



Effets topographiques bidimensionnels en sismologie : vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par une méthode en éléments-finis spectraux

Florent de Martin

► To cite this version:

Florent de Martin. Effets topographiques bidimensionnels en sismologie : vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par une méthode en éléments-finis spectraux. 9ème Colloque National AFPS 2015, Nov 2015, Champs-sur-marne, France. hal-01237417

HAL Id: hal-01237417

<https://brgm.hal.science/hal-01237417>

Submitted on 3 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Effets topographiques bidimensionnels en sismologie : vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par une méthode en éléments-finis spectraux

Florent De Martin*

* BRGM

Direction Risques et Prévention, Unité Risques Sismique et Volcanique
3, avenue Claude Guillemin, BP 36009 45060 Orléans Cedex 2 - France
f.demartin@bgm.fr

RÉSUMÉ. L'irrégularité de la topographie a une influence sur le mouvement sismique. Ces effets sont communément appelés « effets topographiques » et peuvent amplifier ou dé-amplifier le mouvement sismique enregistré au rocher. De nos jours, la prise en compte de ces effets topographiques dans les Eurocodes 8 est simplifiée. L'objectif de cette étude est de vérifier la validité de ces simplifications via des simulations en deux dimensions par une méthode en éléments-finis spectraux (code EFISPEC, <http://efispec.free.fr>). Après analyse des 500 simulations réalisées, il s'avère que certains coefficients sont ajustables pour une meilleure prise en compte de ces effets.

ABSTRACT. The irregularity of the topography has an influence on earthquake ground motion. These effects are commonly called "topographic effects" and can amplify or de-amplify the bedrock ground motion. So far, these effects are included in the Eurocode 8 in a simplified way. The objective of this study is to check the validity of these simplifications using two-dimensional spectral finite element simulations (code EFISPEC <http://efispec.free.fr>). Following the analysis of the 500 simulations performed, it is shown that some EC8 coefficients are adjustable to better take into account these effects.

MOTS-CLÉS : séisme, tremblement de terre, effets topographiques, versant, pente, butte, Eurocode 8, coefficient d'amplification, spectre de réponse, méthode en éléments-finis spectraux.

KEYWORDS: earthquake, topographic effects, slope, ridge, Eurocode 8, amplification factor, response spectrum, spectral element method.

1. Introduction

L'intérêt pour les effets de site topographiques commença lorsque de fortes accélérations furent enregistrées sur une crête proche du barrage de Pacoima (comté de Los Angeles, Californie) lors du séisme de 1971 de San Fernando, Californie (Boore, 1972 ; Bouchon, 1973). Dès lors un très grand nombre d'études, aussi bien observationnelles que numériques, ont été menées afin de mieux comprendre ces effets. Leurs conclusions sont exhaustivement répertoriées par Massa *et al.*, (2014) et Maufroyet *al.*, (2015a) et convergent sur les points suivants (liste non exhaustive) :

- Le mouvement sismique est amplifié au sommet des montagnes ou près du sommet d'une pente, et dé-amplifié au creux des canyons.
- La bande de fréquence où l'amplification est maximale correspond à des longueurs d'onde comparables aux dimensions horizontales du relief. Les effets topographiques deviennent négligeables si la longueur d'onde est très grande devant les dimensions du relief.
- Sur les flancs d'une montagne, l'amplitude du mouvement peut présenter de grandes variations spatiales, dues aux interférences entre ondes incidentes et ondes diffractées.

- Plus le ratio de forme (ou la pente) du relief est élevé(e), plus l'amplification du mouvement au sommet et les variations spatiales d'amplitude sur les flancs sont grandes.

À l'heure actuelle, ces effets topographiques mentionnés ci-dessus sont pris en compte de façon simplifiée dans l'Eurocode 8 (EC8). Ils sont décrits et quantifiés dans l'annexe A de la partie 5 : Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques. Cette annexe « fournit certains coefficients simplifiés d'amplification de l'action sismique, utilisés dans les vérifications de stabilité des pentes. Ces coefficients sont considérés, en première approximation, comme indépendants de la période fondamentale de vibration et multiplient par un facteur constant les ordonnées du spectre de réponse élastique de calcul donné dans l'EN 1998-1 :200X ».

L'objectif de cet article (synthétisant l'étude réalisée dans le cadre la convention 2011 n° 2100472261 entre Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie et le BRGM ; De Martin, 2012) est de vérifier la validité de ces coefficients (noté S_T dans l'EC8) en les confrontant à leurs homologues calculés numériquement en deux dimensions (2D) par une méthode en éléments-finis spectraux (Komatitsch, 1997). L'intérêt in-fine est d'obtenir des premières pistes et/ou recommandations sur l'applicabilité des coefficients d'amplification topographique de l'EC8, à savoir, par exemple :

- Est-ce que les valeurs de coefficients S_T proposées correspondent bien à la majorité des cas que l'on peut rencontrer ?
- Y a-t-il un nombre de cas significatifs où l'amplification due aux effets topographiques est sous-estimée ou surestimée ?
- Peut-on préciser certains termes qualitatifs de l'annexe A tels que « à proximité de la crête » ou encore « largeur de la crête notablement inférieure à la largeur de la base » ?

