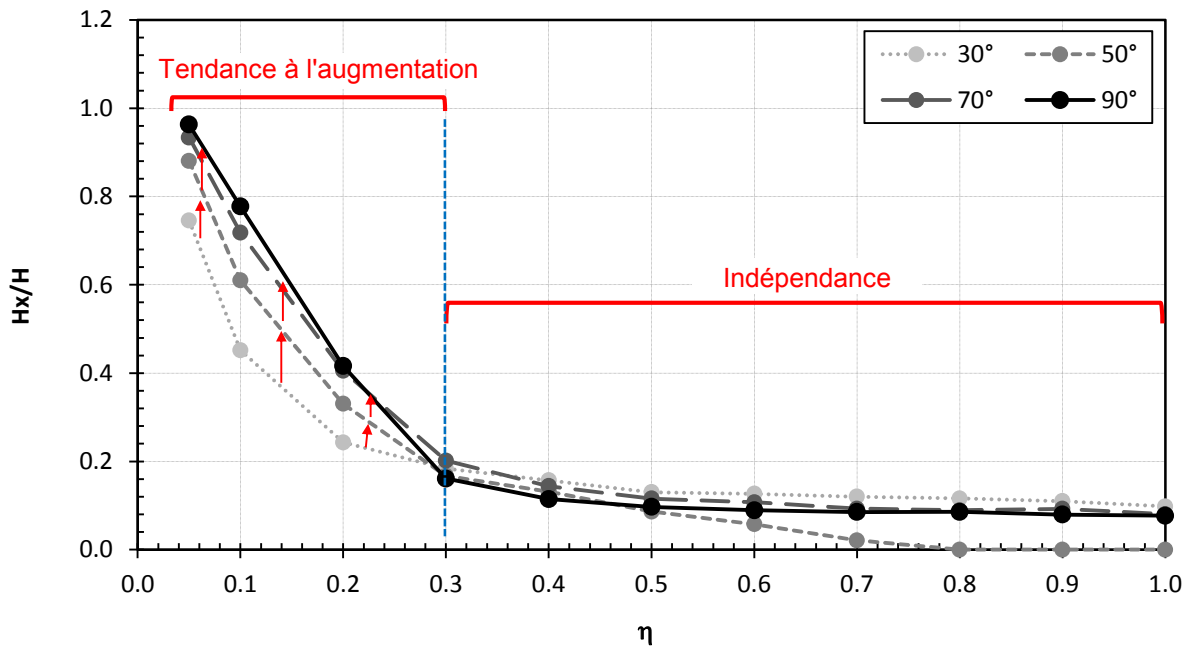


Figure 81. Évolution de Hx en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$)

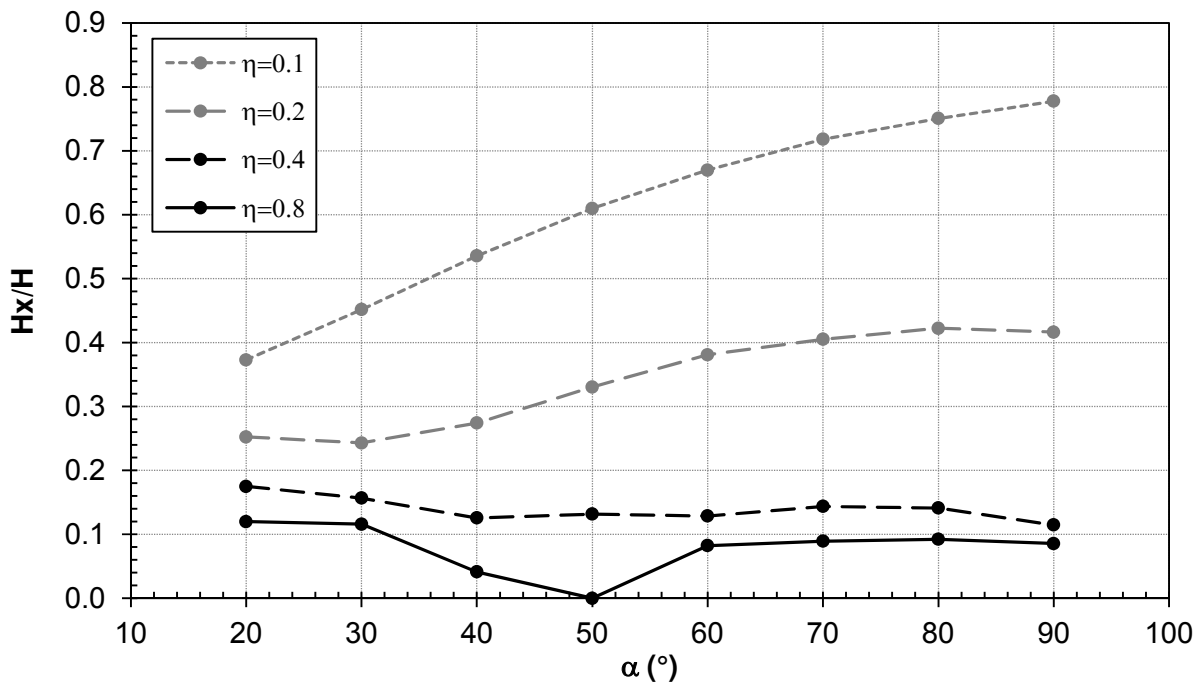


Figure 82. Évolution de Hx en fonction de la pente pour des versants de différentes fréquences adimensionnelles ($\eta = 0.1 ; 0.3 ; 0.6$)

f. Largeur D_{xc} de la zone amplifiée en crête

Les résultats des simulations numériques montrent que l'extension de la zone d'amplification en crête (D_{xc}) est très faiblement affectée par l'effet de la variation de la pente. Comme présenté dans la Figure 83, l'effet de la pente est faible voire négligeable pour les versants avec une fréquence adimensionnelle inférieure à 0.15. Pour les fréquences supérieures à 0.15, D_{xc} a tendance à légèrement augmenter avec la pente. Le graphique de la Figure 85 présente la variation de D_{xc} en fonction des pentes analysées pour quelques valeurs de fréquence adimensionnelle représentatives. On voit bien que, dans le cas où $\eta = 0.1$ (< 0.15), la courbe de D_{xc} est indépendante de la pente. Par contre, les courbes pour les valeurs de η supérieures à 0.15 ($\eta = 0.2 ; 0.4 ; 0.8$) montrent clairement une tendance à l'augmentation avec la pente.

Dans l'intervalle des fréquences adimensionnelles considérées ($\eta = 0.05 \div 1.0$), l'amplitude maximale de variation de D_{xc} due à une variation de la pente ne dépasse pas $1 H$ à $1.5 H$ (H : la hauteur de la pente) comme présenté dans Figure 85. En particulier pour des pentes de 30° à 90° , la variation ne dépasse jamais $1 H$. À titre d'exemple, la Figure 84 présente les courbes des accélérations normalisées (A_{x_i}) le long de la surface en amont des versants en fonction de la distance en arrière de la crête normalisée par la hauteur du versant (X/H). Dans cette figure, on voit que la variation de D_{xc} pour les versants de pente entre 30 et 90° ne dépasse pas $1 H$ pour les faibles valeurs de fréquence adimensionnelle ($\eta = 0.2$) ainsi que pour les fortes valeurs de fréquence adimensionnelle ($\eta = 0.6$). Il est nécessaire de rappeler que, dans le cadre de ce travail, la valeur de D_{xc} est déterminée par la distance entre la crête et le point où la courbe de A_{x_i} en surface devient horizontale, comme montré dans les graphiques de la Figure 84. Ceci explique pourquoi on observe parfois des zones de « dés-amplification » locale sur la distance de D_{xc} , notamment pour les versants de pente raide dans laquelle la zone d'amplification en crête est souvent subdivisée en plusieurs petites zones, le calcul de D_{xc} tenant compte ainsi de toutes ces zones.

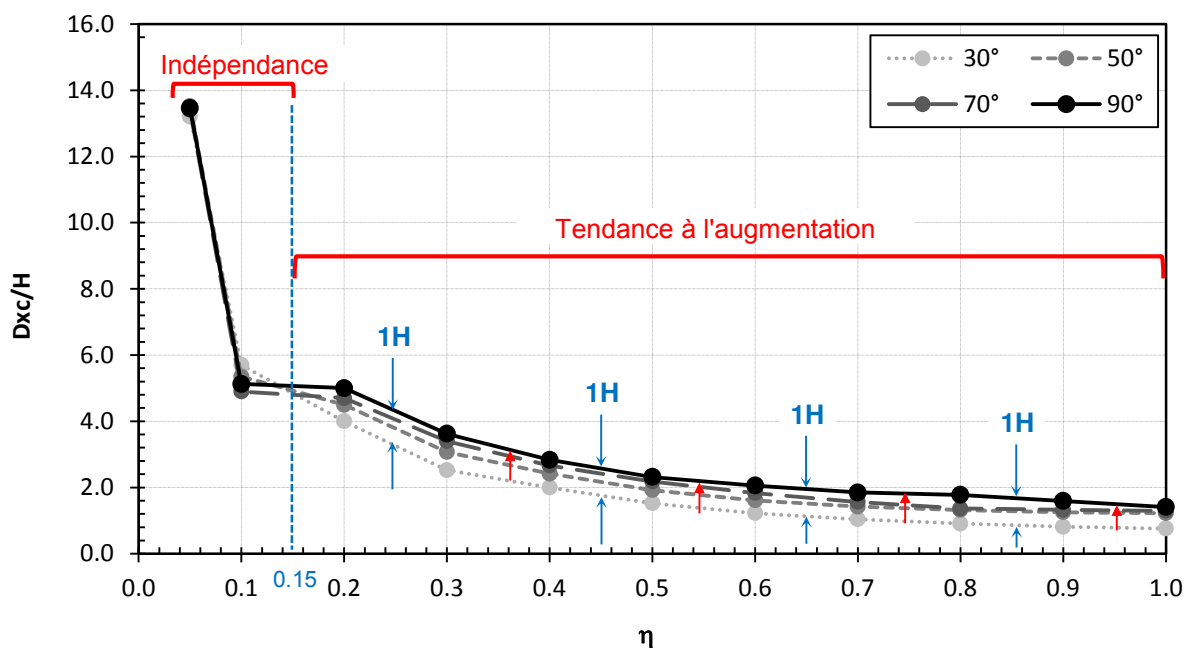
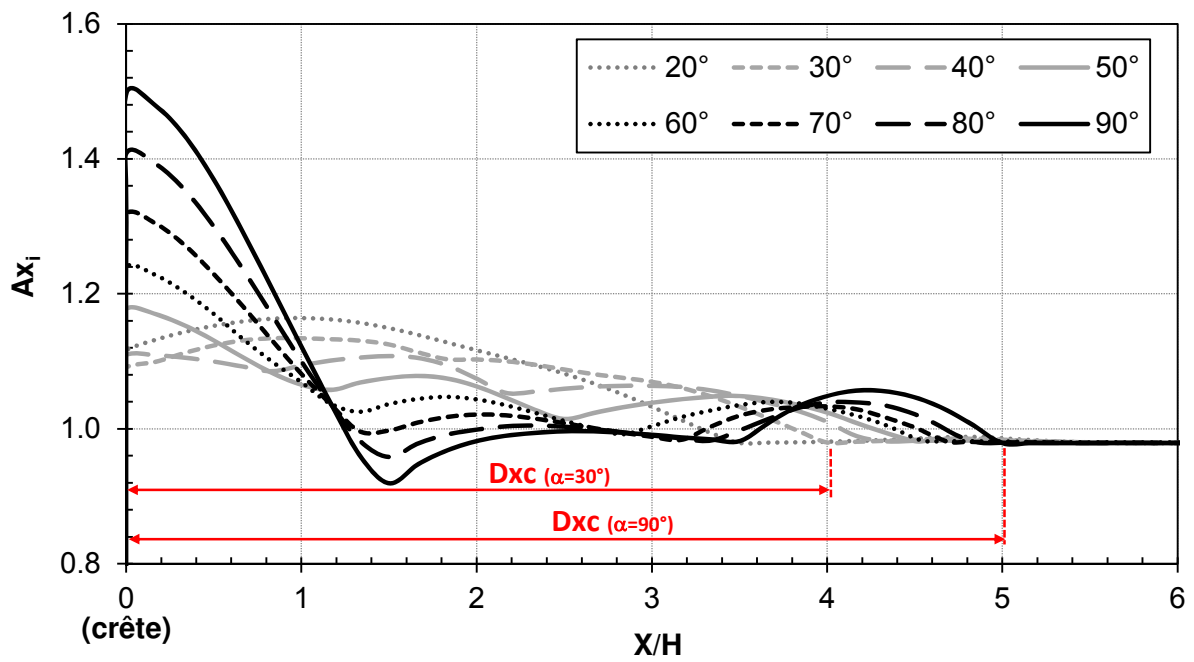


