



HAL
open science

Effets topographiques 2D en sismologie - Vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par éléments spectraux

Florent de Martin

► **To cite this version:**

Florent de Martin. Effets topographiques 2D en sismologie - Vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par éléments spectraux. 2013. hal-00785027

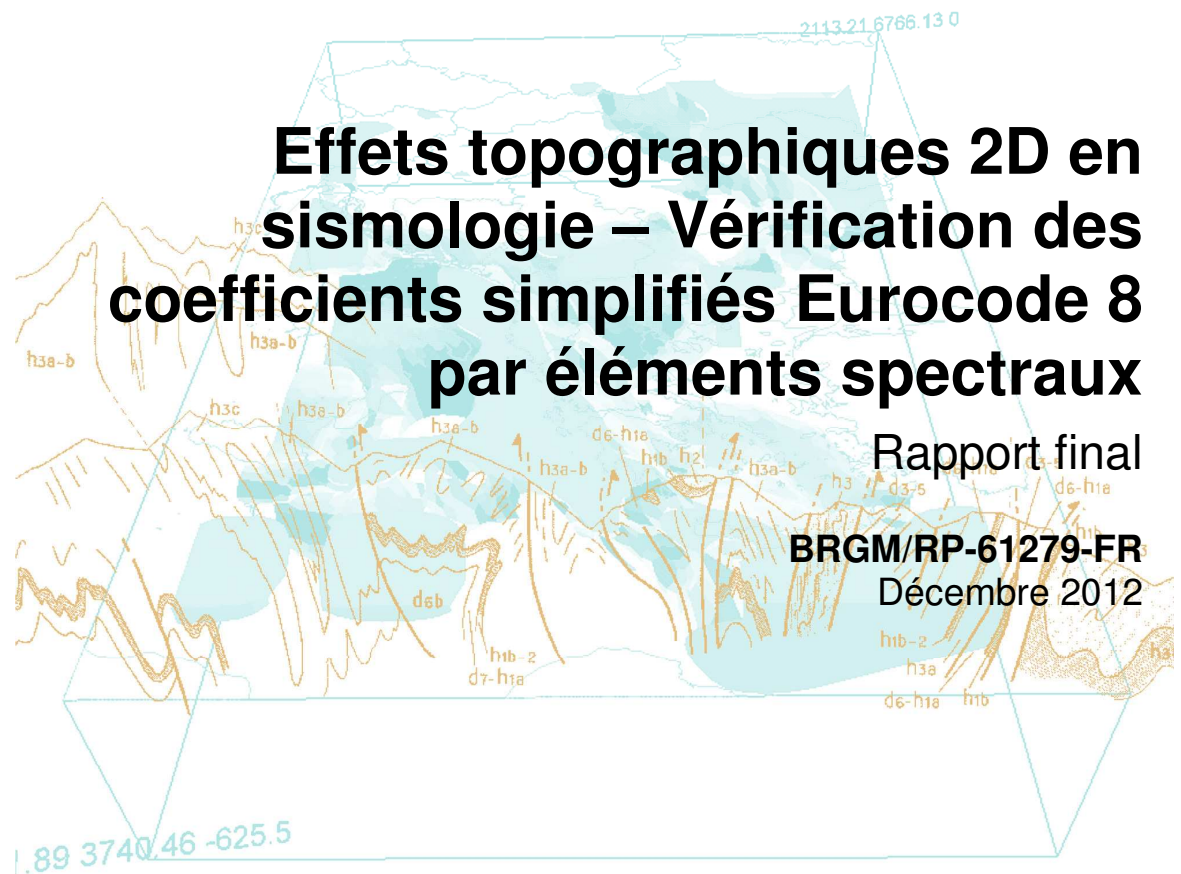
HAL Id: hal-00785027

<https://brgm.hal.science/hal-00785027>

Submitted on 5 Feb 2013

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

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



Effets topographiques 2D en sismologie – Vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par éléments spectraux

Rapport final

BRGM/RP-61279-FR

Décembre 2012



Effets topographiques 2D en sismologie – Vérification des coefficients simplifiés Eurocode 8 par éléments spectraux

Rapport final

BRGM/RP-61279-FR
Décembre 2012

Étude réalisée dans le cadre des projets
de service public du BRGM. Convention 2011 n° 2100472261
Action C6 Effets topographiques

F. De Martin

Avec la collaboration de P.-Y. Bard, F. Bonilla et C. Gélis

Vérificateur :

Nom : Roullé Agathe

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : Foerster Evelyne

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : risque naturel, topographie, onde sismique, effet site, simulation numérique, étude paramétrique, amplification, Eurocode 8, méthode en éléments spectraux, code EFISPEC, Italie, Europe, Aquila, Val Comino

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

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

Synthèse

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 »).

L'intérêt du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie est d'avoir des premières pistes et/ou recommandations sur l'applicabilité des coefficients d'amplification topographique (noté S_T) des Eurocode 8, 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 tels que « à proximité de la crête », « largeur de la crête notablement inférieure à la largeur de la base » ?

Ce rapport répond à ces questions via une étude paramétrique comportant plus de 500 simulations 2D par la méthode des éléments finis spectraux (via le code numérique du BRGM EFISPEC2D). Cela représente environ 10000 heures de calcul (i.e., 417 jours).

Grâce à ces simulations, nous montrons que l'ordre de grandeur des coefficients d'amplification topographique S_T des Eurocode 8 est acceptable. Néanmoins des améliorations sont réalisables, à savoir par exemple (cf. chapitre 7 « Conclusions , recommandations et perspectives ») :

- Une augmentation d'environ 10 à 20% des valeurs des coefficients d'amplification S_T pour des buttes ou pentes ayant des angles de 10 à 25°.
- Un ajustement de la dépendance spatiale des coefficients d'amplification S_T à proximité des topographies (ex. une butte).

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).

Sommaire

1. Introduction	9
2. Définition du problème	11
2.1. PENTES ET BUTTES HOMOGENES	11
2.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE EN SURFACE	12
2.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES	13
3. Description des simulations.....	15
3.1. CODE DE CALCUL ET VALIDITE EN FREQUENCE.....	15
3.2. LOCALISATION DES RECEPTEURS.....	15
3.3. GEOMETRIE ET MAILLAGE.....	15
3.4. TYPE ET FORME D'ONDE INCIDENTE	16
4. Description de l'étude.....	21
4.1. ETUDE PARAMETRIQUE.....	21
4.2. FORMAT DES RESULTATS COMPLETS.....	21
4.3. FORMAT DES RESULTATS SIMPLIFIES.....	25
5. Résultats des simulations	29
5.1. BUTTES HOMOGENES.....	29
5.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE LACHE EN SURFACE	29
5.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES	29
6. Discussions des résultats	31
6.1. BUTTES HOMOGENES.....	31
6.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE LACHE EN SURFACE	34
6.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES	37
7. Conclusions , recommandations et perspectives.....	39

8. Bibliographie 41**Liste des illustrations**

Ce projet a généré une quantité importante d'illustrations couleurs hautes résolutions. Afin d'éviter une impression importante, une grande partie des illustrations sont présentes dans les répertoires nommés « ANNEXE* » du CD joint au rapport.

Figure 1 : (Gauche) Accélérogramme au rocher (supposé homogène à surface plane) (courbe noire), au sommet d'une butte de hauteur 25 m (supposée homogène, cf. Figure 2) (courbe orange) et au sommet d'une butte de hauteur 25 m (supposée homogène) surmontée d'une couche sédimentaire plus lâche (cf. Figure 3) (courbe rouge). (Droite) : Spectres de réponse en accélération respectifs.	9
Figure 2 : 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	12
Figure 3 : butte homogène surmontée d'une couche plus lâche d'épaisseur H_c	12
Figure 4 : butte homogène dissymétrique et ses longueurs caractéristiques.	13
Figure 5 : butte avec angles arrondis	15
Figure 6 : Exemple de maillage en quadrangles à 9 nœuds permettant une définition quadratique des arêtes des quadrangles.	16
Figure 7 : Exemple de maillage en quadrangles à 9 nœuds pour une butte dissymétrique.....	16
Figure 8 : Exemple de domaine entier avec conditions de périodicité (lignes noires) sur les bords verticaux.....	16
Figure 9 : Ondelette de Gabor dans le domaine en temps (gauche) et en fréquence (droite) utilisée comme onde incidente.	17
Figure 10 : Exemple de simulation pour une onde de type SV	18
Figure 11 : Signal réel enregistré au rocher en champ proche lors du séisme de Val Comino utilisé pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$	19
Figure 12 : Signal réel enregistré au rocher en champ proche lors du séisme de l'Aquila utilisé pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$	20
Figure 13 : Exemple de résultat tracé pour chaque simulation.	23
Figure 14 : Exemple de résultat tracé pour les groupes de paramètres H et b/H récapitulant (pour une onde SH) les maximums des ratios mentionnés ci-dessus pour des angles α de 5° à 45° degrés tous les 5°	24
Figure 15 : 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, cf. Annexe 1).	26

Figure 16 : Exemple de fonction de transfert synthétisée dans les gammes de période 0.1 à 0.2 s, 0.2 à 0.7 s et 0.7 à 1.4 s pour une butte de hauteur H=25 m et de ratio b/H = 1.0. La légende 05 à 45 indique la valeur de l'angle α .	27
Figure 17 : Exemple de ratio de spectre de réponse synthétisé dans les gammes de période 0.1 à 0.2 s, 0.2 à 0.7 s et 0.7 à 1.4 s pour une butte de hauteur H=25 m et de ratio b/H = 1.0. La légende 05 à 45 indique la valeur de l'angle α .	28
Figure 18 : Coefficients d'amplification topographique pour une butte H=50 m et b/H = 4 en utilisant le signal de la station GSA lors du séisme de l'Aquila.	33
Figure 19 : Coefficients d'amplification topographique pour une butte H=50 m et b/H = 4 en utilisant une ondelette de Gabor.	33
Figure 20 : 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).	34
Figure 21 : Calcul des amplifications en normalisant avec le signal enregistré au rocher. La courbe EC8 représente le coefficient S_T augmenté de 20% (comme indiqué par l'annexe A des EC8 lors de la présence d'une couche lâche en surface). Cette courbe ne comprend pas l'amplification S pour un type de sol de classe B.	36
Figure 22 : Calcul des amplifications en normalisant avec le signal enregistré au site (i.e., rocher + couche lâche en surface). La courbe EC8 représente le coefficient S_T augmenté de 20% (comme indiqué par l'annexe A des EC8 lors de la présence d'une couche lâche en surface). Cette courbe ne comprend pas l'amplification S pour un type de sol de classe B.	37
Figure 23 : Forme d'une butte (haut), et forme de la variation spatiale des coefficients obtenus via la méthode des éléments spectraux (bas).	38

Liste des annexes

Annexe 1 Eurocode 8 – Partie 5 – « Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques » Annexe A	43
--	----

Les autres annexes sont les répertoires nommés « ANNEXE* » du CD joint au rapport.