Pour ce faire, une étude paramétrique comportant plus de 500 simulations 2D a été réalisée sur les grandeurs caractéristiques d'une topographie définies selon l'EC8. Les simulations ont été lancées sur le serveur de calcul intensif du BRGM et ont représentées environ 10000 heures de calcul mono-cœur (soit 417 jours). Elles ont générées environ 1 To de données brutes réduites à environ 40 Go après post-traitement et compression. Seuls la méthodologie, le format des résultats et les conclusions sont présentés dans cet article. L'ensemble des résultats sont publics et accessibles via l'URL http://fdemartin.free.fr/topographic_effects/appendix-topographic-effects.zip.

En complément de cette étude réalisée en 2012, il est indispensable de mentionner les récents articles de Massa *et al.*, (2014) et Maufroyet *al.*, (2015a) dont les recherches, respectivement observationnelles et numériques, ont menées à des avancées importantes en terme de compréhension des effets topographiques. Le traitement des observations effectué par Massa *et al.*, (2014) montre que le champ d'onde tend à être polarisé dans la direction perpendiculaire à l'axe principal de la topographie (i.e., axe le plus long), direction dans laquelle l'amplification du mouvement du sol est maximale. À cela s'ajoute une conclusion intéressante montrant que la présence d'hétérogénéité structurale (e.g., fracturation selon un certain pendage) pourrait avoir une influence significative sur l'amplification du mouvement du sol. Avec une approche plus numérique, Maufroyet *al.*, (2015a) introduisent une nouvelle méthodologie pour prédire les amplifications topographiques. Leur analyse d'une base de données de mouvements du sol générés numériquement montre que la courbure de la surface (définie comme la seconde dérivée spatiale de la topographie) est corrélée avec l'amplification topographique.

2. Définition du problème en deux dimensions

La forme géométrique utilisée pour les simulations, aussi bien pour les pentes que pour les buttes, est une butte dont les longueurs caractéristiques sont définies en Figure 1a. Dans la suite de cet article, les pentes sont définies en tant que buttes avec un espacement suffisant entre chaque pente de la butte (i.e., une petite base 'b')

assez grande) pour qu'il n'y ait pas d'interaction entre les deux pentes de la butte. La réponse dynamique d'une butte en deux dimensions est complexe car elle dépend : du ratio H/λ , de l'angle α , du ratio b/H (ou b/B), du type d'onde incidente (SH ou SV), des propriétés élastiques du matériau constituant la butte et de l'angle d'incidence de l'onde.

Afin d'explorer la réponse dynamique en deux dimensions de différentes buttes dont la configuration est proche de celle décrite dans l'EC8, cette étude consiste à faire varier : le ratio H/λ avec $H \in [25, 50, 100]$ m, l'angle $\alpha \in [5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45]$ degrés, le ratio $b/H \in [1, 4, 8, 16]$ et le type d'onde incidente $\in [SH, SV]$.

L'influence de l'angle d'incidence n'a pas été étudiée en raison des contraintes temporelles de l'étude et de la complexité de l'implémentation d'une onde plane avec incidence non nulle sans génération d'ondes numériques parasites. Cependant, cet angle joue un rôle important dans la réponse dynamique d'une butte. L'influence des propriétés élastiques du matériau constituant la butte est étudiée implicitement via le ratio H/λ .

Pour les pentes et buttes homogènes, les paramètres élastiques sont caractéristiques d'un rocher de « bonne qualité » avec une vitesse d'onde S (V_s) de 1000 m/s, une vitesse d'onde P (V_p) de 1870 m/s (coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$) et une densité (ρ) de 2400 kg/m³. L'EC8 définit aussi des buttes recouvertes d'une couche plus lâche en surface (en Figure 1b). Ce type de problème a aussi été abordé dans De Martin, (2012) mais n'est pas présenté dans cet article de synthèse.