Figure 83. Évolution de D_{xc} en fonction de la fréquence adimensionnelle pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$)

a) $\eta = 0.2$



a) $\eta = 0.6$

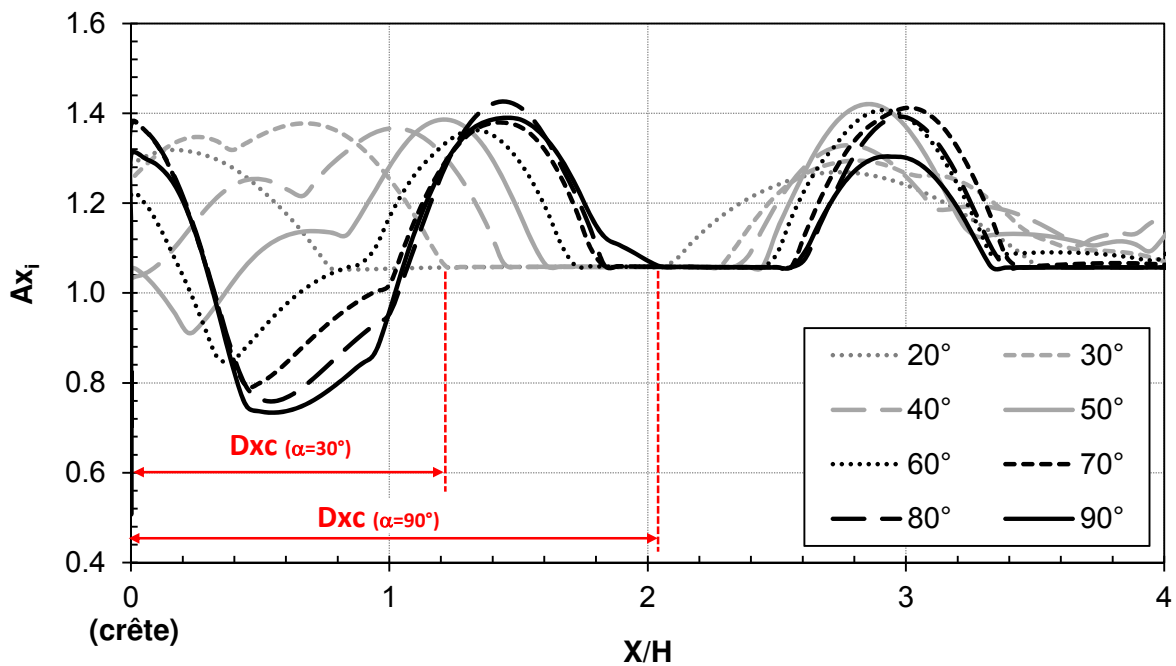


Figure 84. Enregistrement de l'accélération horizontale normalisée en surface supérieure pour des versants de différentes pentes ($\alpha = 20^\circ \div 90^\circ$) pour le cas a) $\eta = 0.2$ a) $\eta = 0.6$

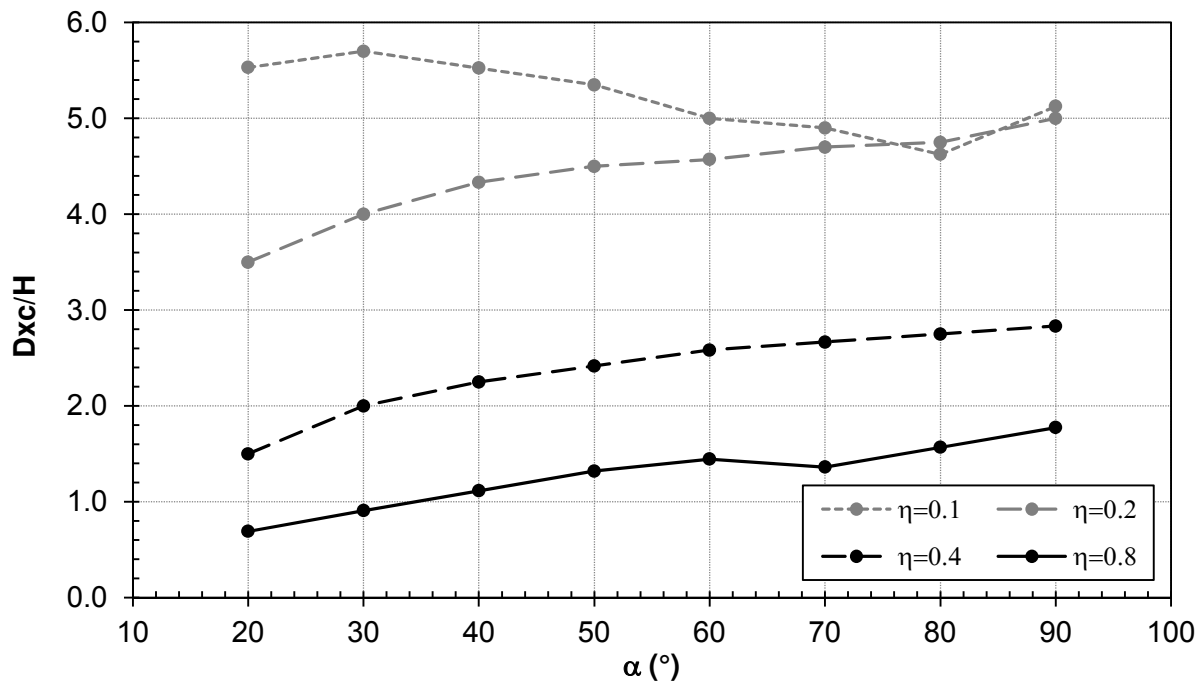


Figure 85. Évolution de D_{xc} en fonction de la pente pour des versants de différentes fréquences adimensionnelles ($\eta = 0.1 ; 0.2 ; 0.4 ; 0.6$)

2.2.2.3. Évaluation générale de l'impact de la pente

L'effet global de la pente est analysé en se basant sur l'évaluation des valeurs du coefficient de variation (CV) des 732 résultats obtenus à partir de 122 simulations numériques (Tableau 7, p.74). Pour chaque critère d'interprétation, on a calculé le CV correspondant à chaque fréquence adimensionnelle. Comme il y a 6 critères d'analyse, on a alors au total :

14 valeurs de η x 6 critères d'interprétation = 84 valeurs de CV

Les valeurs de CV(%) ont ensuite été diminuées de 6 % pour éliminer l'effet des erreurs numériques. Enfin, les valeurs de CV^* ($= CV-6$) sont présentées dans la Figure 86. Le résultat d'analyse montre qu'une variation de la pente entre 20 et 90° produit en conséquence une dispersion des résultats entre 0 et 66 % (intervalle de confiance : IC)

Si l'on compare avec l'effet de la fréquence adimensionnelle, on trouve que la dispersion moyenne causée par une variation de la pente est environ deux fois plus faible que celle causée par l'effet de la fréquence adimensionnelle (voir Figure 67) : $81(\%) / 33(\%) = 2.45$. De plus, l'intervalle de variation de CV^* est également environ deux fois moins large $[152(\%) - 9(\%)] / [66(\%) - 0(\%)] = 2.2$. Ces observations montrent que l'effet de la pente est généralement plus faible que l'effet de la fréquence adimensionnelle car les variations de pente engendrent des effets moins considérables que les variations de la fréquence adimensionnelle.

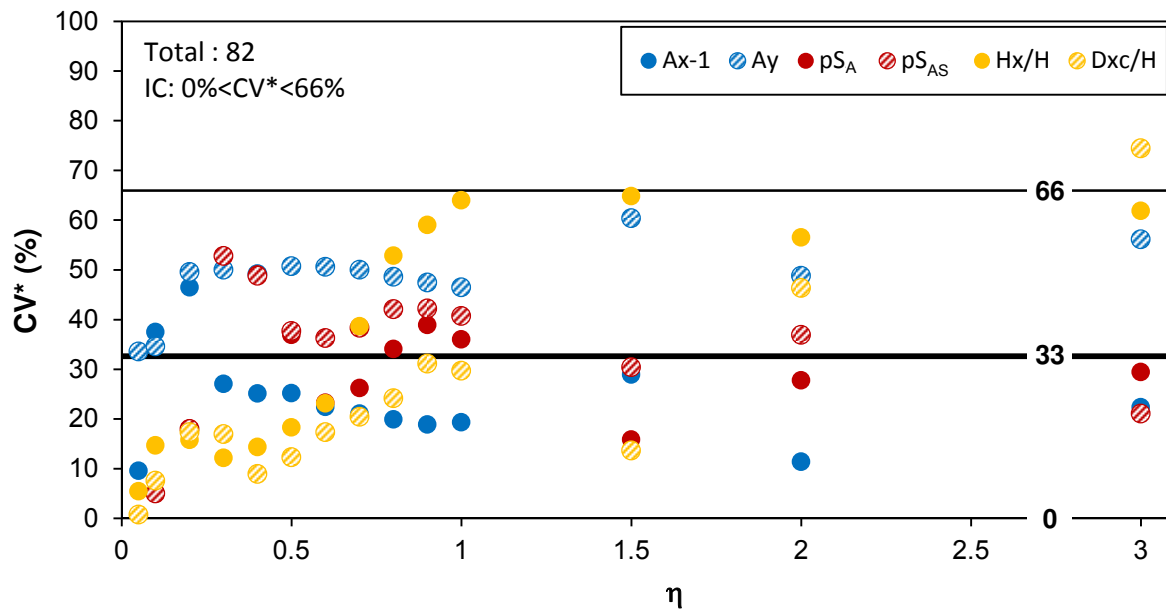


Figure 86. Évaluation de la dispersion des résultats purement causée par la variation de la pente

2.2.2.4. Conclusion

D'un point de vue général, la pente a un impact sur les effets de site topographiques des versants. Cet impact est variable en fonction du critère d'interprétation considéré et il peut être différent selon les intervalles de fréquence adimensionnelle considérés.

Lorsque η est inférieure à 0.4, le facteur A_x augmente avec l'augmentation de la pente, notamment pour les pentes supérieures à 30° . Quand η est plus élevée, l'effet de la pente est peu significatif. Concernant la composante verticale, la variation de la pente produit un effet très général qui peut toucher tout le massif de versant. De manière générale, plus la pente est élevée, plus A_{y_i} et sa valeur maximale A_y sont importantes. Cet effet est constant sur tout l'intervalle de η considéré ($\eta = 0.5 \div 1.0$).

En ce qui concerne la surface des zones d'amplification à l'intérieur de la région critique, les critères pS_A et pS_{AS} augmentent avec la pente quand η est inférieure à 0.15. À l'inverse, ces surfaces diminuent quand η est supérieure à 0.15.

La hauteur et la largeur de la zone d'amplification en crête se comportent différemment en fonction de la pente. Plus concrètement, une augmentation de la pente engendrera une augmentation de H_x quand η est inférieure à 0.3, et une diminution de D_{xc} quand η est supérieure à 0.15. Au-delà de ces limites, l'effet de la pente sur ces critères est moins significatif voire négligeable.

Les analyses statistiques montrent qu'une variation de α entre 20° et 90° peut causer une dispersion des résultats sur tous les critères d'analyse entre 3 et 63 %.

2.2.3. Étude des effets des paramètres intégrés dans la fréquence adimensionnelle

2.2.3.1. Problématique

La fréquence adimensionnelle (η), comme montré dans la partie 2.2.1, est un paramètre pertinent pour évaluer les effets de site. D'après l'équation [16] : $\eta = H \times F / \sqrt{E / [2(1+\nu)\rho]}$, elle intègre plusieurs paramètres géomorphologiques et sismiques (H , F , E , ν , ρ). Au lieu d'évaluer le phénomène sous l'effet de ces différents facteurs et de manière isolée, elle permet de les combiner et représente ainsi un paramètre intégrateur. Cependant, la question qui se pose est de savoir si la fréquence adimensionnelle peut représenter d'une façon parfaite l'effet de tous les paramètres qui sont intégrés dans la formule ? Autrement dit, peut-on toujours obtenir la même réponse sismique du versant (par référence aux critères d'analyse) pour une même valeur de la fréquence adimensionnelle mais correspondant à différents paramètres intégrés dans la formule ?

2.2.3.2. Analyse paramétrique

Une étude paramétrique a été réalisée pour répondre à cette question. Un modèle de versant de pente 50° a été choisi. Deux valeurs de η ont été considérées : 0.1 et 0.5. On garde la valeur de η constante en changeant la valeur de deux paramètres en même temps. Donc, pour tester l'effet des 5 paramètres (H , F , E , ν , ρ), il faut faire varier au total 10 couples de paramètres (Tableau 8). Pour chaque couple, la valeur des paramètres varie 4 fois en prenant une valeur dans les intervalles suivants : $H = 25\div 200$ m, $F = 0.5\div 10$ Hz, $E = 0.3\div 50$ GPa, $\nu = 0.2\div 0.35$, $\rho = 1650\div 3125$ kg/m³. Donc au total, 80 simulations numériques ont été réalisées pour les deux valeurs de η étudiée.

Tableau 8. Couples de paramètres et numéro correspondant

Numéro du couple	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Couples de paramètres dont les valeurs vont varier	[H,F]	[H,E]	[H, ν]	[H, ρ]	[F,F]	[F, ν]	[F, ρ]	[E, ν]	[E, ρ]	[ν , ρ]

Pour chaque groupe des simulations (4 simulations/groupe) numéroté de 1 à 10, la dispersion des résultats est évaluée en se basant sur la valeur du coefficient de variation (CV), déterminé par le rapport de l'écart-type et la moyenne. En théorie, si les résultats obtenus sont identiques, la valeur de CV est égale à zéro. Cependant, en pratique pour les simulations numériques, il existe toujours une erreur numérique liée aux arrondis et à la discrétisation du modèle. Pour réduire cette erreur au minimum, le maillage a été affiné autant que possible, la valeur de N dans l'équation [23] a été prise égale à 50. D'après le graphique de la Figure 51, l'erreur numérique estimée pour le cas de $N = 50$ est environ 2 %.