1. Introduction

L'irrégularité de la topographique a une influence sur le mouvement sismique. Ces effets sont communément appelés « effets topographiques » et peuvent amplifier ou dé-amplifier le signal sismique enregistré au « rocher » (qui par définition est supposé être un milieu homogène à surface plane). Le spectre de réponse au rocher peut être amplifié d'un facteur 1.5 simplement par la présence d'une butte de hauteur 25 mètres ou de facteurs supérieurs selon la présence ou non d'une couche lâche en surface. La Figure 1 montre un exemple d'amplifications d'accélérogrammes synthétiques et leur spectre de réponse en accélération.

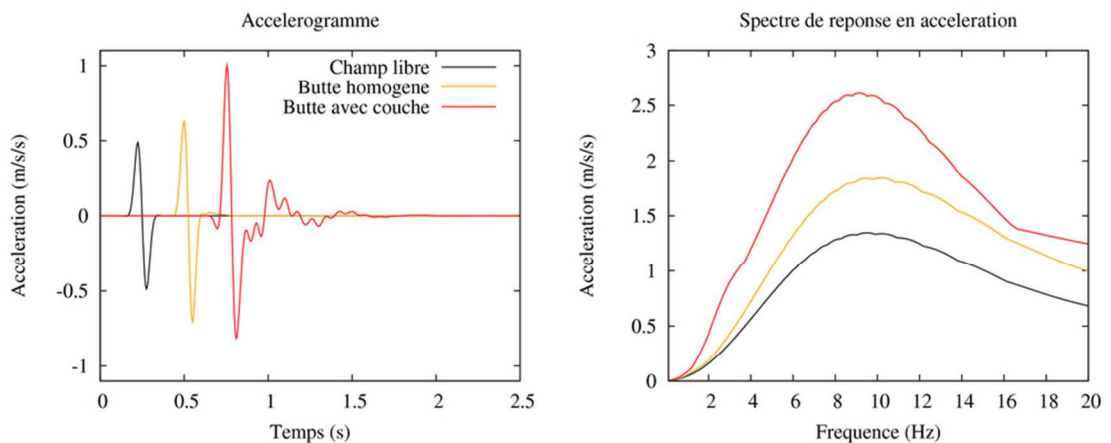


Figure 1 : (Gauche) Accélérogramme au rocher (supposé homogène à surface plane) (courbe noire), au sommet d'une butte de hauteur 25 m (supposée homogène, cf. Figure 2) (courbe orange) et au sommet d'une butte de hauteur 25 m (supposée homogène) surmontée d'une couche sédimentaire plus lâche (cf. Figure 3) (courbe rouge). (Droite) : Spectres de réponse en accélération respectifs.

A l'heure actuelle, la prise en compte de ces effets topographiques dans les Eurocodes 8 est simplifiée. Il s'agit de l'annexe A de la partie 5 « Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques » (cf. Annexe 1). 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 ».

Après discussions avec plusieurs experts ayant contribué à la rédaction des Eurocodes 8, il s'avère que ces coefficients sont aussi issus de simulations numériques en deux dimensions réalisées via la méthode des éléments frontières et synthétisées dans Fardis *et al.* (pages 213-214). Les coefficients issus de ces simulations ont été vérifiés *a posteriori* en trois dimensions via la méthode des éléments spectraux (Paolucci, 2002).

L'objectif de ce projet est de réaliser une étude paramétrique sur les grandeurs caractéristiques d'une topographie définie selon l'Eurocode 8. Cette étude est plus exhaustive en termes de configuration géométrique ainsi qu'en termes de représentation graphiques des résultats que les études précédemment citées.

Dans une première phase, nous vérifierons point par point les coefficients mentionnés dans les indications A.2 de l'annexe A de la partie 5 des Eurocodes 8 via des simulations numériques linéaires élastiques (i.e., sans amortissement) valides jusqu'à 25 Hz réalisées avec le code EFISPEC2D (Eléments FInis SPECtraux 2D). Ce code a été validé sur différents cas tests connus tel que le cas « Layer Over Half-space 3 » du « Southern California Earthquake Center » (De Martin, 2011).

Les coefficients à vérifier sont ceux pour :

- a) les versants et pentes isolés ;
- b) les buttes dont la largeur de la crête est notablement inférieure à la base ;
- c) la présence d'une couche lâche en surface ;
- d) la variation spatiale du coefficient d'amplification.

Dans une deuxième phase, nous quantifierons via des simulations 2D linéaires élastiques (i.e., sans amortissement) l'influence de la forme géométrique (ex. butte dissymétrique) sur le mouvement sismique enregistré en surface.

Nous notons qu'une étude paramétrique similaire via des simulations 2D viscoélastiques (i.e., avec amortissement) serait intéressante. Nous ne l'avons pas traitée pour des raisons de contrainte temporelle.

2. Définition du problème

2.1. PENTES ET BUTTES HOMOGENES

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 2. Dans toute la suite de ce rapport, 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 notable entre les deux.

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,
- de l'angle d'incidence de l'onde.

En accord avec le comité de pilotage et afin d'explorer la réponse dynamique en deux dimensions de différentes buttes proche de la configuration décrite dans les EC8, cette étude consiste à faire varier :

- le ratio H/λ ,
- l'angle α ,
- le ratio b/H ,
- le type d'onde incidente (SH ou SV).

Nous notons que l'influence de l'angle d'incidence n'a pas été étudiée en raison des contraintes temporelles du projet et de la complexité de l'implémentation d'une onde plane avec incidence non nulle sans génération d'ondes numériques. Cependant, il joue un rôle important dans la réponse dynamique d'une butte et pourrait être étudié ultérieurement.

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 ceux caractéristiques d'un rocher de bonne qualité :

- Vitesse des ondes S : $V_s = 1000$ m/s,
- Vitesse des ondes P : $V_p = 1870$ m/s,
- Densité : $\rho = 2400$ kg/m³,
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$.

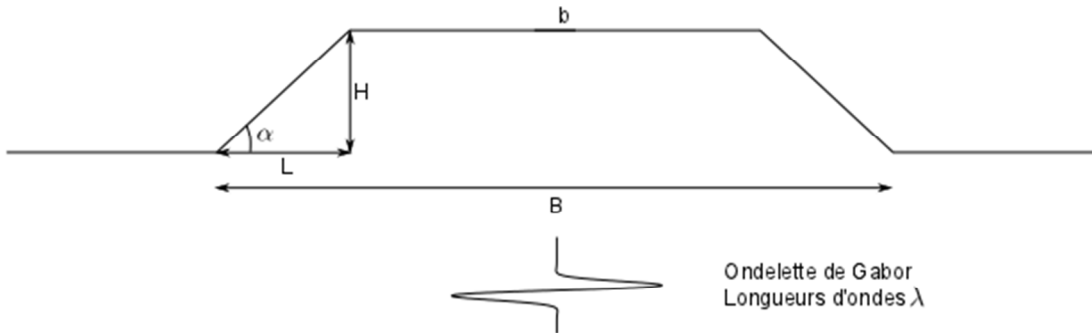


Figure 2 : butte homogène et ses longueurs caractéristiques : H sa hauteur, b sa petite base, B sa grande base. L'onde incidente est caractérisée par ses longueurs d'ondes λ .

2.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE EN SURFACE

Lors de l'ajout d'une couche plus lâche en surface (point « c » des Eurocodes 8 mentionné en Introduction), les paramètres ci-dessus restent inchangés et une couche d'épaisseur H_c (= 50 m) est ajoutée au-dessus du rocher (cf. Figure 3). Pour comparaison, la hauteur H vaut 25, 50 ou 100 m. En accord avec le comité de pilotage, les paramètres élastiques de la couche plus lâche sont ceux d'un rocher altéré :

- Vitesse des ondes S : $V_s = 500$ m/s,
- Vitesse des ondes P : $V_p = 1040$ m/s,
- Densité : $\rho = 1900.0$ kg/m³,
- Coefficient de Poisson : $\nu = 0.35$.

Le ratio d'impédance (ρV_s) est de 2.5. Un cas sera effectué pour un ratio d'impédance de 5 ($\rho = 1800.0$ kg/m³ et $V_s=270$, (cf. Section 6.2 « Buttes homogènes avec couche lâche en surface »).

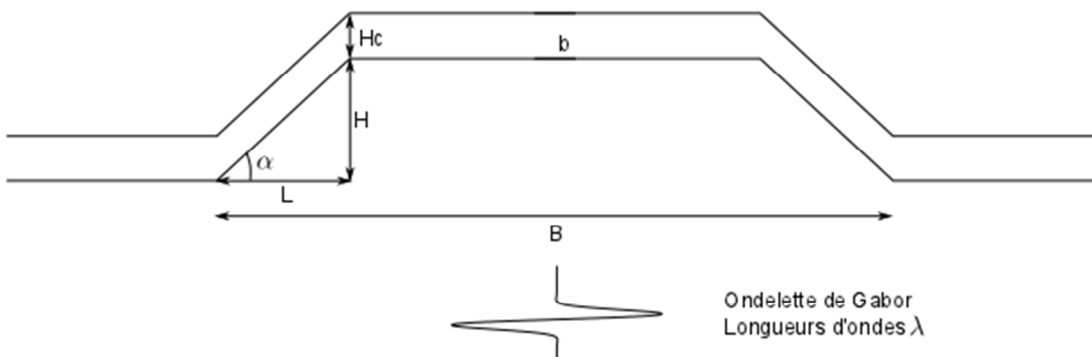


Figure 3 : butte homogène surmontée d'une couche plus lâche d'épaisseur H_c .