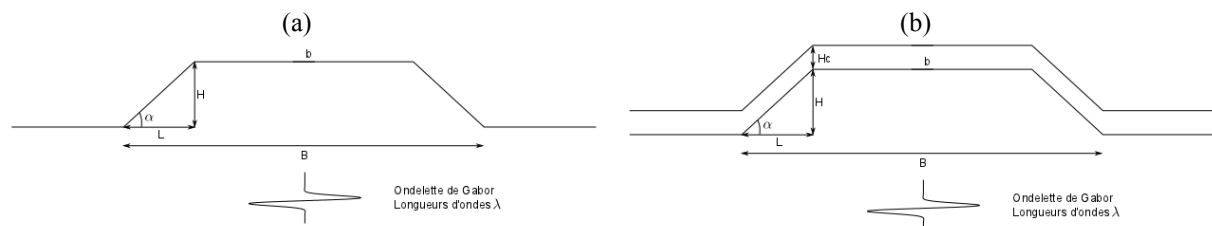


Figure 1. (a) Butte homogène et ses longueurs caractéristiques : 'H' sa hauteur, 'b' sa petite base, 'B' sa grande base. L'onde incidente est caractérisée par ses longueurs d'ondes (λ). (b) Butte homogène recouverte d'une couche plus lâche d'épaisseur 'Hc'.

3. Description des simulations par une méthode éléments-finis spectraux

3.1. Code de calcul et validité en fréquence

Les simulations sont réalisées avec le code de calcul « Eléments-Finis SPECTraux » (EFISPEC^{©BRGM}, <http://efispec.free.fr>). La bonne implémentation de la méthode en éléments-finis spectraux dans EFISPEC ainsi que la précision de la méthode ont été vérifiées sur plusieurs benchmarks dont les résultats sont présentés dans la littérature suivante : De Martin, (2011) ; De Martin *et al.*, (2013) ; Chaljubet *al.*, 2015 ; Maufroyet *al.*, 2015b. La Figure 2 montre la bonne précision des résultats obtenus sur le cas test « Layer Over Half-space 3 » défini par le « Southern California Earthquake Center ».

Pour cette étude, des éléments-finis spectraux munis de fonctions de base d'ordre 6 sont utilisés. Les différents maillages permettent des simulations valides jusqu'à 25 Hz ; fréquence à laquelle les longueurs d'ondes sont discrétisées par sept nœuds Gauss-Lobatto-Legendre. L'usage de sept nœuds par longueur d'onde avec cet ordre polynomial garantit des résultats sans dispersion numérique (De Basabe *et al.*, 2007).

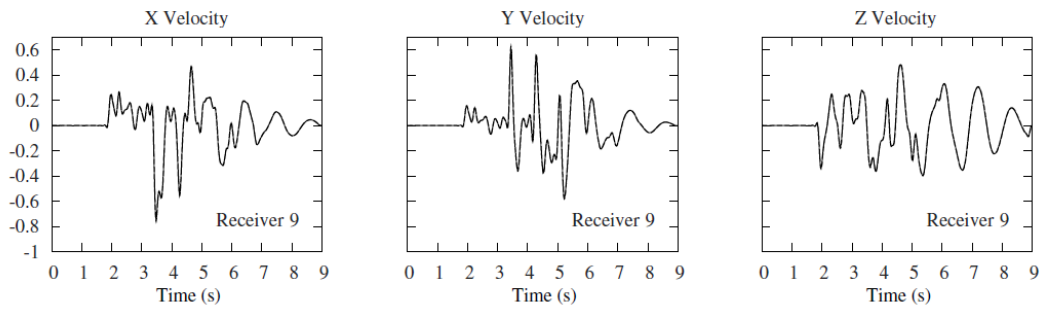


Figure 2. Cas test « Layer Over Half-space 3 » : comparaison des séismogrammes générés par la méthode semi-analytique « DiscreteWavenumber Method » (trait plein) et par le code EFISPEC (trait en pointillé).

3.2. Géométrie et maillage

Les angles des buttes sont légèrement arrondis afin de travailler sur une topographie plus réaliste (Figure 3a). Néanmoins, le fait d'utiliser des angles non arrondis ne change pas significativement la réponse dynamique de la topographie dans la gamme de fréquence étudiée [0,05 – 25] Hz. Le maillage est composé uniquement de quadrangles quadratiques à 9 nœuds géométriques afin de mieux épouser l'arrondi des angles (Figure 3b). Les bords verticaux du domaine sont des éléments périodiques afin d'assurer la bonne propagation des ondes de type SV (Figure 4).



Figure 3. (a) Butte avec angle arrondi. (b) maillage en quadrangles à 9 nœuds permettant une définition quadratique des arêtes des quadrangles.

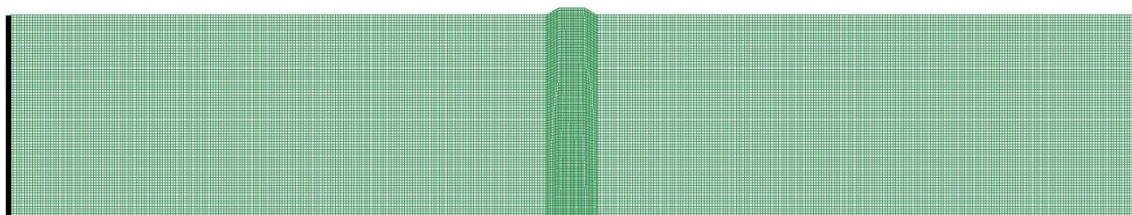


Figure 4. Exemple de domaine avec conditions de périodicité (trait plein noire) sur les bords verticaux.