On ajoute une petite erreur d'environ 1 % qui peut être produite pendant les étapes de détermination de CV. Alors, si $CV \leq 3 \%$, on peut considérer que la dispersion des résultats est causée principalement par l'erreur de calcul numérique, et qu'elle n'est pas affectée par les variations des paramètres intégrés dans la formule de la fréquence adimensionnelle. Au contraire si $CV > 3 \%$, ce sont bien les variations des paramètres qui sont à l'origine de la dispersion des résultats.

En représentant toutes les valeurs de CV supérieur à 3% sur les graphiques, la Figure 87 souligne les couples de paramètres dont la variation des valeurs est la raison principale de la dispersion des résultats. Ces couples de valeurs sont $[H, \nu]$, $[F, \nu]$, $[E, \nu]$ et $[\nu, \rho]$ qui correspondent respectivement aux cas de numéro 3, 6, 8 et 10. Le coefficient de Poisson se présente dans tous ces couples de paramètres. On peut alors conclure que ce dernier est à l'origine des dispersions observées. Ce phénomène peut être expliqué par le transfert du mouvement horizontal et vertical lors d'une réflexion d'une onde SV sur la pente. La quantité d'énergie transférée est variable en fonction de la valeur du coefficient de Poisson, comme souligné par Ashford et Sitar, 1997^[8] : « une onde incidente SV réfléchi sur une surface libre donnera lieu à deux mouvements horizontal et vertical, en fonction du coefficient de Poisson, comme indiqué par de nombreux chercheurs (e.g., Knopoff et al., 1957^[95]) ». On remarque que l'influence de la variation du coefficient de Poisson n'est pas la même pour différents critères d'études et pour différentes fréquences adimensionnelles. Par exemple, on observe sur Figure 87a un effet important pour A_y et D_{xc}/H tandis qu'il est quasiment nul pour les autres critères. Quand on augmente la fréquence adimensionnelle à 0.5, l'effet du coefficient de Poisson est observé presque sur tous les paramètres (Figure 87b).

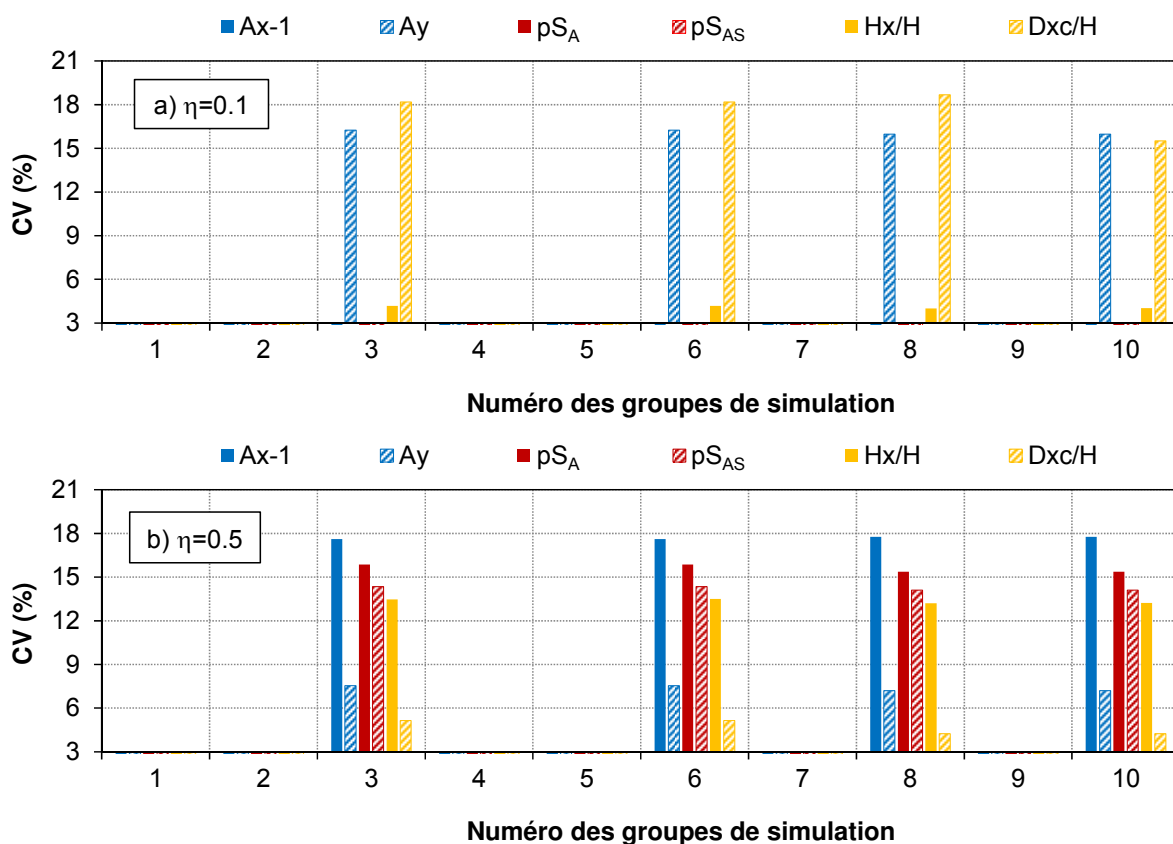
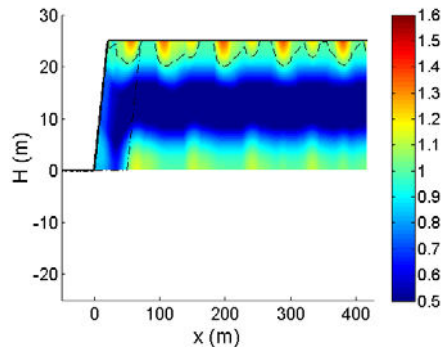
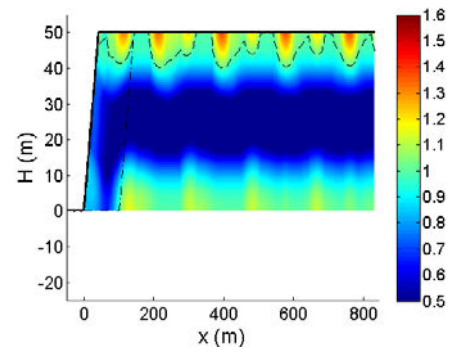


Figure 87. Dispersion des résultats sous l'effet de la variation de la valeur des paramètres intégrés pour deux cas de η constant a) $\eta = 0.1$ b) $\eta = 0.5$

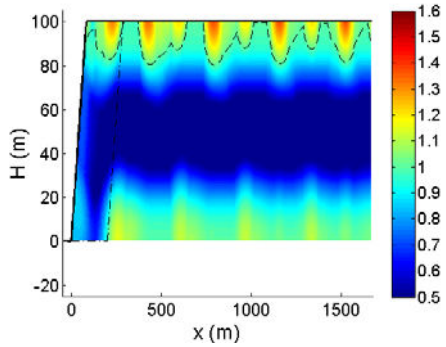
a) $H=25\text{m}, F=10\text{Hz}$



b) $H=50\text{m}, F=5\text{Hz}$



c) $H=100\text{m}, F=2.5\text{Hz}$



d) $H=200\text{m}, F=1.25\text{Hz}$

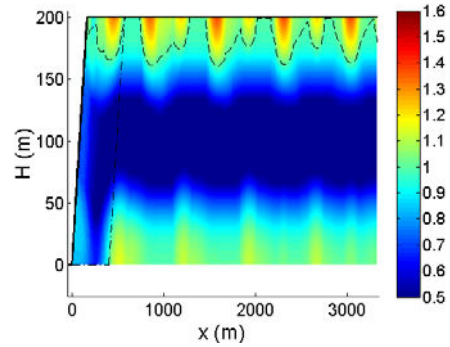
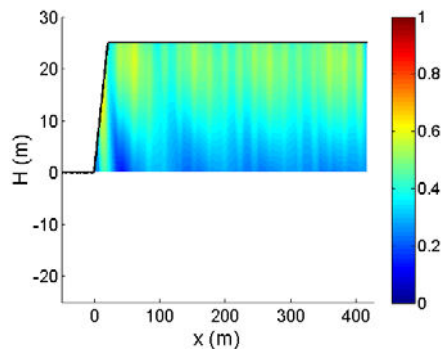
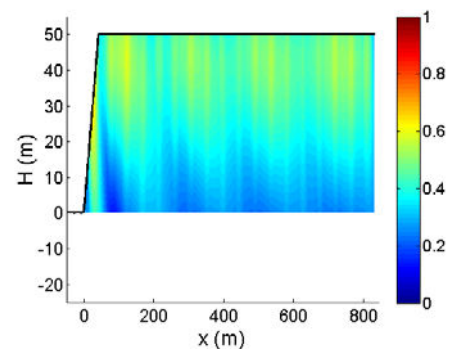


Figure 88. Représentation graphique de l'accélération horizontale normalisée (A_{x_i}) dans le versant pour le cas 1 : H, F variables et η constant ($\eta = 0.5$)

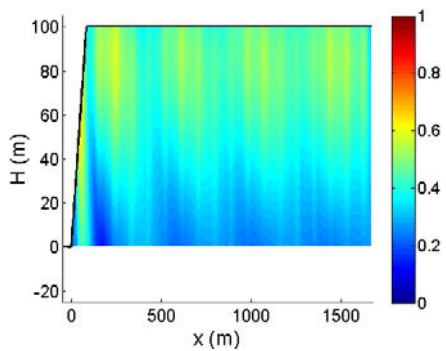
a) $H=25\text{m}, F=10\text{Hz}$



b) $H=50\text{m}, F=5\text{Hz}$



c) $H=100\text{m}, F=2.5\text{Hz}$



d) $H=200\text{m}, F=1.25\text{Hz}$

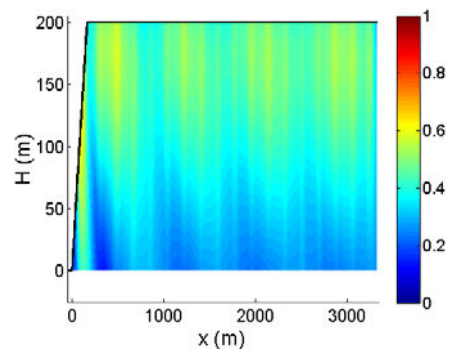
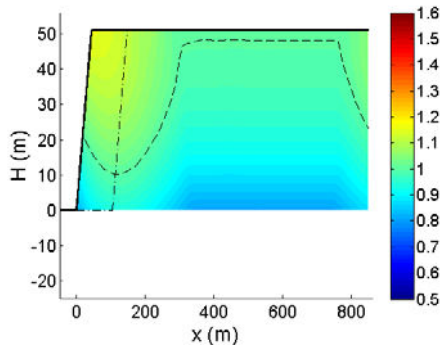
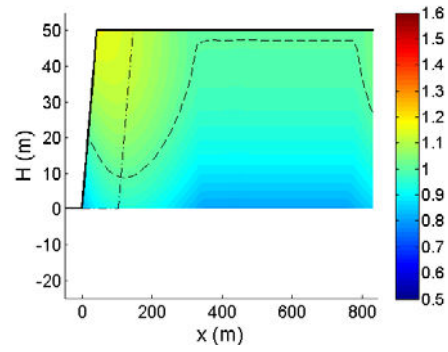


Figure 89. Représentation graphique de l'accélération verticale normalisée (A_{y_i}) dans le versant pour le cas 1 : H, F variables et η constant ($\eta = 0.5$)

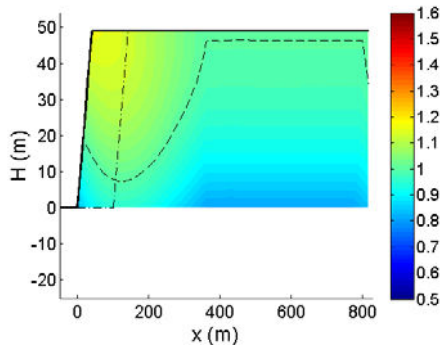
a) $H=51\text{m}$, $\nu=0.2$



b) $H=50\text{m}$, $\nu=0.25$



c) $H=49\text{m}$, $\nu=0.3$



d) $H=48\text{m}$, $\nu=0.35$

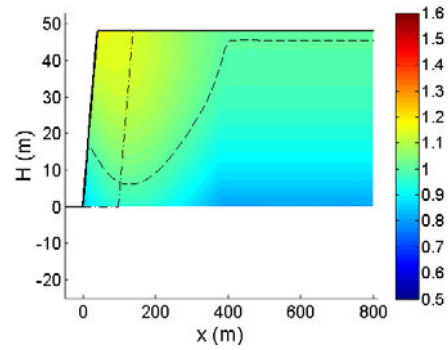
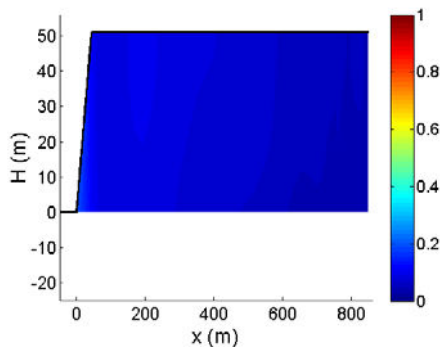
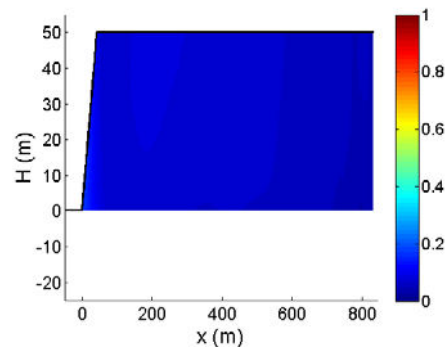