2.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES

Les buttes dissymétriques sont définies selon la géométrie présentée en Figure 4. Les paramètres élastiques sont identiques à ceux de la butte homogène.

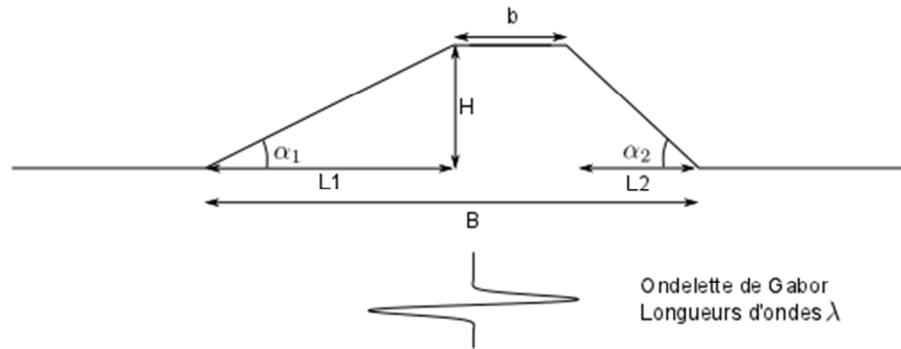


Figure 4 : butte homogène dissymétrique et ses longueurs caractéristiques.

3. Description des simulations

3.1. CODE DE CALCUL ET VALIDITE EN FREQUENCE

Les simulations sont réalisées avec le code de calcul en éléments finis spectraux EFISPEC2D. Cette méthode a été choisie car elle est réputée pour sa grande précision numérique (Komatitsch, 1977), notamment lors de la présence d'une topographie ou d'un fort contraste d'impédance entre couches géologiques.

Pour cette étude, nous utilisons des éléments spectraux d'ordre 6. Les différents maillages permettent des simulations valides jusqu'à environ 25 Hz avec 7 nœuds Gauss-Lobatto-Legendre (GLL) par longueur d'onde minimale. L'ordre 6 des éléments spectraux avec 7 nœuds GLL par longueur d'onde minimale garantit une grande précision numérique. L'utilisation courante (déjà très précise) est l'ordre 4 avec 5 nœuds GLL par longueur d'onde minimale.

3.2. LOCALISATION DES RECEPTEURS

Des récepteurs sont positionnés tous les 5 mètres en surface libre du domaine d'étude. Les grandeurs physiques sorties sont le déplacement, la vitesse et l'accélération du sol.

3.3. GEOMETRIE ET MAILLAGE

Les angles des buttes sont légèrement arrondis afin de travailler sur une topographie plus réaliste (cf. Figure 5). Nous notons néanmoins que le fait d'utiliser des angles non arrondis ne change pas fondamentalement la réponse dynamique de la topographie.

Le maillage est composé uniquement de quadrangles quadratiques à 9 nœuds afin de mieux épouser les angles arrondis (cf. Figure 6 et Figure 7). Les bords verticaux du domaine sont des éléments périodiques afin d'assurer la bonne propagation des ondes SV (cf. Figure 8).

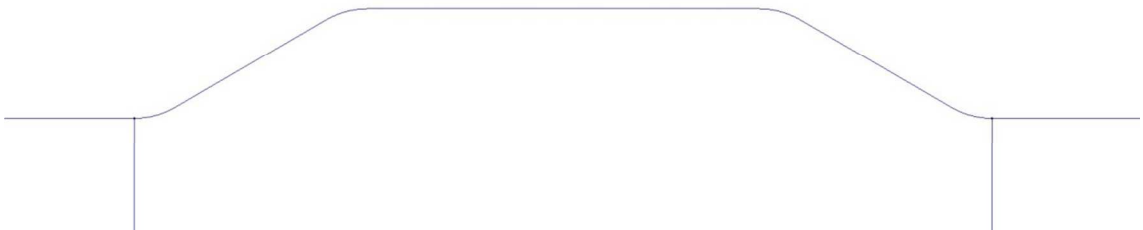


Figure 5 : butte avec angles arrondis

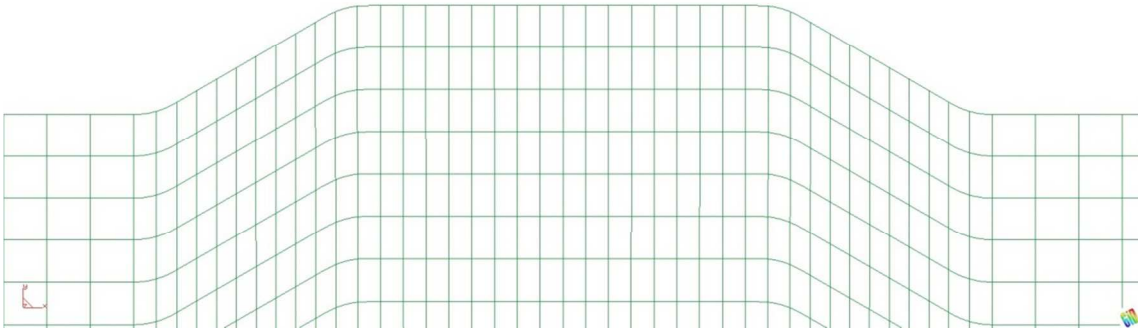


Figure 6 : Exemple de maillage en quadrangles à 9 nœuds permettant une définition quadratique des arêtes des quadrangles.

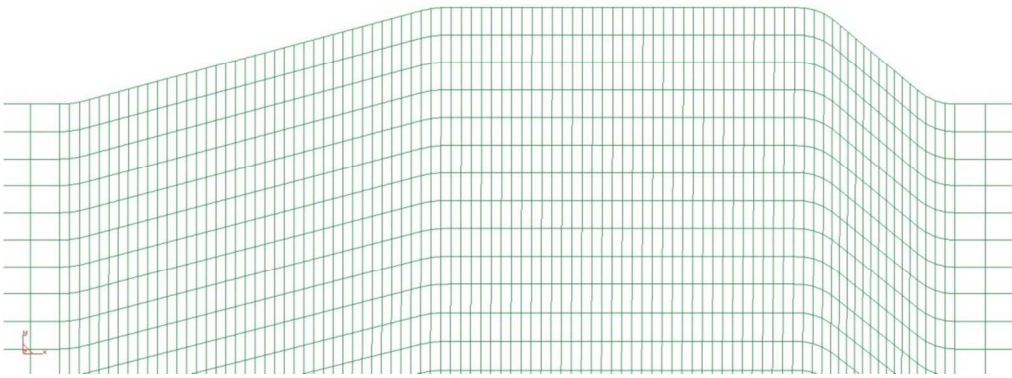


Figure 7 : Exemple de maillage en quadrangles à 9 nœuds pour une butte dissymétrique.

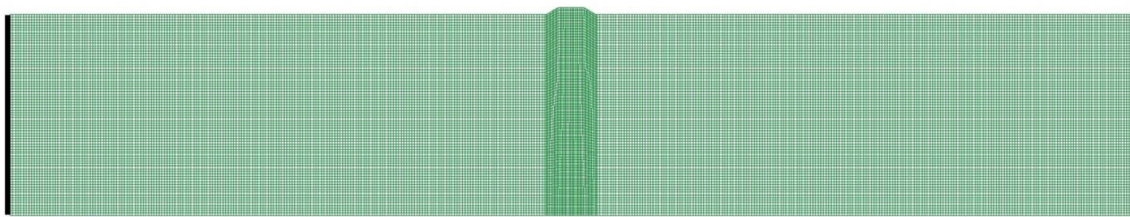


Figure 8 : Exemple de domaine entier avec conditions de périodicité (lignes noires) sur les bords verticaux.

3.4. TYPE ET FORME D'ONDE INCIDENTE

Pour toutes les simulations, nous feront l'hypothèse d'une onde plane se propageant verticalement vers la surface libre. Nous traiterons les cas des ondes de types SH et SV. L'onde incidente en vitesse est une ondelette de Gabor de la forme :

avec :

- t , le temps
- t_s , le temps de décalage (=0.25)
- σ , l'enveloppe de la Gaussienne (=0.03)
- T , la période du cosinus (=0.3)

La Figure 9 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 de 0 Hz jusqu'à environ 20-25 Hz afin de ne pas générer des hautes fréquences au-delà de la limite de validité du maillage à 25 Hz. Elle est insérée dans le domaine via des éléments paraxiaux sur le bord horizontal inférieur du domaine. Un exemple de simulation est montré en Figure 10.

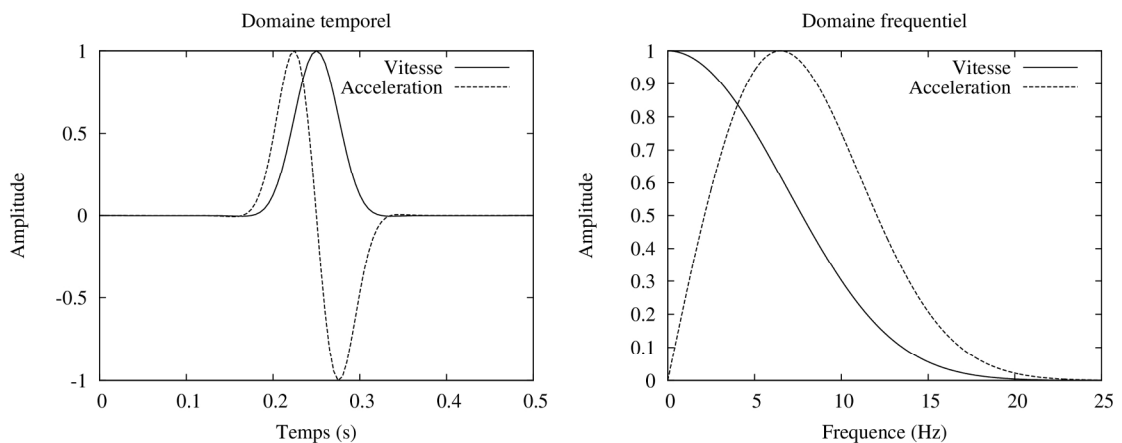


Figure 9 : Ondelette de Gabor dans le domaine en temps (gauche) et en fréquence (droite) utilisée comme onde incidente.