3.3. Type et forme d'onde incidente

Pour toutes les simulations, l'hypothèse d'onde plane (de type SH ou SV) se propageant verticalement vers la surface libre est adoptée. La fonction de source (en vitesse) de l'onde incidente est une ondelette de Gabor de la forme (Equation 1) :

$$s(t) = e^{\frac{-(t-t_s)^2}{2\sigma^2}} \cos\left(\frac{2\pi(t-t_s)}{T}\right) \quad [1]$$

avec : t , la variable indépendante temporelle ; t_s , le temps de décalage de l'ondelette de Gabor (égale à 0.25 dans cette étude) ; σ , l'enveloppe de la Gaussienne (égale à 0.03) et T , la période du cosinus (égale à 0.3).

La Figure 5 montre l'ondelette de Gabor utilisée dans le domaine en temps et en fréquence. En accélération, sa fréquence prédominante est environ 6-7 Hz. L'ondelette génère de l'énergie à très basse fréquence et jusqu'à environ 20 Hz afin de ne pas générer des hautes fréquences au-delà de la limite de validité du maillage (25 Hz). Elle est insérée dans le domaine par le bord horizontal inférieur via des éléments paraxiaux (Modaresi, 1987) basés sur l'approximation paraxiale (Clayton *et al.*, 1977 ; Stacey, 1988). Pour le post-traitement des résultats, des récepteurs sont positionnés tous les 5 mètres en surface libre du domaine d'étude. Les grandeurs physiques écrites dans des fichiers numériques sont le déplacement, la vitesse et l'accélération du sol.

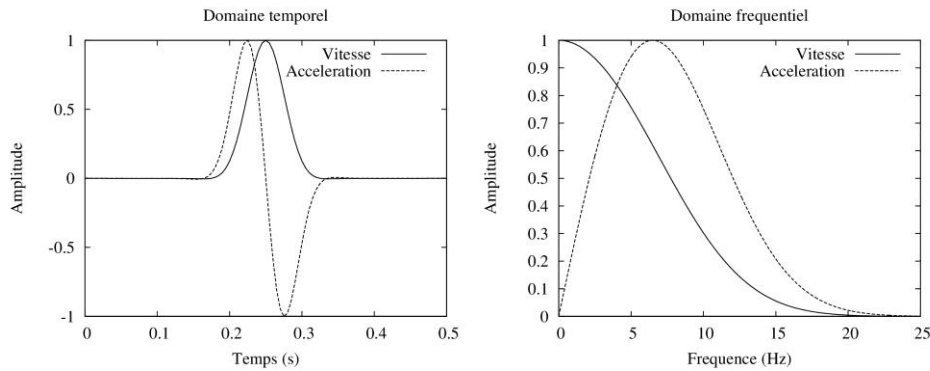


Figure 5. Ondelette de Gabor dans le domaine en temps (gauche) et en fréquence (droite) utilisée comme fonction de source de l'onde incidente.

De plus, afin d'évaluer l'influence de la forme de l'onde incidente sur le spectre de réponse en accélération (car un spectre de réponse est dépendant du contenu fréquentiel de l'onde incidente), deux signaux réels issus du réseau ITACA (ItalianACcelerometric Archive) enregistrés au rocher en champ proche (10 – 15 km) provenant de séismes de magnitudes 5.5 et 6 ont été utilisés. Sur le cas d'une butte homogène de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$. Le premier a été enregistré à la station ATQ lors du séisme de Val Comino en 1984. Sa fréquence prédominante est d'environ 4 Hz. Le second a été enregistré à la station GSA lors du séisme de l'Aquila en 2009. Son contenu fréquentiel est plus étalé que pour Val Comino avec un pic autour de 3-4 Hz. Ces résultats sont discutés dans De Martin, (2012).

4. Traitement des résultats : de la réponse spatio-temporelle 2D à la valeur scalaire des EC8

4.1. Représentation spatio-temporelle

Le problème de propagation d'onde traité dans cette étude est un problème aux dérivées partielles en espace et en temps. Une représentation complète des résultats sera donc dépendante de l'espace (ou du nombre d'onde) et du temps (ou de la fréquence). Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations avec les coefficients simplifiés de l'EC8, une représentation dite « simplifiée » est nécessaire pour synthétiser ces résultats spatio-temporels en une valeur scalaire unique pour chaque angle α des buttes définies par l'EC8.