Figure 90. Représentation graphique de l'accélération horizontale normalisée (Ax) dans le versant pour le cas 3 : H , ν variables et η constant ($\eta = 0.1$)

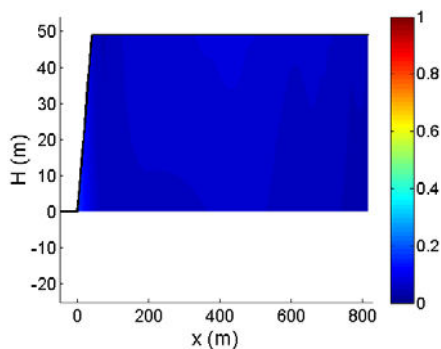
a) $H=51\text{m}$, $\nu=0.2$



b) $H=50\text{m}$, $\nu=0.25$



c) $H=49\text{m}$, $\nu=0.3$



d) $H=48\text{m}$, $\nu=0.35$

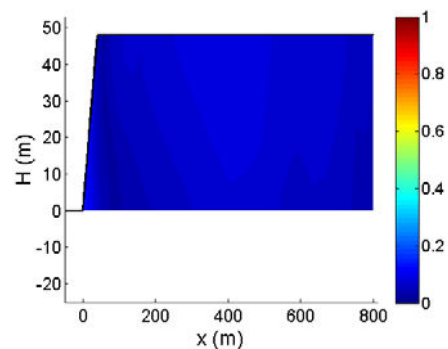
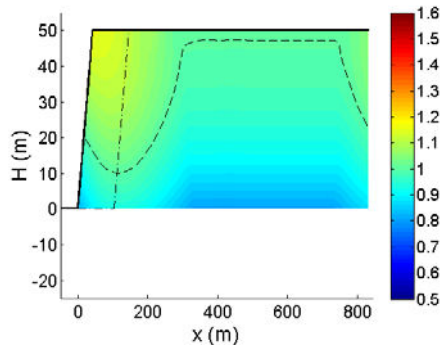
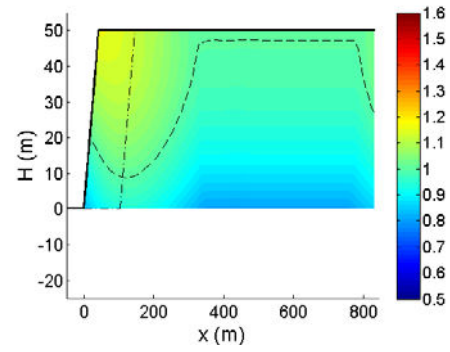


Figure 91. Représentation graphique de l'accélération verticale normalisée (Ay) dans le versant pour le cas 3 : H , ν variables et η constant ($\eta = 0.1$)

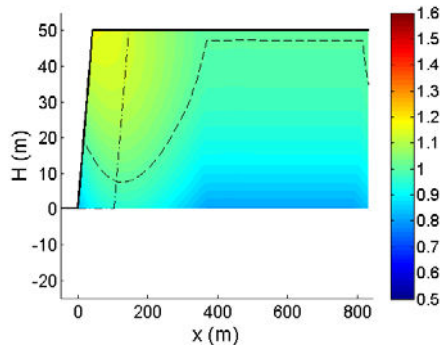
a) $E=1.2\text{GPa}$, $\nu=0.2$



b) $E=1.25\text{GPa}$, $\nu=0.25$



c) $E=1.3\text{GPa}$, $\nu=0.3$



d) $E=1.35\text{GPa}$, $\nu=0.35$

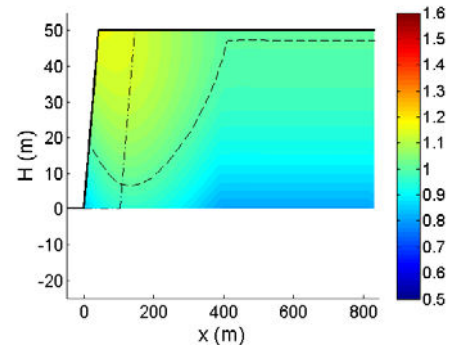
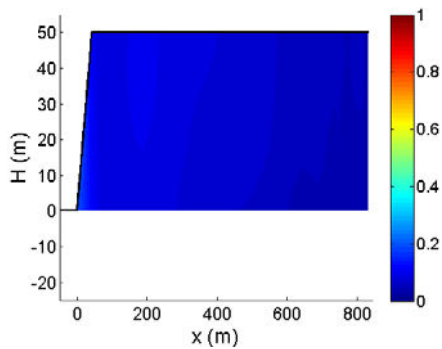
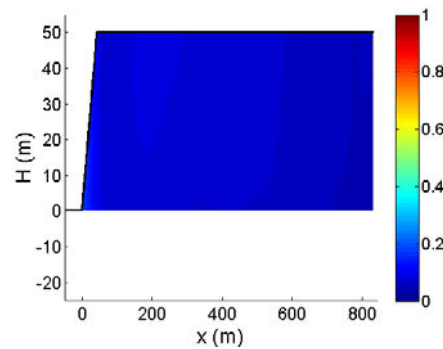


Figure 92. Représentation graphique de l'accélération horizontale normalisée (Ax) dans le versant pour le cas 8 : E , ν variables et η constant ($\eta = 0.1$)

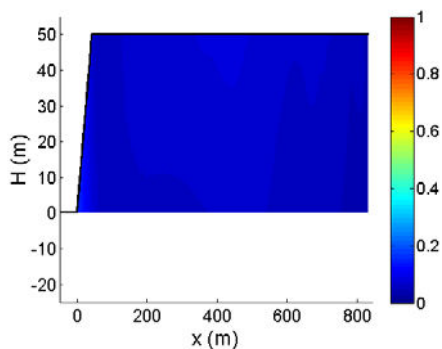
a) $E=1.2\text{GPa}$, $\nu=0.2$



b) $E=1.25\text{GPa}$, $\nu=0.2$



c) $E=1.3\text{GPa}$, $\nu=0.3$



d) $E=1.35\text{GPa}$, $\nu=0.35$

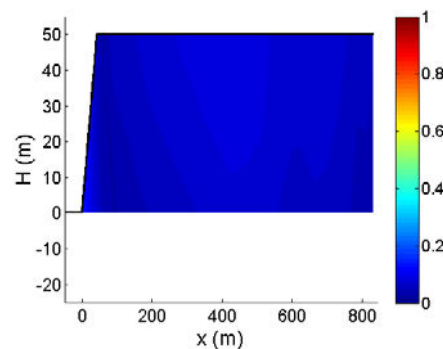


Figure 93. Représentation graphique de l'accélération verticale normalisée (Ay) dans le versant pour le cas 8 : E , ν variables et η constant ($\eta = 0.1$)

Au niveau de la réponse sismique globale du versant, la distribution spatiale globale des zones d'amplification et de « dés-amplification » au sein du massif de versant est très peu influencée par le changement de la valeur des paramètres intégrés, même pour le cas du coefficient de Poisson.

À titre d'exemple, la Figure 88 et la Figure 89 représentent respectivement la réponse sismique horizontale et verticale du versant pour le cas de changement des valeurs de H et F en gardant $\eta = 0.5$. On voit que des zones d'amplification et « dés-amplification » sont distribuées dans le massif de versant de manière identique. Les zones d'amplification horizontale faible ou modérée apparaissent le long de la surface en amont et dans le massif du versant. Les zones de forte d'amplification verticale se trouvent le long de la pente et de la surface en amont.

Dans le cas où la valeur du coefficient de Poisson change, la distribution des zones d'amplification et « dés-amplification » reste similaire, même s'il se présente une petite différence dans l'extension des zones d'amplifications. Comme observé dans le cas de changement des valeurs de H et ν (Figure 90, Figure 91), la seule zone d'amplification trouvée dans tout le massif de versant se situe en crête de la pente et il n'y a pas de zone d'amplification dans le massif de versant. On obtient les mêmes résultats sur la Figure 92 et la Figure 93 qui présentent les résultats quand les valeurs de E et ν changent.

2.2.3.3. Conclusion

Dans le but d'identifier, parmi les 5 paramètres intégrés dans la formule de la fréquence adimensionnelle, ceux qui ont un effet sur le phénomène (hors l'effet principal de la propre fréquence adimensionnelle), 80 simulations numériques ont été réalisées sur les modèles de même pente (50°) avec les deux valeurs de η étudiées : 0.1 et 0.5. Les résultats des calculs numériques permettent de conclure que :

- Pour les modèles de versant de même valeur de fréquence adimensionnelle et de même pente, quelles que soient les valeurs de H , E , F , ρ , les résultats obtenus sont toujours identiques.
- Pour une valeur de fréquence adimensionnelle constante, une variation du coefficient de Poisson entre 0.2 et 0.35 (pour des roches et des sols) entraîne des modifications de la réponse sismique du versant. Cette modification peut concerner quelques-uns ou tous les critères d'étude, tous dépendant de la valeur de la fréquence adimensionnelle.
- La distribution spatiale des zones d'amplification et « dés-amplification » dans le massif du versant est contrôlée principalement par la fréquence adimensionnelle. Elle est très faiblement influencée par la variation du coefficient de Poisson et n'est quasiment pas influencée par la variation indépendante d'un des autres paramètres intégrés.

2.2.4. Étude de l'impact du coefficient de Poisson

2.2.4.1. Problématique

D'après l'étude paramétrique réalisée dans la partie 2.2.3, le coefficient de Poisson est le seul, parmi les cinq paramètres intégrés dans la formule de la fréquence adimensionnelle, qui peut produire un effet secondaire défini comme un effet supplémentaire à l'effet principal de la fréquence adimensionnelle.

Cependant, son influence concrète sur chaque critère d'interprétation n'est pas encore clarifiée. De plus, une interaction entre cet effet et les effets des autres paramètres comme la fréquence adimensionnelle et la pente doit être considérée.

2.2.4.2. Analyse paramétrique

Des simulations numériques ont été effectuées pour étudier l'effet du coefficient de Poisson. Pour un modèle de versant avec une pente donnée, on a fait varier la valeur de ν et la valeur d'un autre paramètre intégré (e.g. module d'Young E) de sorte que la fréquence adimensionnelle reste constante. Dans le but d'étudier l'effet particulier du coefficient de Poisson en interaction avec des paramètres comme la pente et la fréquence adimensionnelle, ces simulations sont répétées plusieurs fois avec différentes valeurs de fréquence adimensionnelle et avec des versants de différentes pentes comme présentées dans le Tableau 9. Il y a alors 44 cas de calcul. Pour chaque cas, on réalise 4 simulations avec les 4 valeurs du coefficient de Poisson $\nu = 0.2 ; 0.25 ; 0.3 ; 0.35$. Au total 176 simulations numériques ont été effectuées. Les résultats obtenus sont évalués en étudiant la variation des critères d'interprétation : A_x , A_y , pS_A , pS_{AS} , H_x , Dxc .

Les résultats de calcul présentant l'influence de la variation du coefficient de Poisson sur les différents critères sont donnés dans les graphiques de la Figure 94 à la Figure 99. De plus, la Figure 100 présente également un exemple détaillé pour le cas des versants de fréquence adimensionnelle moyenne ($\eta = 0.5$).

Tableau 9. Valeurs des pentes, des fréquences du signal sismique et des fréquences adimensionnelles utilisées pour étudier l'effet secondaire du coefficient de Poisson

$\alpha(^{\circ})$	F (Hz)	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	η	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
30		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
50		12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
70		23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
90		34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44

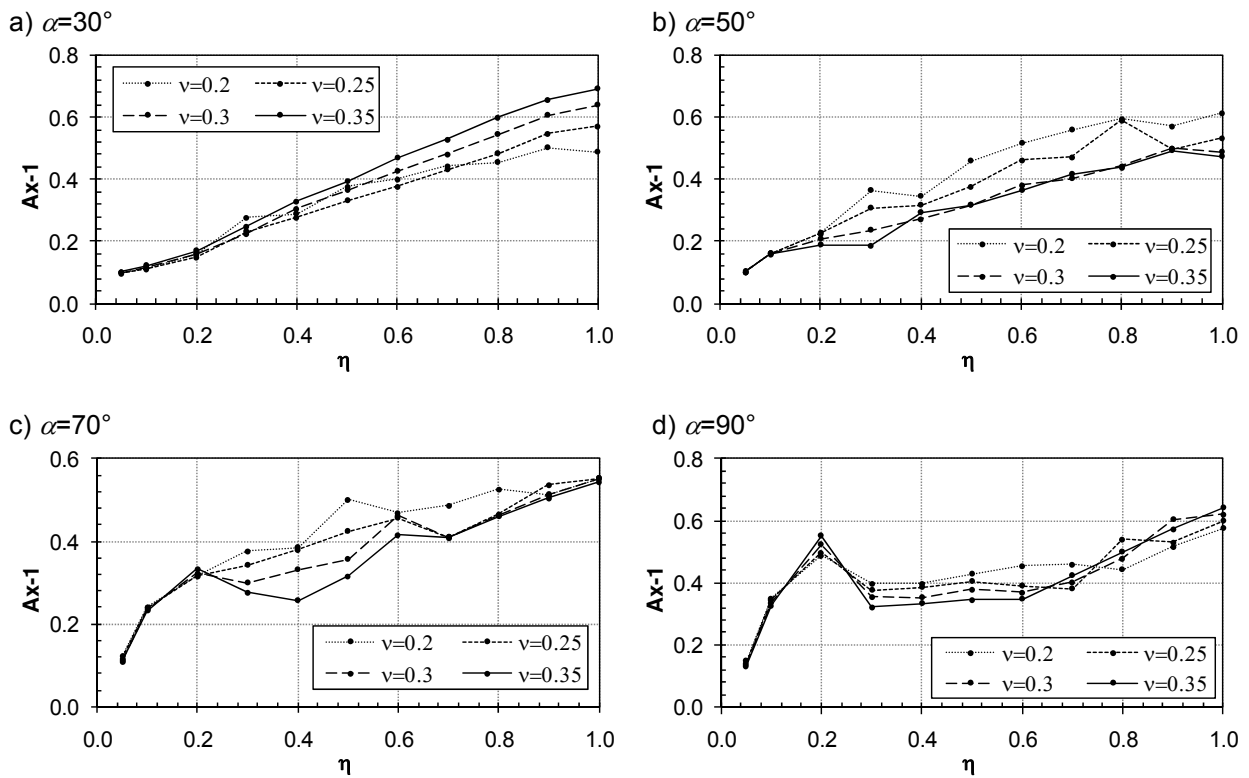


Figure 94. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur le facteur d'amplification horizontale A_x pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