Composante horizontale



Composante verticale



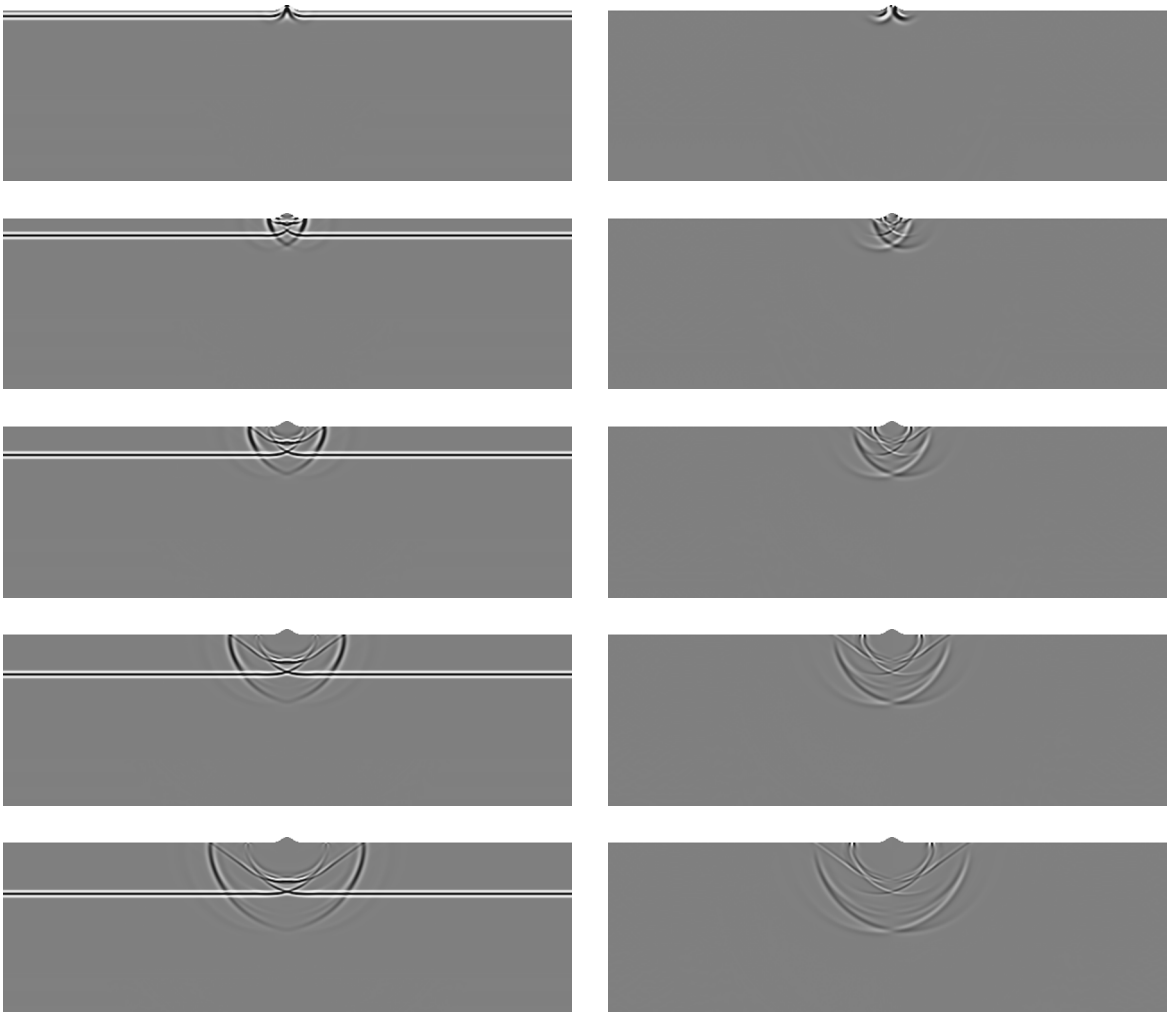


Figure 10 : Exemple de simulation pour une onde de type SV

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 (Italian ACcelerometric 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. Les formes d'ondes (supposées enregistrées au rocher) sont montrées en Figure 12.

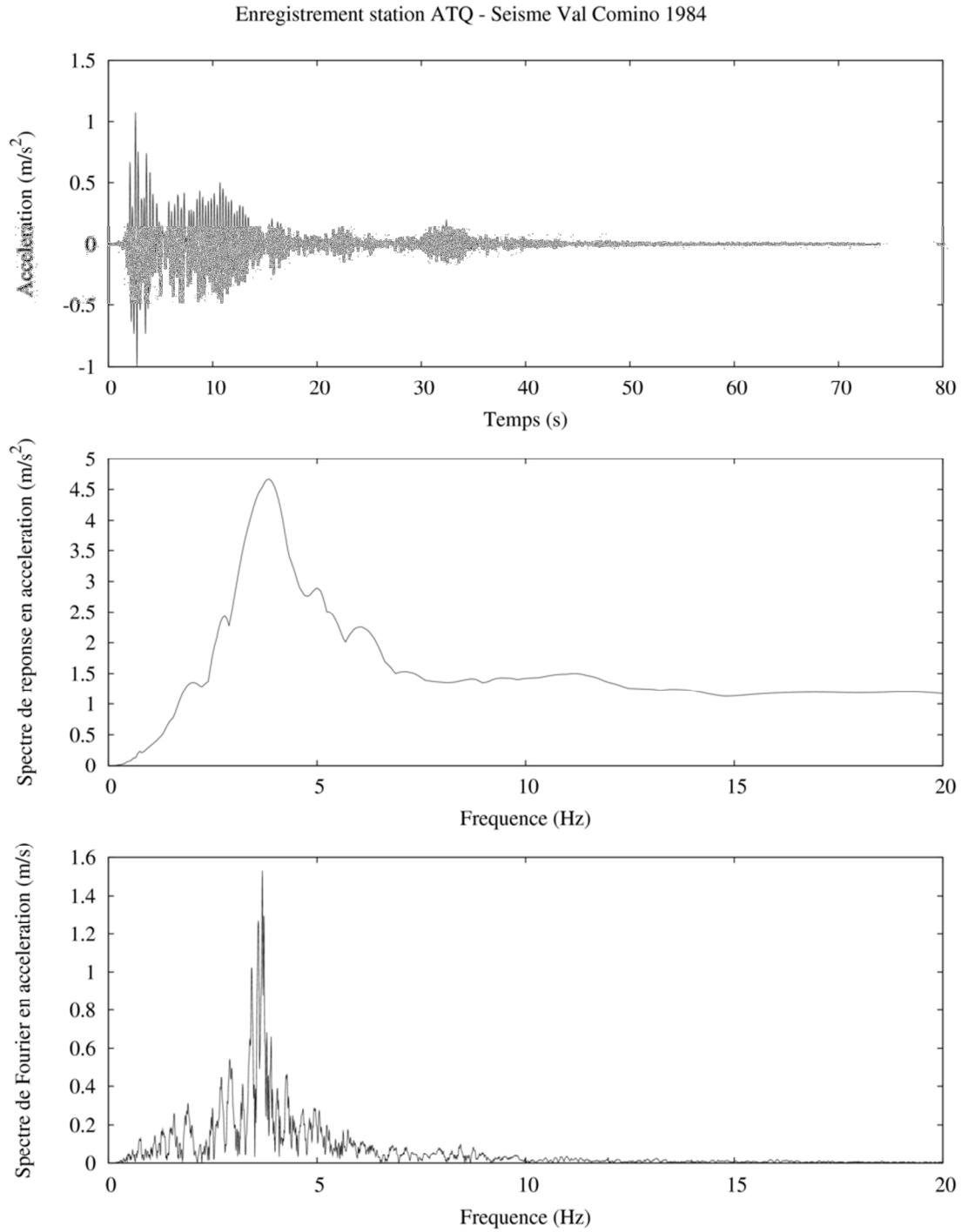


Figure 11 : Signal réel enregistré au rocher en champ proche lors du séisme de Val Comino utilisé pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$.