Avant d'exposer le processus pour passer à cette représentation simplifiée, la représentation spatio-temporelle/fréquentielle est présentée ci-après. Chaque simulation est illustrée au format de la Figure 6 qui

présente les résultats normalisés par rapport au champ libre (dans cette étude égale à deux fois l'onde incidente) dans le domaine espace/temps ou espace/fréquence. Sur la Figure 6, de haut en bas sont représentés :

- Le ratio dans le domaine temporel entre l'accélération en surface libre pour chaque récepteur (espacé de 5 mètres) et la valeur absolue de l'accélération maximale en champ libre ; le maximum de ce ratio pour chaque récepteur ;
- La fonction de transfert de chaque récepteur (i.e., le ratio dans le domaine fréquentiel entre l'amplitude de Fourier en surface libre de la butte et l'amplitude de Fourier en champ libre). La fréquence du maximum de la fonction de transfert est indiquée par une ligne noire superposée à la fonction de transfert ; le maximum de la fonction de transfert pour chaque récepteur ;
- Le ratio dans le domaine fréquentiel entre le spectre de réponse absolue en accélération en surface libre de la butte pour chaque récepteur et le spectre de réponse absolue en accélération en champ libre ; le maximum de ce ratio pour chaque récepteur ;
- Le ratio entre le spectre de réponse absolue en vitesse en surface libre de la butte pour chaque récepteur et le spectre de réponse absolue en vitesse en champ libre ; le maximum de ce ratio pour chaque récepteur.

Les spectres de réponse sont calculés avec 5% d'amortissement. Concernant le spectre de réponse absolue en accélération, il est défini comme suit :

- Soit $\ddot{U}$ l'accélération du sol, $\ddot{u}$ l'accélération de la masse d'un oscillateur à un degré de liberté : le spectre de réponse absolue en accélération est défini par $S_a = \max_t |\ddot{u} + \ddot{U}|$;
- Ce spectre est très proches d'un spectre de réponse relative défini par $S'_a = \max_t |\ddot{u}|$.

Pour les ratios, une palette de rouges est utilisée pour indiquer les amplifications (i.e., ratios supérieurs à 1) et une palette de bleus est utilisée pour indiquer les dé-amplifications (i.e., ratios inférieurs à 1).

4.2. Représentation simplifiée

Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations avec les coefficients simplifiés de l'EC8, une simplification est nécessaire pour synthétiser des résultats spatio-temporels en une valeur unique pour chaque angle α d'une butte définie par l'EC8. Il est important de noter que cette simplification engendre une perte d'informations non négligeable, à savoir :

- La dépendance fréquentielle du coefficient d'amplification S_T ;
- La dépendance spatiale du coefficient d'amplification S_T .

Par définition, le coefficient S_T de l'EC8 s'applique comme facteur multiplicatif sur les ordonnées du spectre de réponse en accélération. Ainsi, pour chaque simulation, les spectres de réponse en accélération ainsi que les fonctions de transfert seront calculés en vue d'être simplifiés.

La Figure 7 illustre le format de cette simplification. Pour l'obtenir, dans un premier temps les moyennes (« mean » sur la Figure 7) sont calculées pour chaque récepteur en effectuant la moyenne entre les périodes T1 et T2 sur axe logarithmique :

$$X_{Moyen} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} X(T) d(\ln T)}{\int_{T_1}^{T_2} d(\ln T)} \approx \frac{\sum_i X(T_i) \frac{\Delta T_i}{T_i}}{\sum_i \frac{\Delta T_i}{T_i}} \quad [2]$$

Cette intégrale a la propriété d'avoir un résultat identique que l'on intègre en période ou en fréquence. Les périodes d'intégration T1 et T2 ont été choisies pour couvrir au mieux les fréquences de résonances des ouvrages de génie civil.

Dans un second temps, le maximum des moyennes calculées par l'Equation 2 pour tous les récepteurs est utilisé pour comparaison avec les coefficients S_T de l'EC8. Cette simplification a donc pour effet de perdre

l'information en espace et de réduire l'information en période aux périodes intéressantes pour la dynamique des structures.