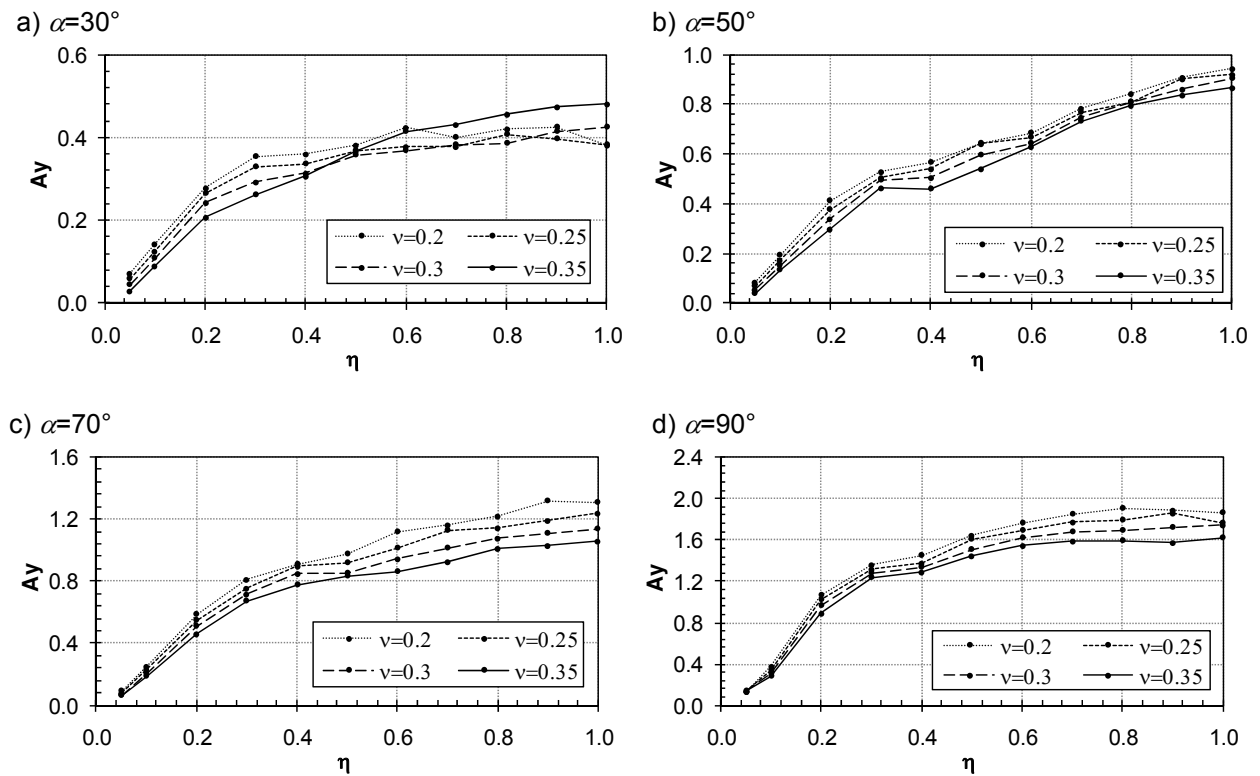


Figure 95. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur le facteur d'amplification verticale A_y pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

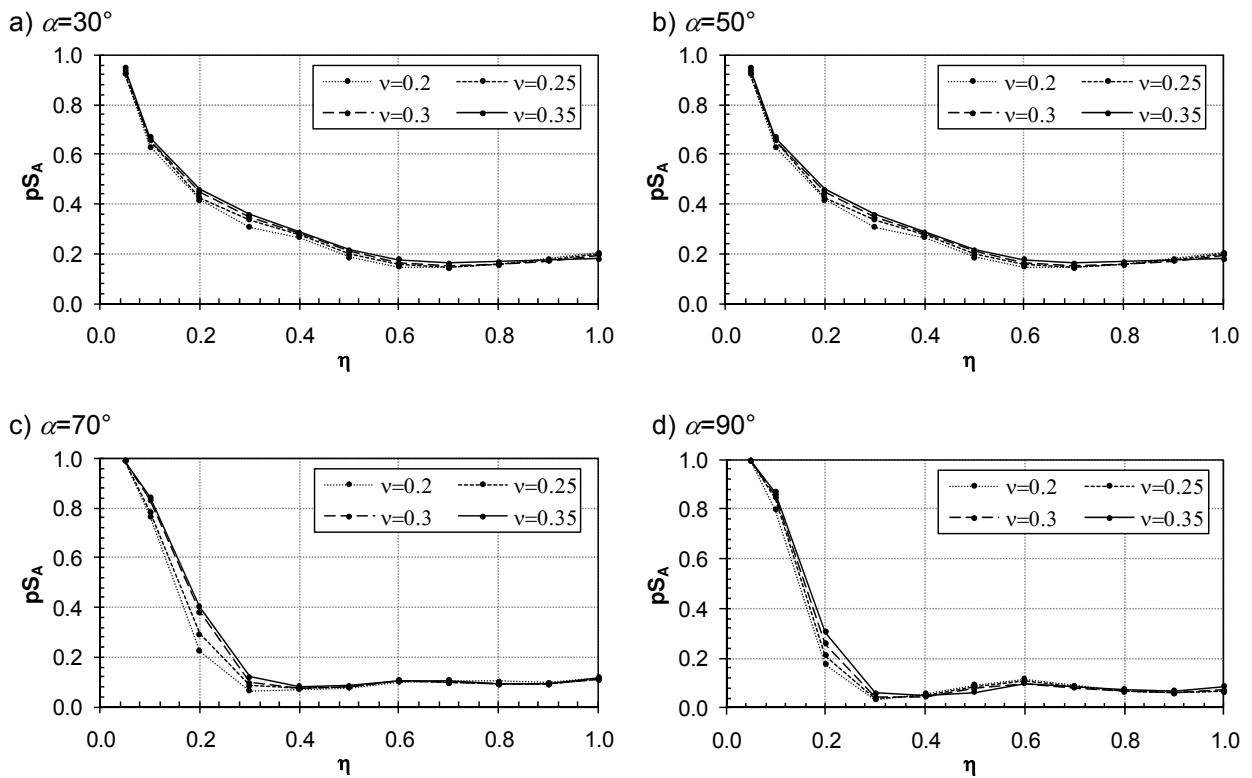


Figure 96. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur le rapport pS_A pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

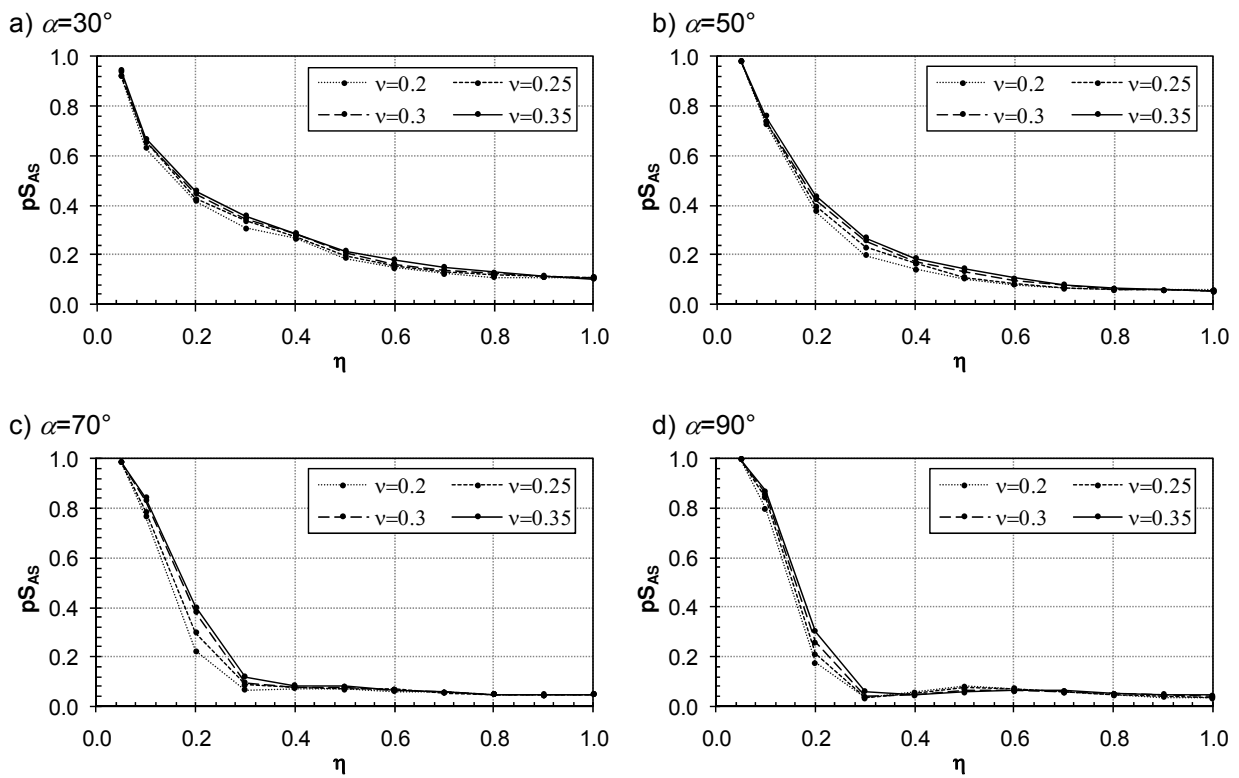


Figure 97. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur le rapport pS_{As} pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

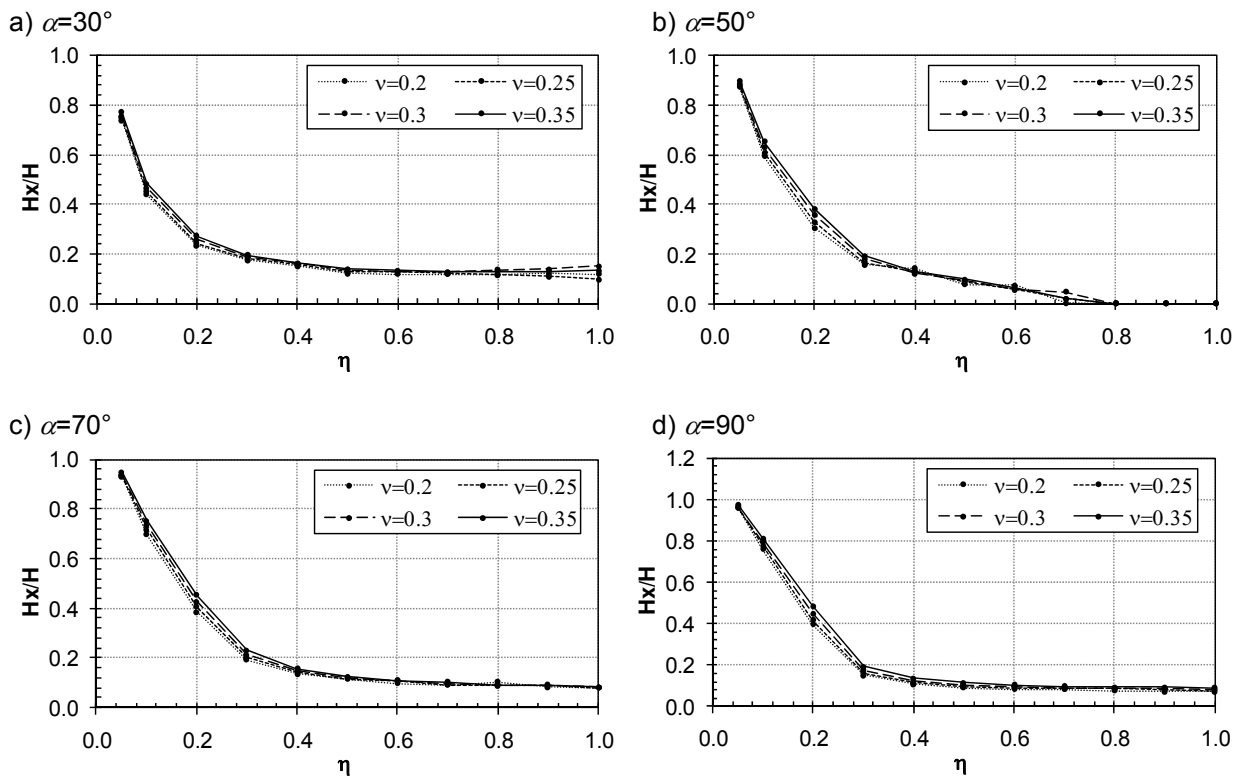


Figure 98. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur la hauteur H_x pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