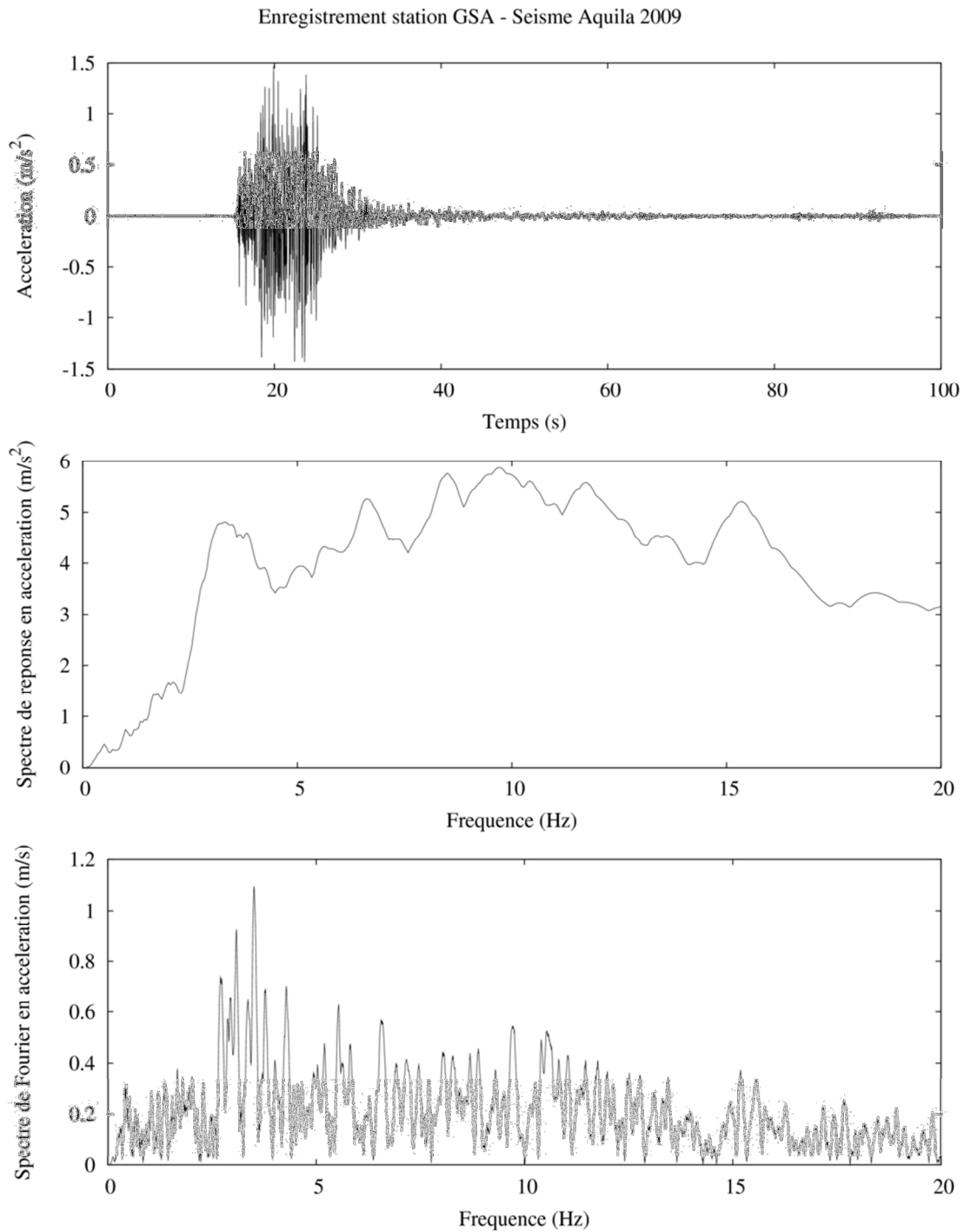


Figure 12 : Signal réel enregistré au rocher en champ proche lors du séisme de l'Aquila utilisé pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$.

4. Description de l'étude

4.1. ETUDE PARAMETRIQUE

Pour les buttes homogènes et les buttes homogènes avec couche lâche en surface (dont la hauteur de la couche H_c est fixée à 50 m), l'étude paramétrique consiste à faire varier :

- le ratio H/λ avec $H = 25$ m, 50 m et 100 m,
- l'angle α avec $\alpha = 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$,
- le ratio b/H avec $b/H = 1, 4, 8, 16$,
- le type d'onde incidente : SH (hors plan) ou SV (en plan).

Nous notons que des tests pour des ratios b/H de 0.5 et 2 ont été effectués pour $H = 25$ m. Les résultats sont très proches de ceux obtenus avec un ratio $b/H=1$. Nous notons aussi que les résultats pour les versants et pentes isolées seront ceux des cas avec $b/H = 16$.

Pour les buttes homogènes dissymétriques, l'étude paramétrique consiste à fixer H à 50 m, b/H à 4 et à faire varier l'angle α_1 et α_2 . Les simulations ont été effectuées pour les combinaisons suivantes :

- $\alpha_1 = 5^\circ, \alpha_2 = 10$ à 45°
- $\alpha_1 = 10^\circ, \alpha_2 = 15$ à 45°
- $\alpha_1 = 15^\circ, \alpha_2 = 20$ à 45°
- $\alpha_1 = 20^\circ, \alpha_2 = 25$ à 45°
- $\alpha_1 = 25^\circ, \alpha_2 = 30$ à 45°
- $\alpha_1 = 30^\circ, \alpha_2 = 35$ à 45°
- $\alpha_1 = 35^\circ, \alpha_2 = 40$ à 45°
- $\alpha_1 = 40^\circ, \alpha_2 = 45^\circ$

Au total, cette étude paramétrique comporte 504 simulations. Elles ont générées environ 1 To de données brutes réduites à environ 40 Go après post-traitement et compression.

4.2. FORMAT DES RESULTATS COMPLETS

Un problème de propagation d'onde 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).

Pour cette étude, le champ libre n'est pas un récepteur au loin de la butte. Le champ libre provient soit de la théorie (deux fois l'onde incidente) soit d'une simulation avec un demi-espace plan et une couche lâche plane en surface.

Pour chaque simulation, une illustration au format de la Figure 13 présente les résultats normalisés par rapport au champ libre dans le domaine espace/temps ou espace/fréquence. De haut en bas sont représentés :

- Le ratio entre l'accélération en surface libre pour chaque récepteur (espacé de 5 mètres) et la valeur absolue de l'accélération maximale en champ libre (i.e., surface plane) ;
- Le maximum du ratio ci-dessus pour chaque récepteur ;
- La fonction de transfert de chaque récepteur (i.e., le ratio 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 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 du ratio ci-dessus 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 du ratio ci-dessus 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 $S_a = \max |\ddot{u} + \ddot{U}|$;
- Ce spectre est très proches d'un spectre de réponse relative défini par $S'_a = \max |\ddot{u}|$.

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-amplification (i.e., ratios inférieurs à 1). Les illustrations au format de la Figure 13 sont présentes dans les répertoires ANNEXE* dans les fichiers *-ESPACE-TEMPS.pdf.

Pour chaque paire de paramètres H et b/H, les quatre maximums en fonction de la position des récepteurs mentionnés ci-dessus sont tracés (pour l'angle α variable) au format de la Figure 14. Les illustrations au format de la Figure 14 sont présentes dans les répertoires ANNEXE* dans les fichiers *-MAX-RECEIVERS.pdf. Sur ce type de figure, nous pouvons par exemple remarquer que maximum du ratio (fft_topo) / (fft_champ_libre) n'atteint pas la valeur unitaire au loin de la butte en raison des ondes diffractées par la butte. Aussi, pour un angle faible ($\sim 5^\circ$), nous voyons la séparation entre les variations localisées en pied de butte et les variations sur la crête alors que

pour des angles plus élevés (à partir de 15°), il y a interférence entre ces deux types de variations.

Pour chaque paire de paramètres H et b/H, certains résultats sont moyennés en fonction de la position des récepteurs (cf. section 4.3).

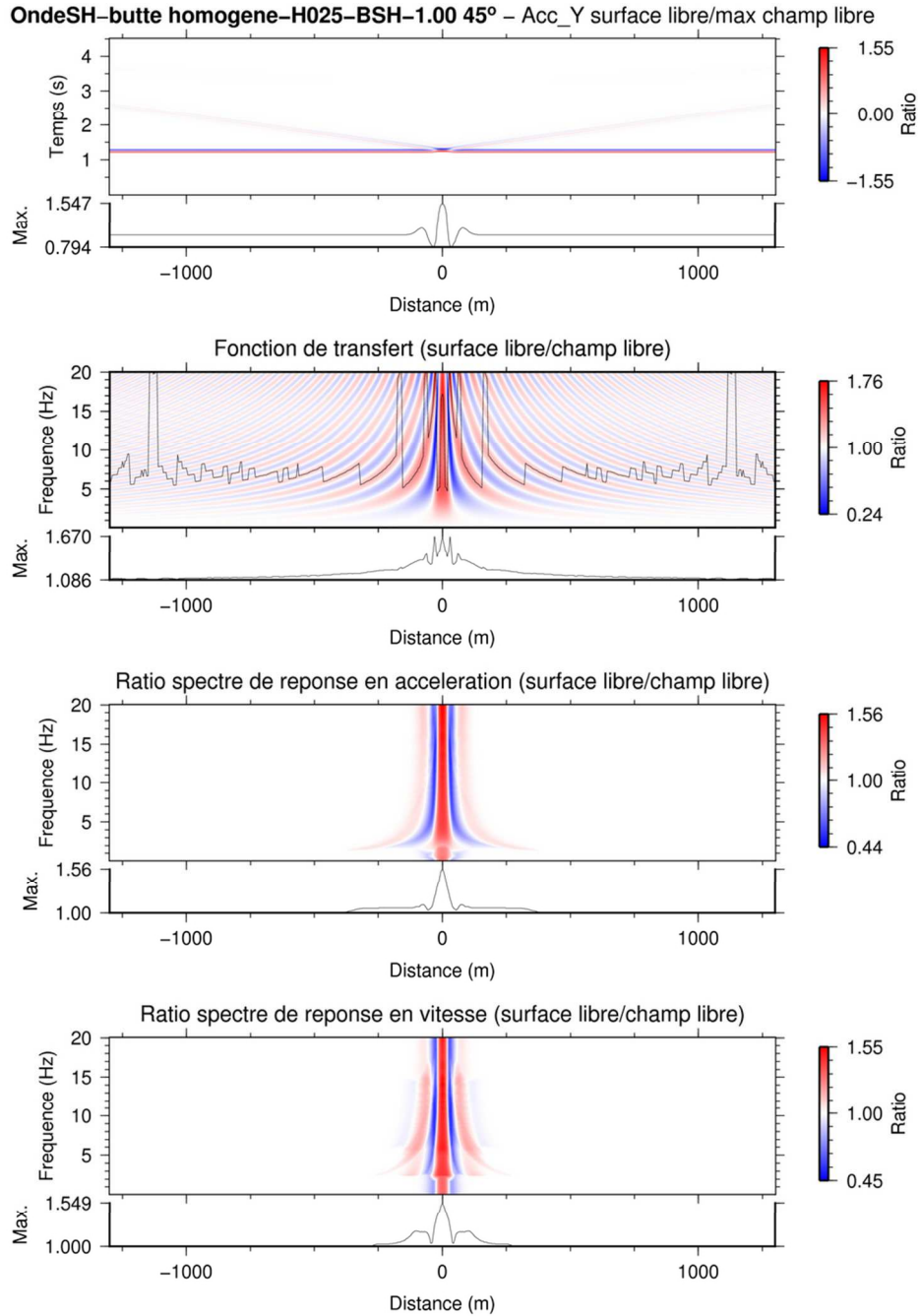


Figure 13 : Exemple de résultat tracé pour chaque simulation.