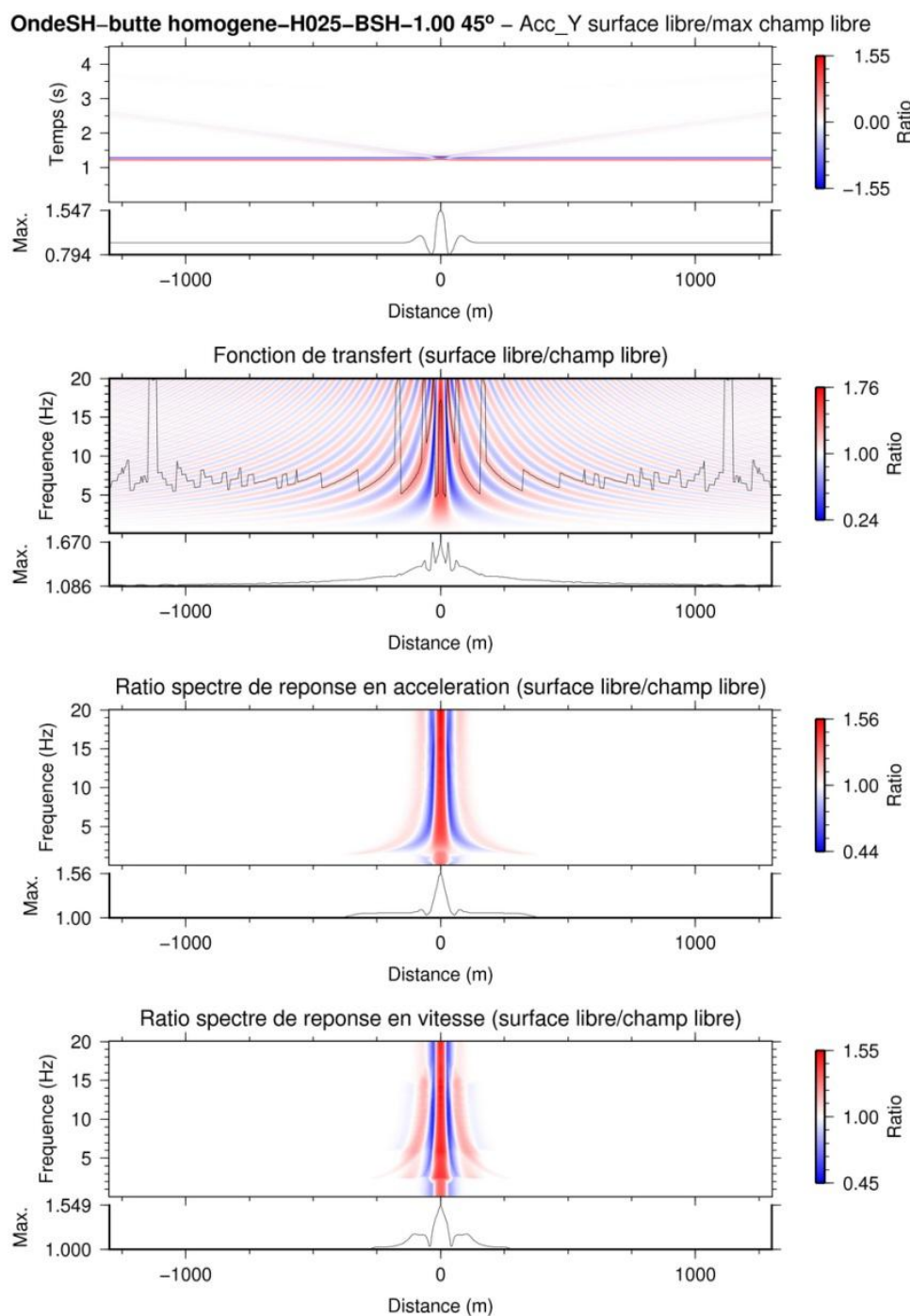


Figure 6.Exemple de représentation spatio-temporelle/fréquentielle tracée pour chaque simulation.

5. Discussions des résultats

Aux regards des résultats de l'ensemble des simulations (non montré dans cet article) et sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol :