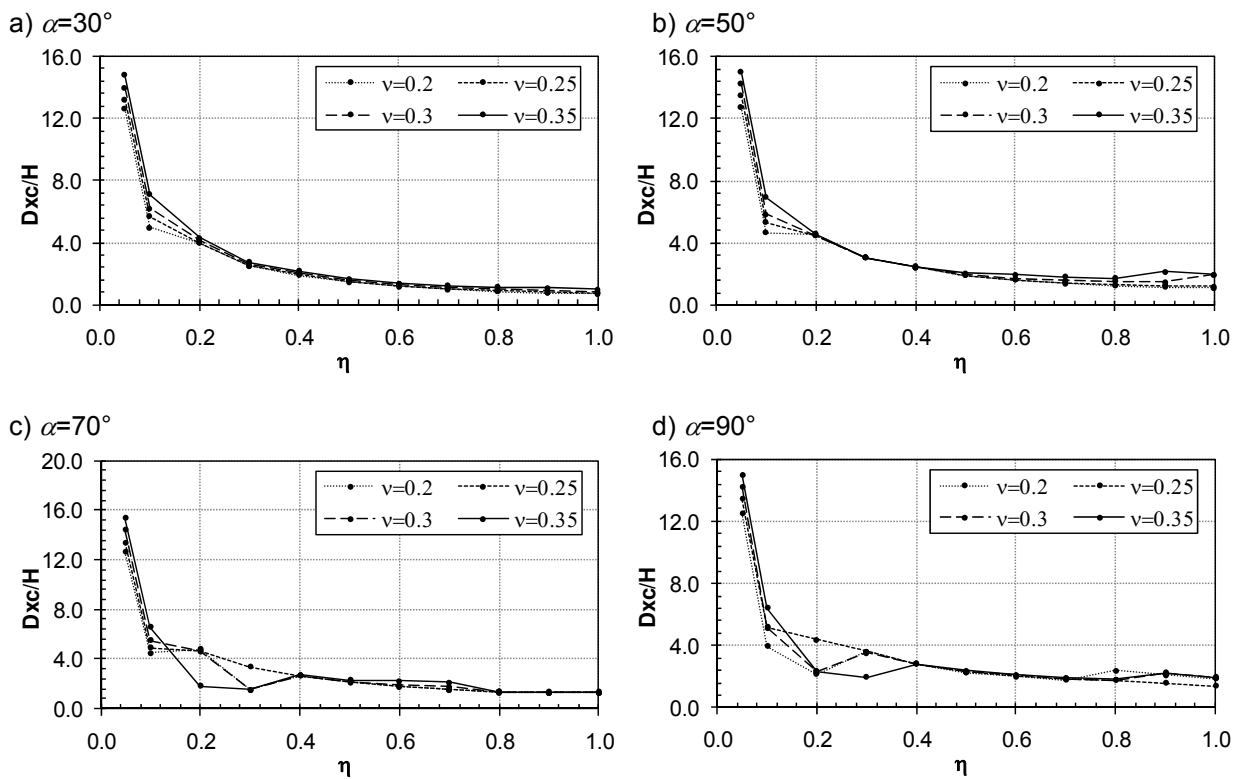


Figure 99. Influence du coefficient de Poisson (ν) sur la largeur D_{xc} pour les versants de pentes différentes (α) et différentes fréquences adimensionnelles (η)

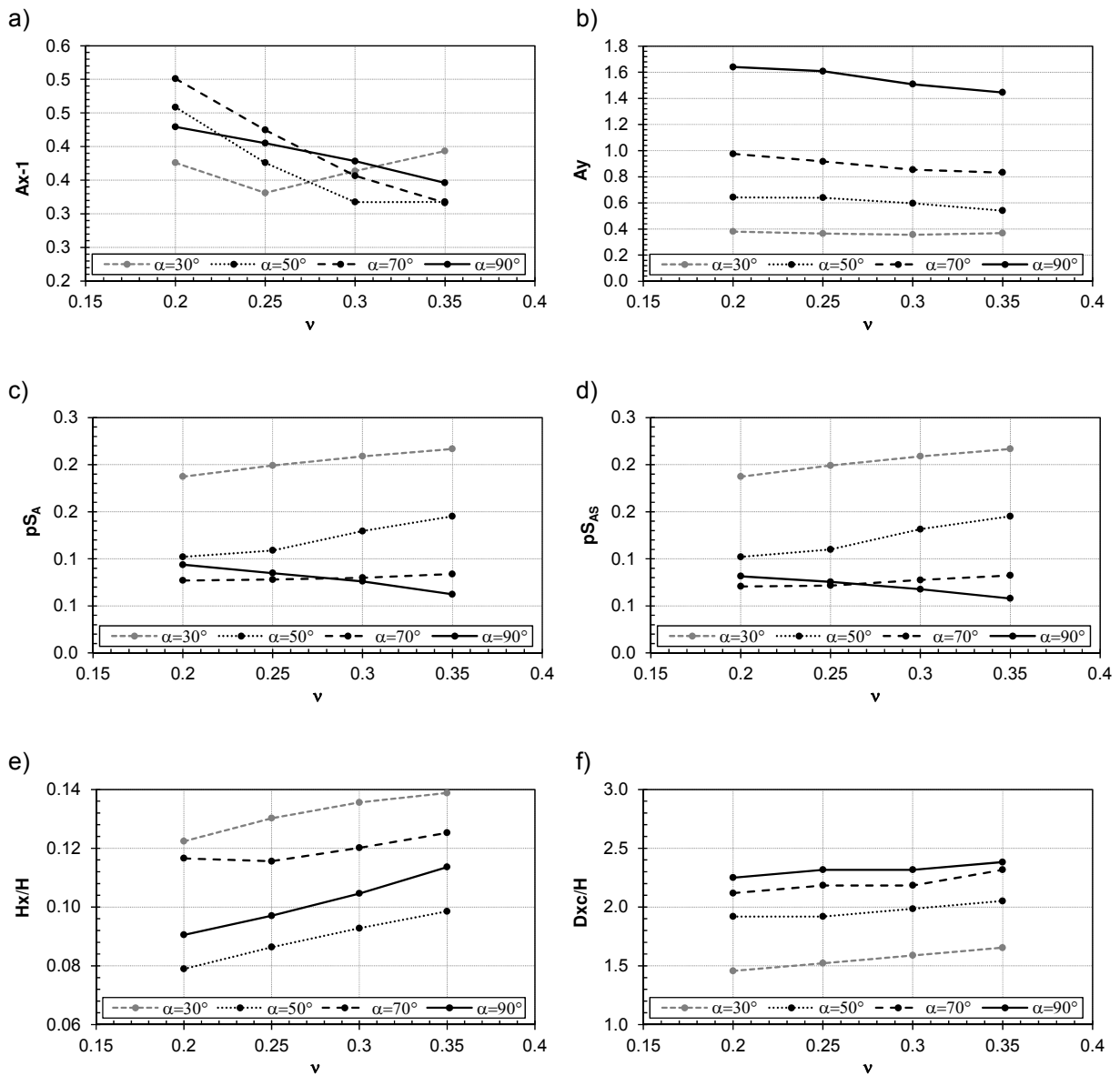


Figure 100. Variation des critères d'étude en fonction du coefficient de Poisson pour les versants de pentes différentes ($\alpha = 30^\circ ; 50^\circ ; 70^\circ ; 90^\circ$) et de $\eta = 0.5$

On trouve que les facteurs d'amplification (Ax , Ay) ont tendance globalement à diminuer avec l'augmentation du coefficient de Poisson notamment pour les versants de la pente modérée ($\alpha = 50^\circ$) ou élevée ($\alpha = 70^\circ, 90^\circ$). Cette remarque n'est pas applicable pour le versant de faible pente par exemple $\alpha = 30^\circ$. Ce phénomène est bien montré dans la Figure 100a et b dans lesquelles la variation des facteurs d'amplification ($Ax-1$, Ay) du versant de 30° est quasiment indépendante de la variation du coefficient de Poisson. Au contraire, une tendance à la diminution est bien observée pour les versants de pente plus raide.

Pour les critères caractérisant l'aire des zones en amplification et potentiellement instables (pS_A , pS_{AS} , Hx , Dxc), on observe que ces critères ont tendance à augmenter avec l'augmentation du coefficient de Poisson notamment pour les versants de pente raide. Ceci signifie que plus le coefficient de Poisson est élevé plus la zone affectée par l'amplification

est large. Les graphiques *c*, *d*, *e* et *f* de la Figure 100 présentent un exemple de versant avec $\eta = 0.5$. On voit bien que tous les critères augmentent avec le coefficient de Poisson.

2.2.4.3. Évaluation générale de l'impact du coefficient de Poisson

Le graphique dans la Figure 101 présente les valeurs du CV (coefficient de variation) calculées pour les cas du Tableau 9. La base de données contient au total :

- 44 cas x 4 valeurs du coefficient de Poisson = 176 simulations
- 176 simulations x 6 critères d'analyse = 1056 valeurs de résultats

Toutes les quatre variations du coefficient de Poisson, on calcule une valeur du CV. Dans le graphique de la Figure 101, on a alors au total:

- 1056 valeurs de résultats / 4 = 264 valeurs du CV

Il faut noter que, pour les 264 points présentés dans la Figure 101, il n'y a que 149 points ($\approx 56\%$) correspondant à des valeurs de CV supérieures à 6%. Ce sont les cas où la variation du coefficient de Poisson est la raison principale de la variation des résultats.

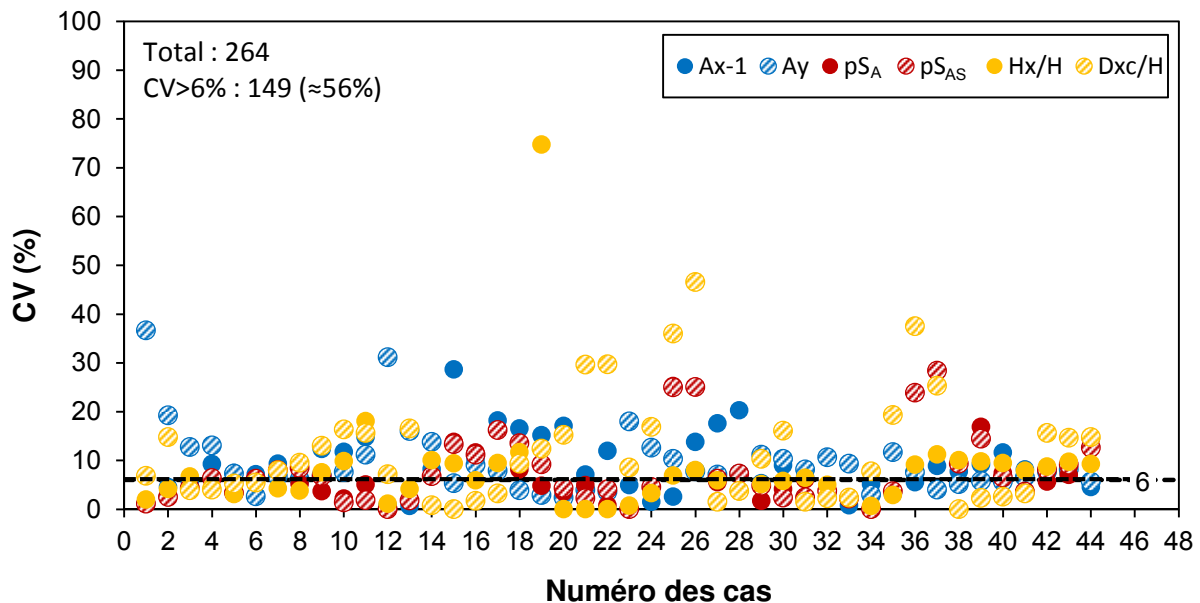


Figure 101. Évaluation de la dispersion des résultats des calculs numériques en réponse à une variation du coefficient de Poisson

Les valeurs de CV (%) obtenues doivent subir ensuite une réduction de 6 (%) pour isoler les effets numériques. Les valeurs de CV* sont finalement présentées dans le graphique de la Figure 102. Pour les cas où l'effet du coefficient de Poisson est significatif (CV > 6 %, 149 cas), on obtient une dispersion moyenne de 7% et une grande majorité des cas ($\geq 95\%$) ont une dispersion inférieure à 25% quand la valeur du coefficient de Poisson varie entre 0.2 et 0.35.