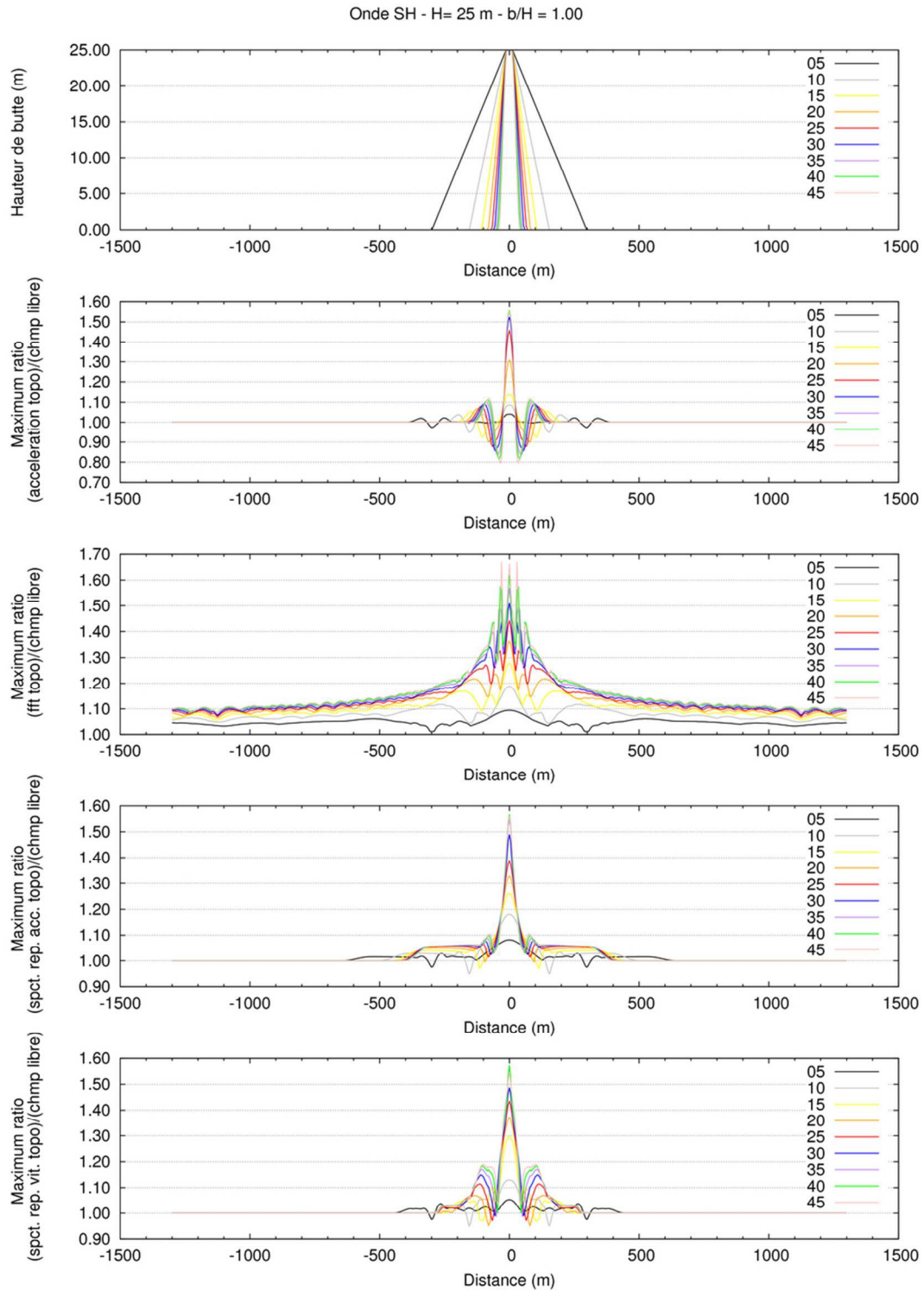


Figure 14 : Exemple de résultat tracé pour les groupes de paramètres H et b/H récapitulant (pour une onde SH) les maximums des ratios mentionnés ci-dessus pour des angles α de 5° à 45° degrés tous les 5° .

4.3. FORMAT DES RESULTATS SIMPLIFIES

Afin de pouvoir comparer les résultats des simulations avec les coefficients simplifiés des Eurocode 8, une simplification est nécessaire pour synthétiser des résultats espace-temps (simulation) en une valeur unique pour chaque angle α d'une butte (Eurocode 8). Il est important de noter que cette synthèse 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 .

Le coefficient S_T de EC8 s'appliquant sur les ordonnées du spectre de réponse en accélération, nous synthétiserons pour chaque type d'onde, hauteur, ratio b/H et angle α les ratios de spectres de réponse en accélération présentés ci-avant ainsi que la fonction de transfert.

Le format de cette synthèse est montré en Figure 15. Pour l'obtenir, dans un premier temps les moyennes (« mean » sur la Figure 15) sont calculées pour chaque récepteur (cf. Figure 16 et Figure 17) en effectuant la moyenne entre les périodes T1 et T2 sur axe logarithmique :

$$X_{Moyen} = \frac{\int_{T1}^{T2} X(T) d(\ln T)}{\int_{T1}^{T2} d(\ln T)} \approx \frac{\sum_i X(T_i) \frac{\Delta T_i}{T_i}}{\sum_i \frac{\Delta T_i}{T_i}}$$

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 en accord avec le comité de pilotage.

Dans un second temps, le maximum des moyennes pour tous les récepteurs est utilisé pour comparaison avec les coefficients des Eurocodes 8. 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.

Les illustrations au format de la Figure 15 sont présentes dans les répertoires ANNEXE* dans les fichiers *-COMPARAISON-EC8.pdf. Les illustrations au format de la Figure 16 et Figure 17 sont présentes dans les répertoires ANNEXE* dans les fichiers *-MEAN-RECEIVERS.pdf.

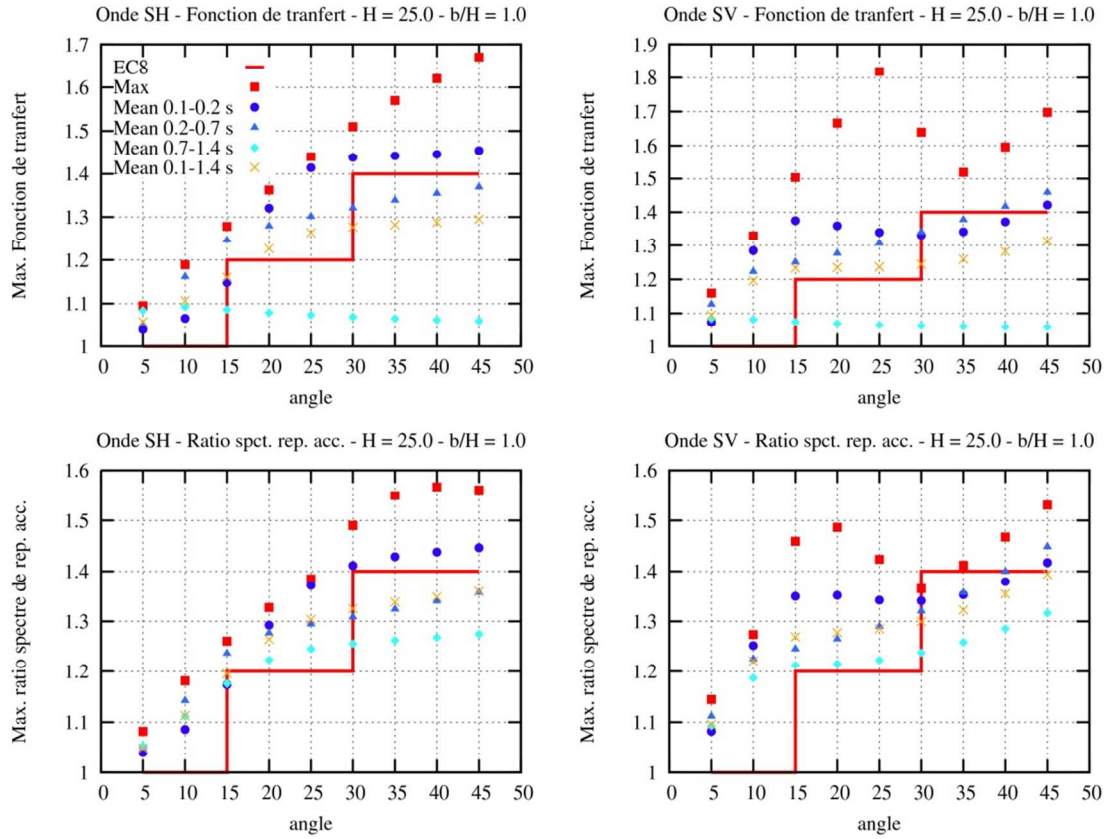


Figure 15 : Exemple de résultats synthétisés pour une butte de hauteur $H=25$ m et de ratio $b/H = 1.0$ (carrés rouges \rightarrow maximum, cercles bleus \rightarrow moyenne 0.1 à 0.2 s, triangles bleus \rightarrow moyenne 0.2 à 0.7 s, losanges bleus \rightarrow moyenne 0.7 à 1.4 s, croix oranges \rightarrow moyenne 0.1 à 1.4 s) comparables aux valeurs des Eurocodes 8 (ligne rouge, cf. Annexe 1).