- Les illustrations au format de la Figure 6 suggèrent que l'hypothèse d'appliquer un coefficient S_T constant sur toute la gamme de fréquence du spectre de réponse est une hypothèse valide si l'on considère un ratio des spectres de réponse en accélération absolue calculé pour un cas avec une onde incidente de forme simple (ex : ondelette de Gabor). Néanmoins : i) cette hypothèse est invalide si l'on considère la fonction de transfert ; ii) cette hypothèse est invalide si l'on considère un enregistrement réel comme onde incidente qui contient un spectre en fréquence plus riche qu'une ondelette de Gabor.
- Les illustrations au format de la Figure 7 montrent que les coefficients simplifiés de l'EC8 ont un ordre de grandeur satisfaisant pour des gammes de périodes considérées : 0.1 à 0.2 s (5 à 10 Hz), 0.2 à 0.7 s (1.4 à 5 Hz), 0.7 à 1.4 s (0.7 à 1.4 Hz).
 - Néanmoins, en regardant les résultats d'ondes SH et SV, les coefficients EC8 ont tendance à sous-estimer (d'environ 5 à 15%) l'amplification pour des structures ayant une fréquence de résonance élevée de l'ordre de 5 à 10 Hz, correspondant à des fréquences de résonance de maisons individuelles. Cette sous-estimation (environ 10-15%) est particulièrement notable pour des angles α de 20 à 25° et un type d'onde SV. Cette sous-estimation (environ 5-10%) est parfois remarquée pour des angles α de 10 à 15°.
 - De manière générale, les coefficients EC8 ont tendance à surestimer (d'environ 15-20%) l'amplification pour des structures ayant une fréquence de résonance basse de l'ordre de 0.7 à 1.4 Hz. Cette surestimation (environ 15-20%) est notable pour des angles α supérieurs ou égaux à 30°. En revanche, les amplifications pour des angles α de 5 et 10° sont légèrement sous-estimées (d'environ 5-10%).
 - L'EC8 recommande d'appliquer les coefficients d'amplification pour des buttes ou pentes dont la hauteur est supérieure à 30 m, or les simulations montrent que les amplifications dans la gamme de périodes 0.1 à 1.4 s peuvent être significatives (facteur $S_T \approx 1.1$ à 1.2) pour des buttes ou pentes de hauteur 25 m. Une étude complémentaire pour des hauteurs inférieures serait judicieuse.
 - Pour certains cas (ex : $H=25$ m), la gamme de périodes 0.1 à 0.2 s est la plus amplifiée indépendamment de la géométrie de la butte.
- Les illustrations au format de la Figure 6 (plus particulièrement le maximum de la fonction de transfert et du ratio de spectre de réponse en accélération) montrent que la dépendance spatiale des coefficients n'est pas linéairement décroissante jusqu'à la base de la butte comme préconisée par l'EC8 (cf. Figure 8-milieu) mais à une forme plus complexe qui peut être simplifiée par celle illustrée par la Figure 8-(bas). Les résultats montrent aussi que cette dépendance spatiale des coefficients d'amplification dépend fortement de la fréquence d'intérêt. La Figure 8-(bas) est donc ajustable au niveau des valeurs S_T et D .

6. Remerciements

Cette étude a été réalisée en tenant compte des conseils avisés de collaborateurs externes présents aux différentes réunions du projet. L'auteur tient à remercier Fabian Bonilla (IFSTTAR), Pierre-Yves Bard (IFSTTAR/ISterre), Nathalie Glinsky (IFSTTAR/CETE), Céline Gélis (IRSN), Etienne Bertrand (CETE) et Ezio Faccioli (Studio Geotecnico Italiano). Cette étude a été réalisée dans le cadre la convention 2011 n° 2100472261 entre Ministère de l'écologie du développement durable et de l'énergie et le BRGM (action C6 « effets topographiques »).

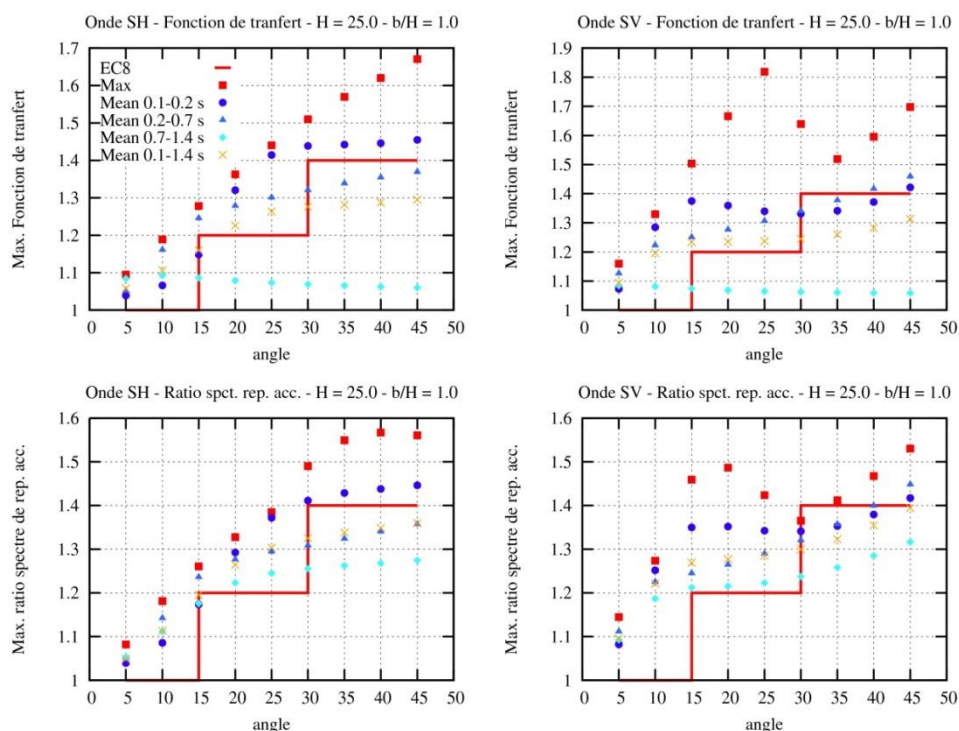


Figure 7. Exemple de résultats synthétisés pour une butte de hauteur $H=25$ m et de ratio $b/H = 1.0$ (carrés rouges $\rightarrow$ maximum, cercles bleus $\rightarrow$ moyenne 0.1 à 0.2 s, triangles bleus $\rightarrow$ moyenne 0.2 à 0.7 s, losanges bleus $\rightarrow$ moyenne 0.7 à 1.4 s, croix oranges $\rightarrow$ moyenne 0.1 à 1.4 s) comparables aux valeurs des Eurocodes 8 (ligne rouge).