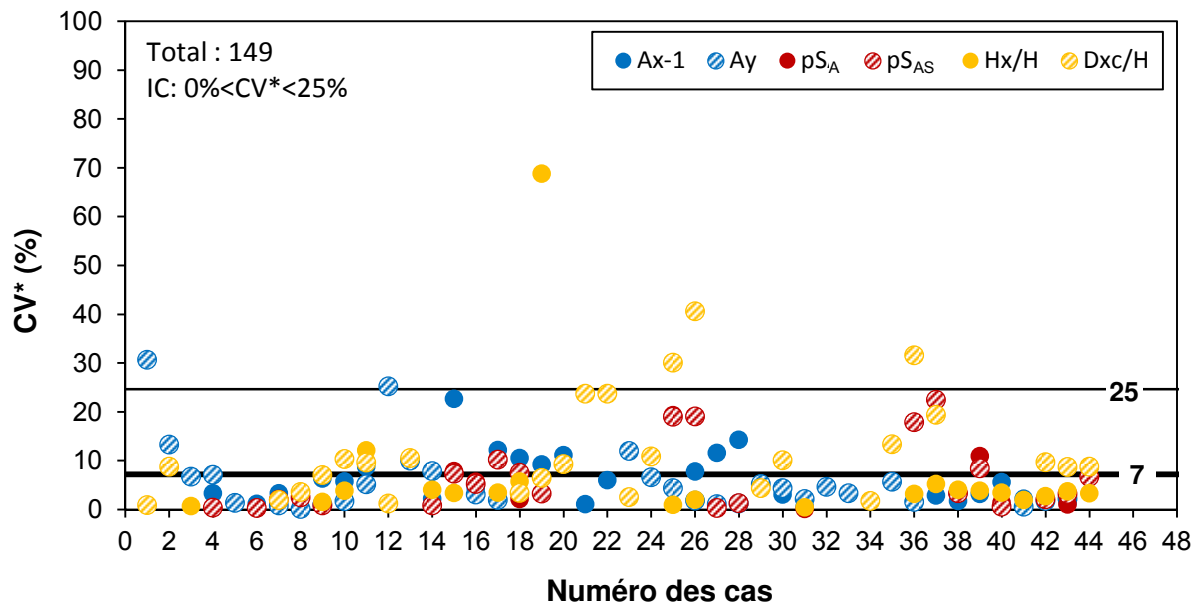


Figure 102. Évaluation de la dispersion de résultats des critères d'interprétation purement causée par la variation du coefficient de Poisson

2.2.4.4. Conclusion

Les résultats des simulations numériques permettent de conclure que la variation de la valeur du coefficient de Poisson donne un effet sur la réponse sismique du versant même si la fréquence adimensionnelle et la pente restent constantes.

Plus le coefficient de Poisson est élevé, plus la valeur maximale de l'accélération (horizontale et verticale) diminue et plus la surface affectée par l'amplification est étendue. Il est nécessaire de noter que ce n'est pas toujours le cas pour les versants de faible pente ($\alpha \leq 30^\circ$).

Comme l'intervalle de variation de la valeur du coefficient de Poisson est relativement faible pour les matériaux géologiques ($\nu = 0.2 \div 0.35$), son impact est ainsi moins significatif notamment en comparaison avec l'effet de fréquence adimensionnelle et l'effet de la pente. Cette analyse montre qu'une variation de ν dans l'intervalle de 0.2 et 0.35 peut produire une dispersion de résultats moyenne de 7 %, mais dans la plupart des cas, la dispersion ne dépasse pas 25 %.

2.2.5. Étude de l'effet de la courbure en crête et au pied du versant

2.2.5.1. Problématique

Un versant avec profil anguleux au sommet et en pied comme celui qui a été étudié jusqu'à présent est plutôt réaliste dans le cas des falaises. Cependant, le plus souvent, le sommet et le pied de la pente sont des endroits particulièrement touchés par l'érosion et le pied de la pente est un lieu où s'accumulent des éboulis. C'est pourquoi ils présentent généralement un contour arrondi plutôt qu'anguleux. De plus, la courbure de la crête et du pied est très différente et variable en fonction des caractéristiques des matériaux et des types de structure géologique. Il faut également observer que les zones anguleuses peuvent favoriser une concentration de contraintes qui peut parfois conduire à des résultats peu réalistes. Alors, la question posée est : le profil anguleux ou arrondi du versant, en crête et en pied, a-t-il une influence significative sur la réponse sismique du versant ?

2.2.5.2. Analyse paramétrique

Une étude paramétrique portant sur l'effet de la courbure morphologique en crête et en pied du versant a été réalisée sur les modèles de versant de pente 50° et de 50 m de hauteur. Différents rayons de courbure ($R = 0 ; 5 ; 10 ; 20$ m) ont été testés pour deux cas de fréquence adimensionnelle $\eta = 0.1$ et 0.5 . Les résultats obtenus sont présentés dans le graphique de la Figure 103 sous forme de valeurs normalisées : les valeurs des critères d'études (A_x , A_y , pS_A , pS_{AS} , H_x/H , D_{xc}/H) obtenus pour des versants de morphologie arrondie ($R = 5 ; 10 ; 20$ m) sont normalisées par ceux obtenus pour des versants anguleux ($R = 0$). Alors, plus la valeur normalisée est proche de 1.0 plus la réponse du versant arrondi est proche de celle du versant anguleux. Dans ce graphique, pour chaque critère d'étude, les trois premières valeurs correspondent à la fréquence $\eta = 0.1$ et les trois dernières pour $\eta = 0.5$. Dans chacun de ces deux groupes, ces valeurs correspondent dans l'ordre aux cas de $R = 5, 10$ et 20 m.

On observe que la plupart des points sur le graphique sont situés dans un intervalle de valeur normalisée 0.8 à 1.2. Ceci signifie que l'écart relatif entre ces deux morphologies ne dépasse pas 20 %. Dans ce graphique, il y a un point particulier qui se situe très loin de la valeur 1.0. Il correspond à la valeur de H_x du cas de rayon de courbure $R = 20$ m et une fréquence adimensionnelle $\eta = 0.5$. Cette différence peut être expliquée grâce à la Figure 105. Dans la Figure 105a ($R = 0$), une toute petite zone amplifiée est présente en crête du versant, celle-ci donne une valeur faible mais non nulle de H_x ($H_x/H = 0.08$). La même observation peut être faite pour les versants de rayon de courbure faible et modéré ($R = 5$ m et 10 m). Par contre, dans la Figure 105d, en raison de l'existence d'une courbure très élevée en crête du versant ($R = 20$ m), cette zone a disparu, la valeur de H_x dans ce cas est égale à zéro. Cependant, d'un point de vue général, la distribution spatiale des zones d'amplification et de « dés-amplification » dans les massifs de versant présentant différents rayons de courbe est quasiment identique, comme montré dans la Figure 104 et la Figure 105.

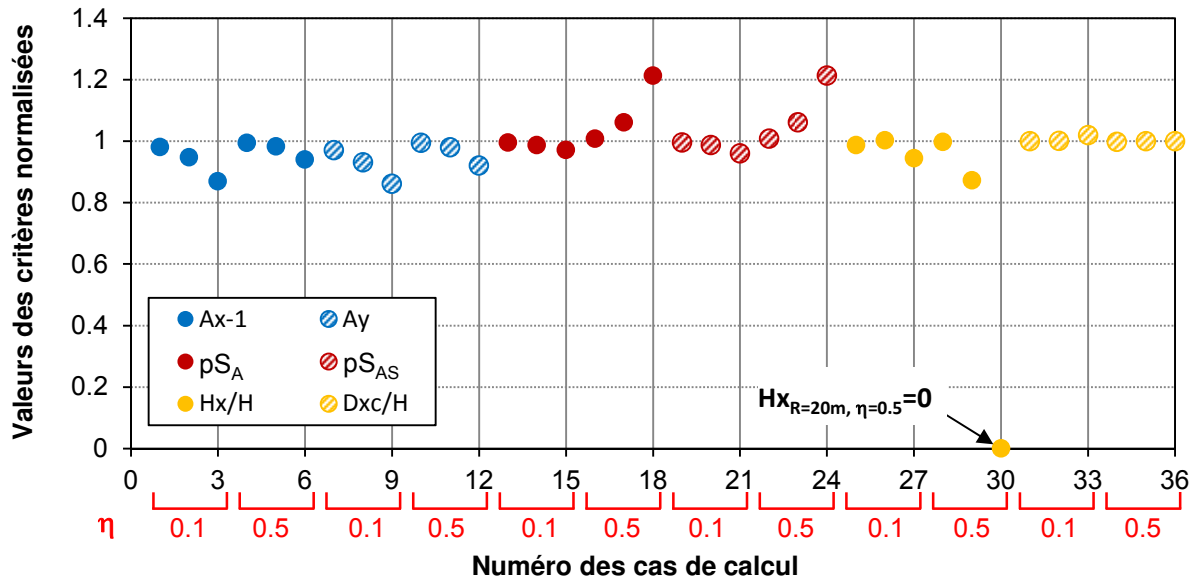


Figure 103. Valeurs des critères d'étude obtenues pour les versants de profils arrondis ($R \neq 0$) normalisés par celles des versants de profil anguleux ($R = 0$)

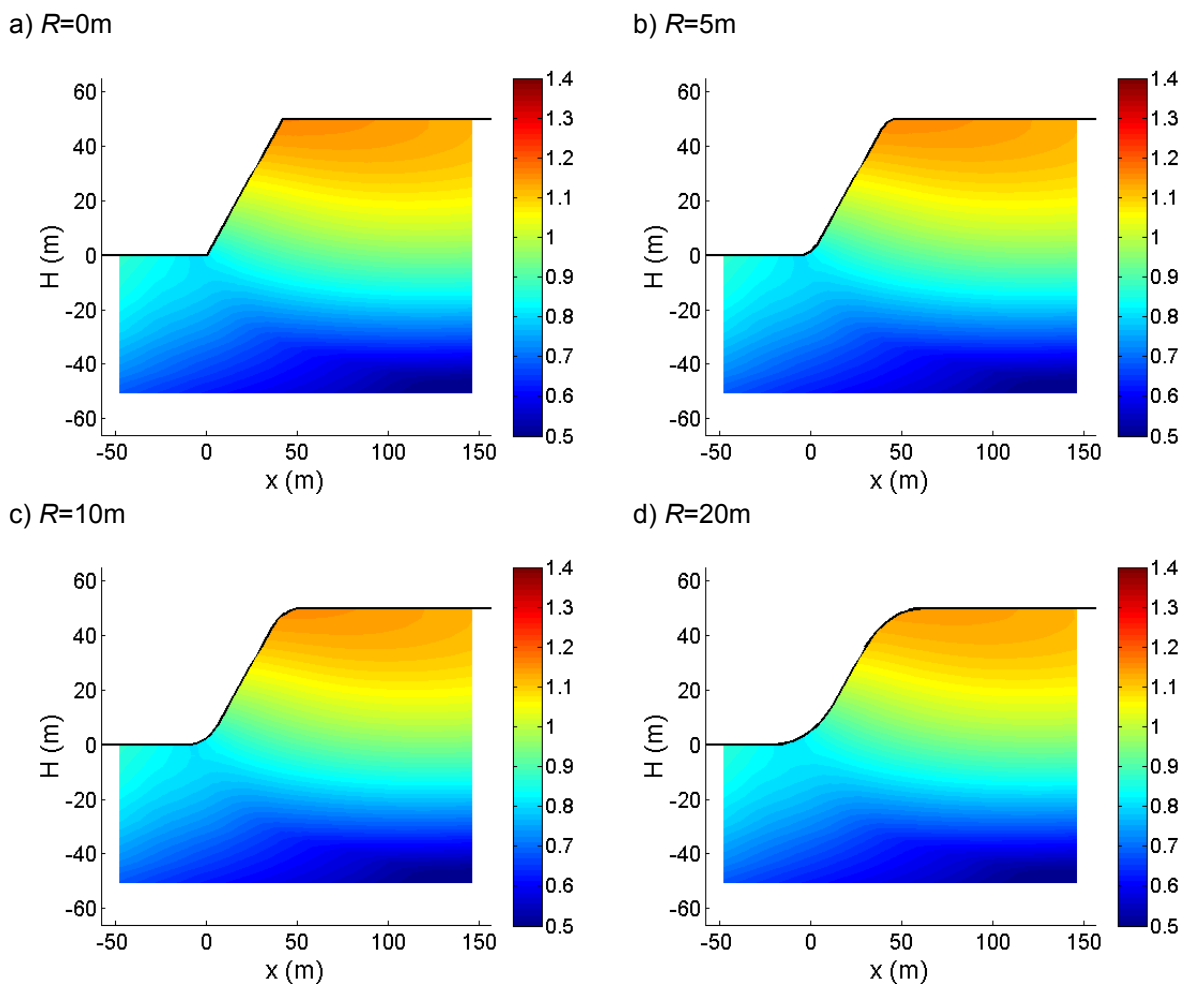


Figure 104. Distribution spatiale de l'amplification horizontale dans les modèles de versant présentant différentes courbures en crête et en pied pour le cas $\eta = 0.1$