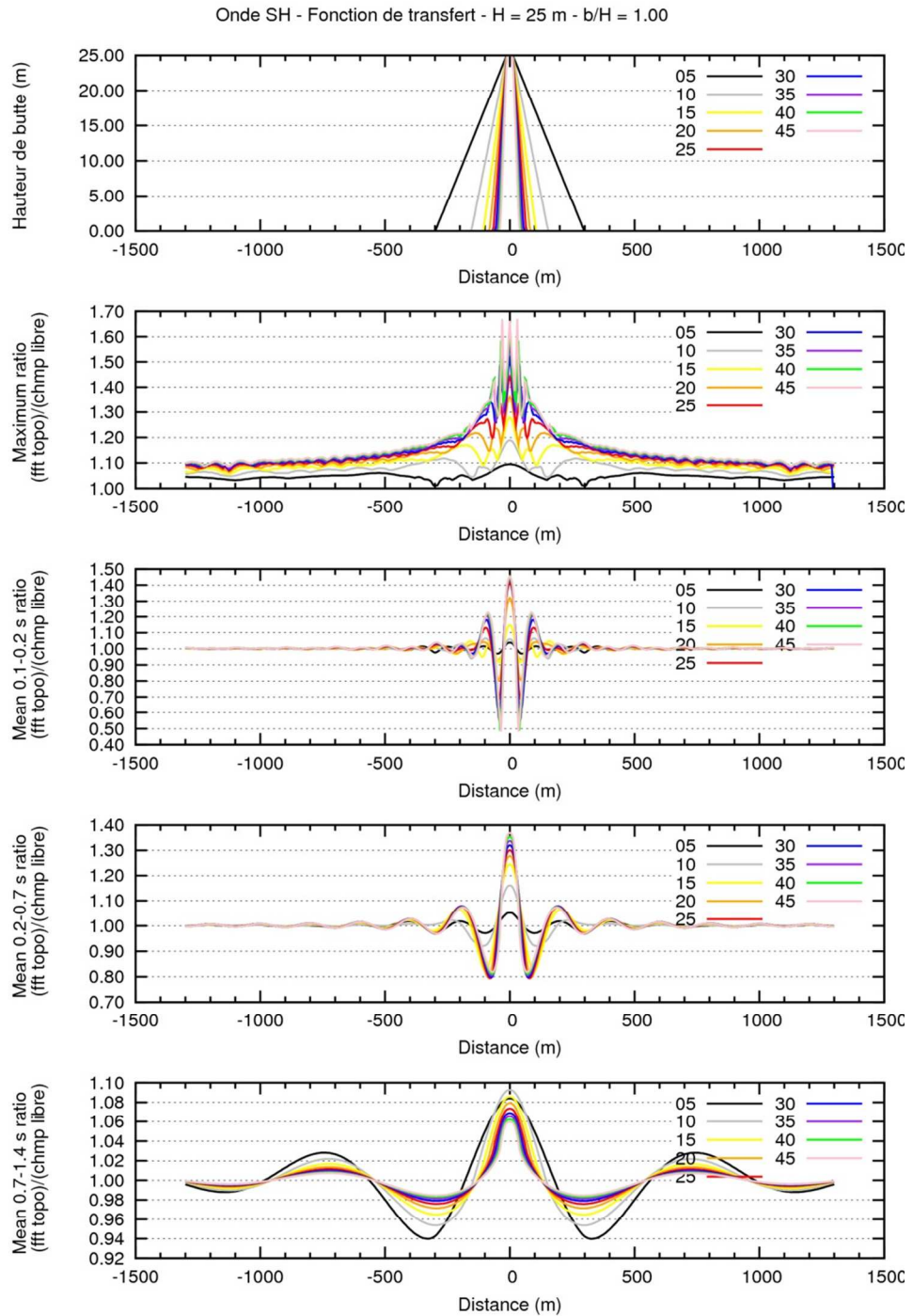


Figure 16 : Exemple de fonction de transfert synthétisée dans les gammes de période 0.1 à 0.2 s, 0.2 à 0.7 s et 0.7 à 1.4 s pour une butte de hauteur $H=25$ m et de ratio $b/H = 1.0$. La légende 05 à 45 indique la valeur de l'angle α .

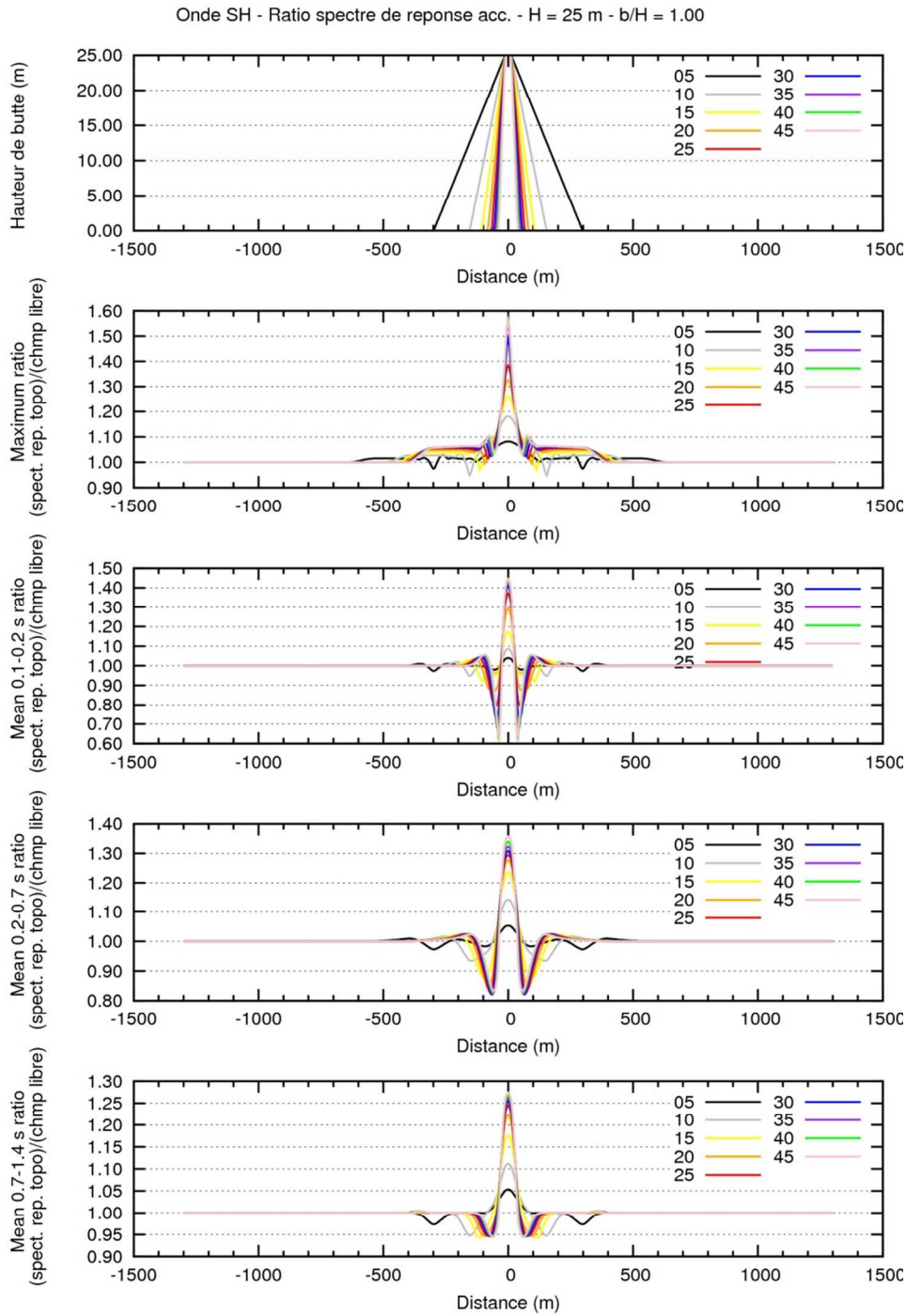


Figure 17 : Exemple de ratio de spectre de réponse synthétisé dans les gammes de période 0.1 à 0.2 s, 0.2 à 0.7 s et 0.7 à 1.4 s pour une butte de hauteur $H=25$ m et de ratio $b/H = 1.0$. La légende 05 à 45 indique la valeur de l'angle α .

5. Résultats des simulations

5.1. BUTTES HOMOGENES

Pour les buttes homogènes de hauteur $H=25$ m, $H=50$ m et $H=100$ m, les résultats sont présents dans les répertoires :

- ANNEXE01-BUTTES-HOMOGENE-H025M
- ANNEXE02-BUTTES-HOMOGENE-H050M
- ANNEXE03-BUTTES-HOMOGENE-H100M.

Pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et $b/H = 4.0$, les résultats obtenus pour des signaux réels sont présents dans les répertoires :

- ANNEXE07-BUTTES-HOMOGENE-H050M-BSH4-AQUILA-Mw6.3-STATION-GSA
- ANNEXE08-BUTTES-HOMOGENE-H050M-BSH4-VALCOMINO-Mw5.5-STATION-ATQ.
- Pour ces deux cas, les signaux synthétiques en surface libre de la butte sont calculés via la convolution entre les signaux montrés en Figure 11 et Figure 12 avec les fonctions de transfert 2D obtenu avec le signal synthétique de Gabor.

5.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE LACHE EN SURFACE

Pour les buttes homogènes avec présence d'une couche lâche en surface ($H_c = 50$ m) de hauteur $H=25$ m, $H=50$ m et $H=100$ m, les résultats sont présents dans les répertoires :

- ANNEXE04-BUTTES-AVEC-COUCHE-LACHE-H025M
- ANNEXE05-BUTTES-AVEC-COUCHE-LACHE-H050M
- ANNEXE06-BUTTES-AVEC-COUCHE-LACHE-H100M.

Pour une butte homogène de hauteur $H=50$ m et $b/H = 1.0$, les résultats obtenus pour un ratio d'impédance égal à 5 sont présents dans le répertoire :

- ANNEXE10-BUTTES-AVEC-COUCHE-LACHE-H050-BSH1-RATIO-IMPEDANCE-5.

5.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES

Pour les buttes homogènes dissymétrique de hauteur $H=50$ m de ratio $b/H = 4.0$, les résultats sont présents dans le répertoire :

- ANNEXE09-BUTTES-HOMOGENE-DISSYMETRIQUE-H050M-BSH4.