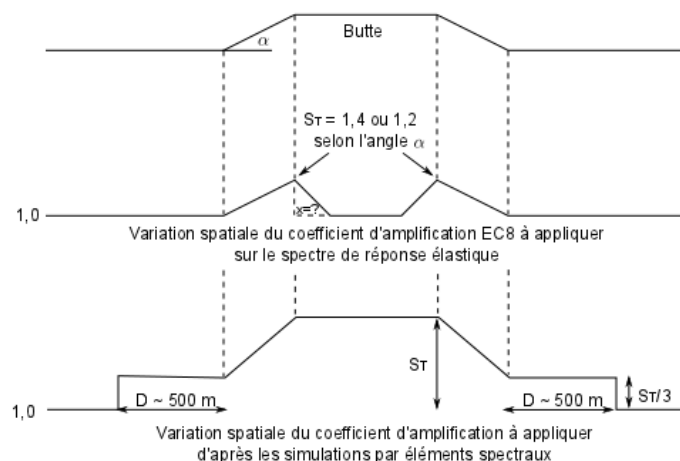


Figure 8. Forme d'une butte (haut), forme de la variation spatiale des coefficients EC8 (milieu) et forme de la variation spatiale des coefficients obtenus via la méthode des éléments spectraux (bas).

7. Bibliographie

Boore D.-M., « Note on the effect of topography on seismic SH waves », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 62, 1972, p. 275-284.

Bouchon M., « Effect of topography on surface motion », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 63, n° 2, 1973, p. 615-632.

Chaljub E., Maufroy E., Moczo P., Kristek J., Hollender F., Bard P.-Y., Priolo E., Klin P., De Martin F., Zhang Z., Zhang W., and Chen X., « 3D numerical simulations of earthquake ground motion in sedimentary basins: testing accuracy through stringent models », *Geophysical Journal International*, vol. 201, n° 1, 2015, p. 90-111.

Clayton R., Enquist, B., « Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 67, n° 6, 1977, p. 1529-1540.

De Basabe J. D., Sen M. K., « Grid dispersion and stability criteria of some common finite-element methods for acoustic and elastic wave equations », *Geophysics*, vol. 72, n° 6, 2007, p. T81-T95.

De Martin F., « Verification of a Spectral-Element Method Code for the Southern California Earthquake Center LOH.3 Viscoelastic Case », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 101, n° 6, 2011, p. 2855-2865.

De Martin F., Effets topographiques 2D en sismologie - Vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par éléments spectraux, rapport final, BRGM/RP-61279-FR, 2012.

De Martin F., Matsushima S., Kawase H., « Impact of geometric effects on near-surface Green's functions », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 103, n° 6, 2013, p. 3289-3304.

Eurocode 8, *Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes et Document d'Application Nationale - Partie 5 : fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques*.

Komatitsch D., Méthodes spectrales et éléments spectraux pour l'équation de l'élastodynamique 2D et 3D en milieu hétérogène, Thèse de doctorat, Institut de Physique du Globe de Paris, 1997.

Massa M., Barani S., Lovati S., « Overview of topographic effects based on experimental observations: meaning, causes and possible interpretations », *Geophysical Journal International*, vol. 197, n° 3, 2014, p. 1537-1550.

Maufroy E., Cruz-Atienza V. M., Cotton F., Gaffet S., « Frequency-Scaled Curvature as a Proxy for Topographic Site-Effect Amplification and Ground-Motion Variability », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 105, n° 1, 2015a, p. 354-367.

Maufroy E., Chaljub E., Hollender F., Kristek J., Moczo P., Klin P., Priolo E., Iwaki A., Iwata T., Etienne V., De Martin F., Theodoulidis N., Manakou M., Guyonnet-Benaize C., Pitilakis K., Bard P.-Y., « Earthquake ground motion in the Mygdonian basin, Greece: the E2VP verification and validation of 3D numerical simulation up to 4 Hz », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 105, n° 3, 2015b.

Modaressi H., Modélisation numérique de la propagation des ondes dans les milieux poreux anélastiques. Thèse de doctorat, Ecole Centrale Paris, 1987.

Stacey R., « Improved transparent boundary formulations for the elastic-wave equation », *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 78, 1988, p. 2089-2097.