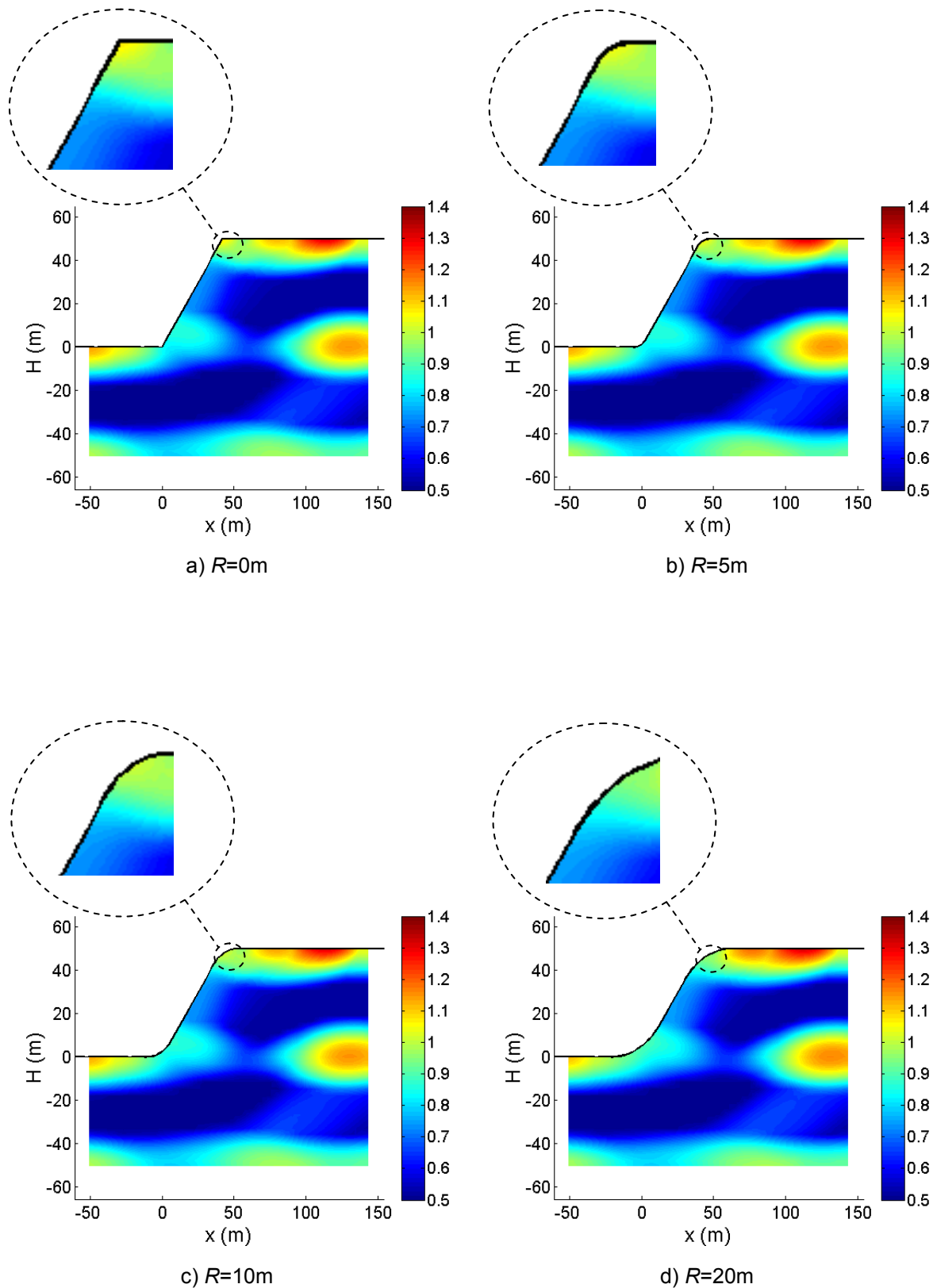


Figure 105. Distribution spatiale de l'amplification horizontale dans les modèles de versant pour différentes courbures en crête et en pied pour le cas $\eta = 0.5$

2.2.5.3. Évaluation générale de l'effet de la courbure

Pour les 8 simulations réalisées dans cette étude, on a :

8 simulations x 6 critères d'interprétation = 48 valeurs de résultats

Une valeur de CV est calculée pour les résultats de chaque groupe de 4 rayons de courbure ($R = 0 ; 5 \text{ m} ; 10 \text{ m} ; 20 \text{ m}$). On a ainsi 12 valeurs de CV correspondant à deux fréquences adimensionnelles considérées : 0.1 et 0.5. Ces résultats sont présentés dans la Figure 106 sur laquelle on observe que parmi les 12 points, il y a seulement 5 points dont les valeurs sont supérieures à 6 %, (la dispersion causée par les erreurs numériques). Ceci signifie que l'effet de la variation de la courbure morphologique n'est visible que sur 42 % des résultats obtenus. Il faut rappeler que le calcul de CV ne prend en compte que les résultats positifs. La valeur nulle (comme le cas $Hx_{R=20, \eta=0.5} = 0$) n'est pas prise en compte car elle augmente de manière non réaliste le CV et en conséquence l'effet du paramètre.

Les 5 valeurs de $CV(\%)$ remarquées sont ensuite minorées par 6 (%) pour éliminer les éventuels effets numériques. La Figure 107 présente les résultats d'analyse réalisés sur ces valeurs de CV^* ($= CV-6$). On trouve que la dispersion moyenne de résultats produite par l'effet de la courbure morphologique est d'environ 1.7 % et l'intervalle de confiance est entre 0 et 4.6 %. Ces chiffres sont beaucoup plus faibles que ceux observés dans les études concernant la fréquence adimensionnelle, la pente et le coefficient de Poisson.

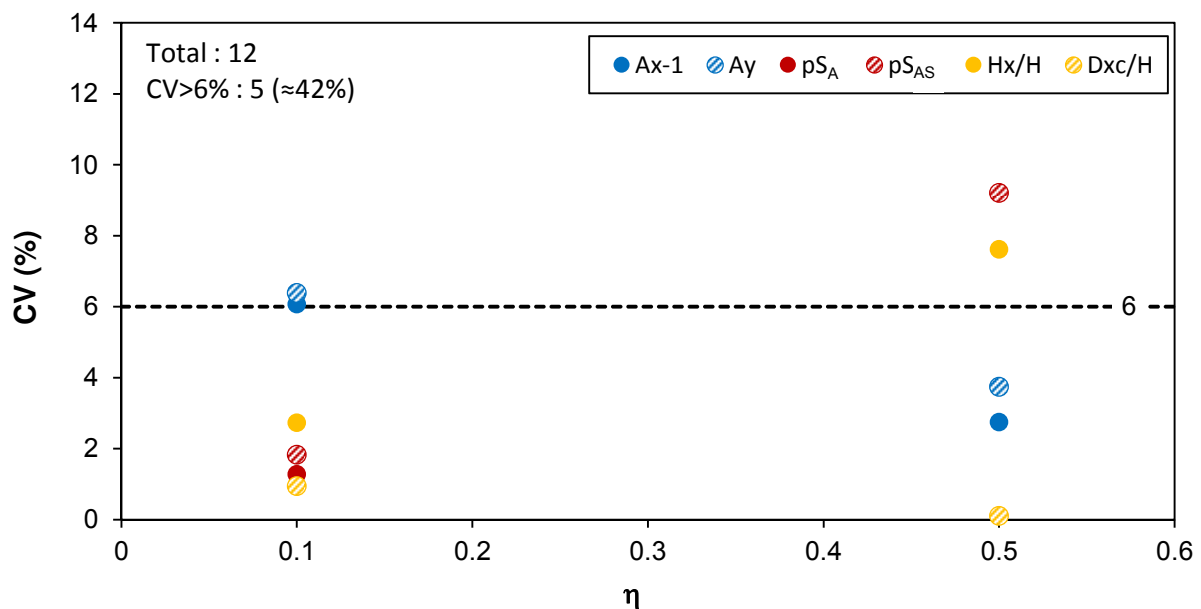


Figure 106. Évaluation de la dispersion des résultats ayant pour origine des calculs numériques et de la variation du rayon de courbure en crête et en pied

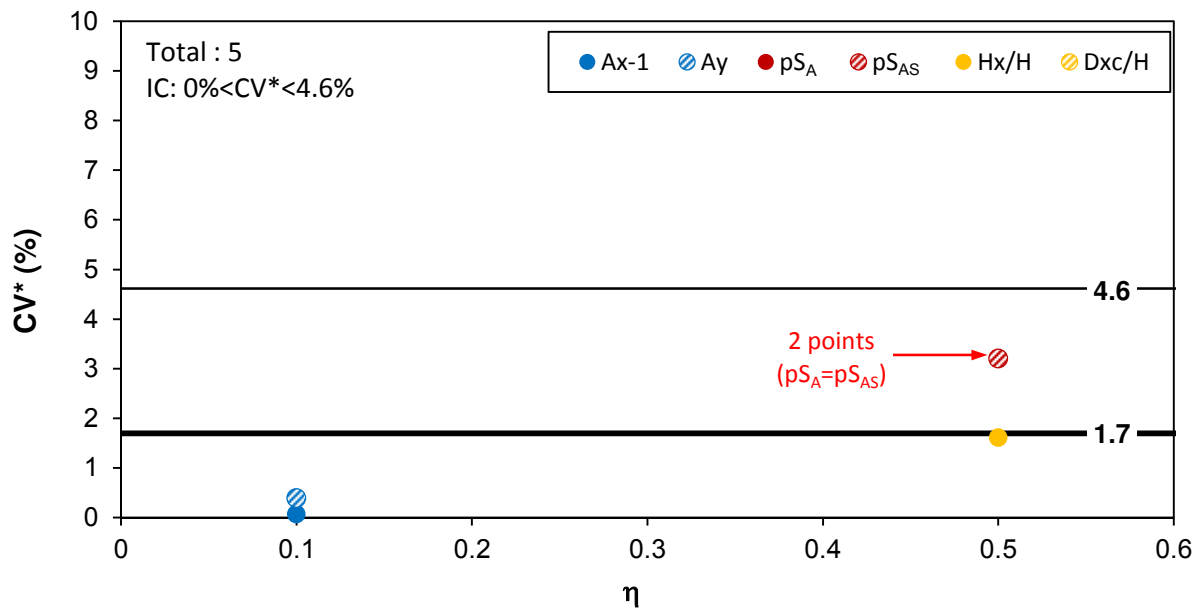


Figure 107. Évaluation de la dispersion des résultats purement causée par la variation du rayon de courbure en crête et en pied

2.2.5.4. Conclusion

En comparaison avec un modèle de versant anguleux, un versant dont le sommet et le pied de la pente présentent un rayon de courbure faible et modéré ($R \leq 0.2H$) peut donner lieu à des différences d'environ 10 % sur les résultats obtenus. Cet écart peut atteindre 20 % pour les valeurs de rayon de courbure très élevées ($R = 0.4 H$).

Cependant, d'un point de vue général, la prise en compte d'une courbure en crête et en pied du versant ne produit qu'un effet très faible sur la réponse sismique du versant. Plus précisément, une augmentation du rayon de la courbure entraîne une légère diminution des amplifications maximales, une légère augmentation de l'aire des masses d'amplification dans la région critique et une petite diminution de la hauteur de la zone d'amplification en crête. La largeur de la zone d'amplification en crête n'est pas affectée par l'effet de la courbure. Plus précisément, l'évaluation de l'effet de la courbure au travers du coefficient de variation permet de conclure qu'une variation du rayon de courbure, dans l'intervalle de 0 à $0.4 H$, ne produit qu'une petite différence dans les résultats inférieure à 4.6 %.

De plus, la distribution des effets de site topographiques dans l'ensemble du massif de versant n'est quasiment pas influencée par la présence d'une courbure au sommet ou à la base. La distribution spatiale des zones d'amplification et « dés-amplification » reste invariable. On peut donc conclure que la réponse sismique globale du versant n'est presque pas affectée par l'effet de la courbure en crête et en pied de la pente.

2.3. Conclusion générale du deuxième chapitre

Les analyses paramétriques ont permis d'identifier les paramètres importants qui affectent le développement et l'intensité des effets de site topographiques. Dans ce cadre, l'effet d'un paramètre est évalué en se basant sur sa capacité à faire varier les critères définis pour l'interprétation des résultats (A_x , A_y , pS_A , pS_{AS} , H_x , Dxc). Plus la variation d'un paramètre, évalué par le coefficient de variation CV^* , produit une différence significative des critères, plus son effet est important. Dans ce sens, la valeur moyenne de CV^* et l'intervalle de confiance de CV^* (IC) sont considérés comme les indicateurs principaux pour estimer l'impact de chaque paramètre. Le Tableau 10 récapitule les valeurs de ces indicateurs en fonction des différents paramètres influents considérés. Par ordre décroissant, on peut citer ces paramètres en fonction de leur impact sur les critères d'interprétation:

- La fréquence adimensionnelle (η) : l'impact de ce paramètre est le plus significatif parmi les paramètres étudiés. Pour cette raison, il peut être utilisé comme le paramètre principal pour estimer l'ampleur du phénomène d'effets de site topographiques.
- L'angle de la pente (α) : ce paramètre présente un effet sur presque tous les critères d'analyse. En particulier, son effet est assez fort pour le facteur A_y . D'une manière générale, l'effet de la pente est très prononcé et ne peut pas être négligé dans l'étude des effets de site topographiques.
- Le coefficient de Poisson (ν) : c'est le seul paramètre intégré dans le calcul de la fréquence adimensionnelle qui peut produire un effet supplémentaire qui s'ajoute à l'effet principal de la fréquence adimensionnelle. Son influence est cependant faible. Si on considère le CV^*_{moyen} comme indice principal pour évaluer l'impact de ce paramètre, l'effet du coefficient de Poisson est environ 12 fois plus faible que l'effet de la fréquence adimensionnelle et environ 5 fois plus faible que l'effet de la pente.
- Le rayon de la courbure morphologique (R) : ce paramètre n'a qu'un effet minime sur la réponse sismique du versant. Son effet est le plus faible parmi les paramètres étudiés.

Tableau 10. Récapitulatif des dispersions de résultats produites par l'effet de différents paramètres

Paramètres affectants	CV^*_{moyen}	$CV^*_{max} - CV^*_{min}$
Fréquence adimensionnelle (η)	81%	152%-9%=110%
Angle de la pente (α)	33%	66%-0%=66%
Coefficient de Poisson (ν)	7%	25%-0%=25%
Rayon de la courbure morphologique (R)	1.7%	4.6%-0%=4.6%