6. Discussions des résultats

6.1. BUTTES HOMOGENES

Aux regards des résultats exposés au chapitre 5 « Résultats des simulations » et sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol :

- Les illustrations des répertoires annexes 01, 02 et 03 (cf. CD-ROM) nommés *-ESPACE-TEMPS.pdf montrent 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).
 - Cette hypothèse est invalide si l'on considère la fonction de transfert.
 - Cette hypothèse est invalide si l'on considère un cas avec une onde incidente réelle (cf. répertoires annexes 7 et 8 (cf. CD-ROM), illustrations des fichiers *-ESPACE-TEMPS.pdf).
- Les illustrations dans les fichiers nommés *-COMPARAISON-EC8.pdf montrent que les coefficients simplifiés des Eurocodes 8 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 (cercles bleus dans les illustrations nommées *-COMPARAISON-EC8.pdf) 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 (losanges bleu-clairs dans les illustrations nommées *-COMPARAISON-EC8.pdf)
 - 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%).
 - Les EC8 recommandent d'appliquer les coefficients d'amplification pour des buttes ou pentes dont la hauteur est supérieur 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. Cette remarque pourrait s'avérer fautive pour des simulations viscoélastiques (i.e., avec amortissement).
- L'usage des signaux réels enregistrés lors des séismes de l'Aquila (2009) et de Val Comino (1984) montrent que, pour l'exemple de la butte de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4.0$:
 - Les fonctions de transfert sont indépendantes du signal d'entrée utilisé. Cela est consistant avec la théorie et montre bien que la fonction de transfert est la grandeur maîtresse du problème (à la différence du spectre de réponse en accélération...).
 - L'hypothèse d'appliquer un coefficient S_T constant sur toute la gamme de fréquence du spectre de réponse est invalide.
 - Les signaux réels ont, pour des angles α compris entre 15 et 45°, des valeurs de ratio de spectre de réponse en accélération inférieures (d'environ 10-15%) à celles obtenues avec l'ondelette de Gabor (cf. Figure 18 et Figure 19).
 - En revanche, pour des angles α de 5 et 10°, l'amplification en ratio de spectre de réponse en accélération est supérieure pour les signaux réels. Cette amplification est sous-estimée (d'environ 5 à 10%) par les coefficients de l'Eurocode 8 (cf. Figure 18 et Figure 19).
- Les illustrations dans les fichiers nommés * -MAX-RECEIVERS.pdf (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 les EC8 (cf. Figure 20-milieu) mais à une forme plus complexe qui peut être simplifiée par celle illustrée par la Figure 20-(bas).
- Les illustrations dans les fichiers nommés * -MEAN-RECEIVERS.pdf montrent que la dépendance spatiale des coefficients d'amplification dépend fortement de la fréquence d'intérêt. La Figure 20-(bas) est donc ajustable au niveau des valeurs S_T et D .

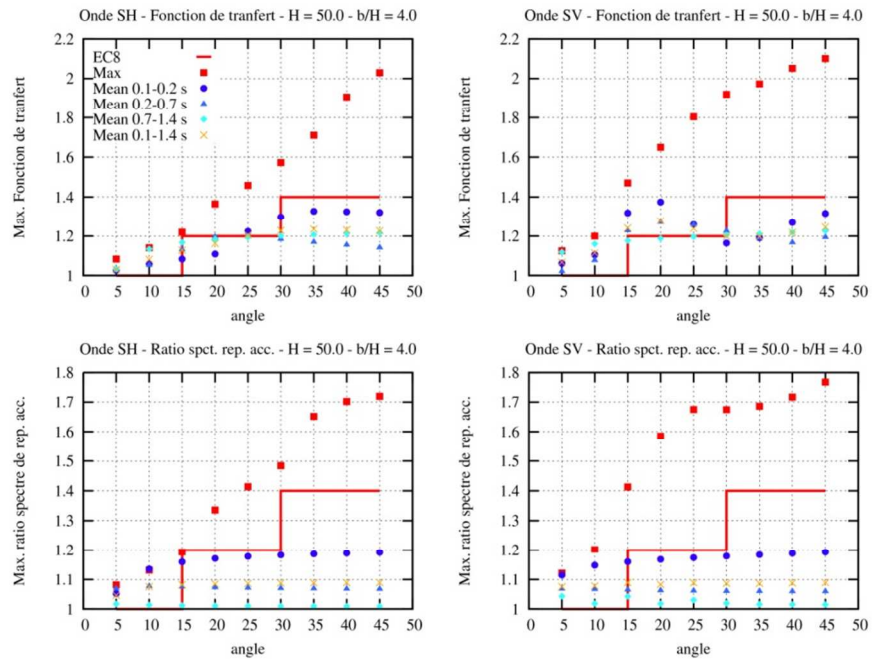


Figure 18 : Coefficients d'amplification topographique pour une butte $H=50$ m et $b/H = 4$ en utilisant le signal de la station GSA lors du séisme de l'Aquila.

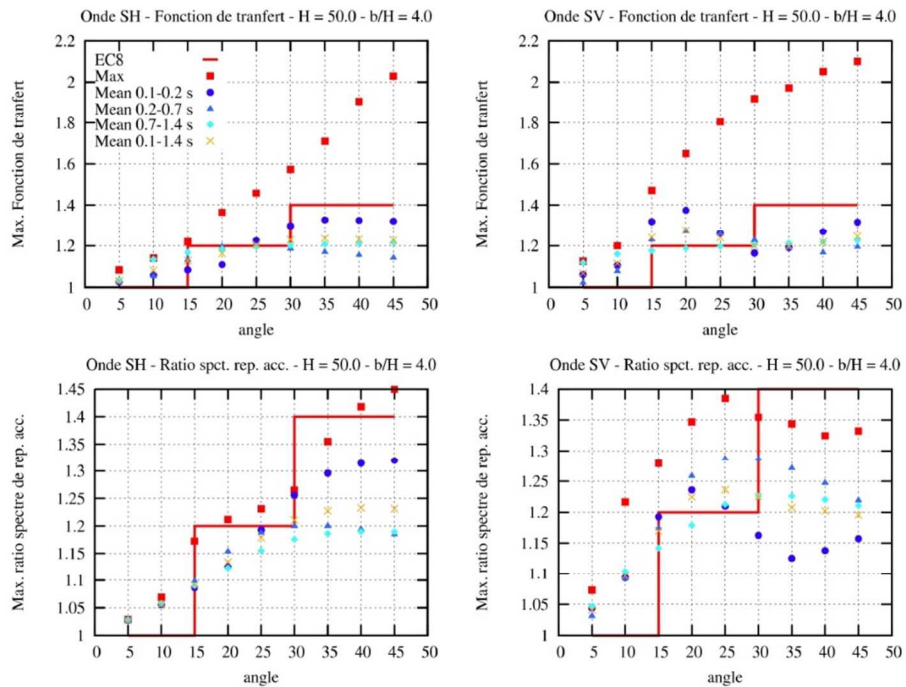


Figure 19 : Coefficients d'amplification topographique pour une butte $H=50$ m et $b/H = 4$ en utilisant une ondelette de Gabor.

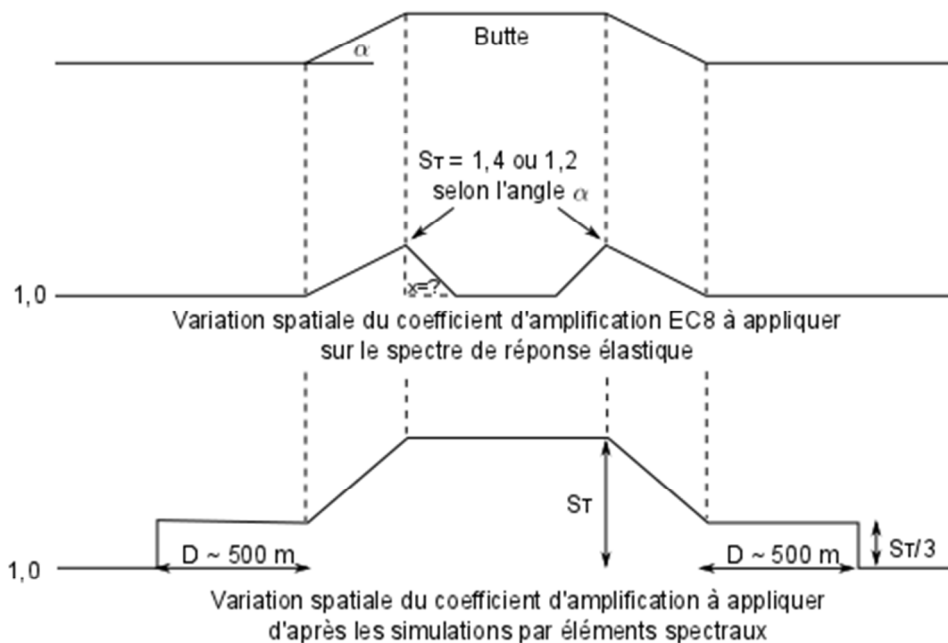


Figure 20 : Forme d'une butte (haut), forme de la variation spatiale des coefficients EC8 (milieu) et forme de la variation spatiale des coefficients obtenus via la méthode des éléments spectraux (bas).

6.2. BUTTES HOMOGENES AVEC COUCHE LACHE EN SURFACE

Avant toute discussion des résultats, il est important de noter que pour les cas avec présence d'une couche en surface, l'application du facteur S_T majoré d'au minimum 20% afin de prendre en compte la couche lâche en surface est ambiguë avec l'application additionnel (ou non ?) du facteur d'amplification S donné dans l'EN 1998-1:200X. Il est simplement mentionné dans les EC8 que ce facteur doit être appliqué sur les ordonnées du spectre de réponse élastique de calcul donné dans l'EN 1998-1:200X. Par précaution, il devrait clairement être précisé dans les EC8-annexe A de la partie 5 « Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques » si ce spectre de réponse élastique est calculé au rocher ou au site (i.e., rocher avec couche lâche en surface) car les différences d'amplification d'une hypothèse à l'autre sont très grandes.

Concrètement, pour l'exemple de la butte de hauteur $H=50$ m et de ratio $b/H = 4,0$, la Figure 21 montre les amplifications obtenues en normalisant les enregistrements en surface avec l'enregistrement au rocher (i.e., champ libre au rocher) et la Figure 22 montre les amplifications obtenues en normalisant les enregistrements en surface avec l'enregistrement au site (i.e., champ libre au rocher avec couche lâche en surface). Une normalisation par rapport au site montre que les coefficients EC8 ont un ordre de grandeur correct (voire trop grand d'environ 5-10%) par rapport aux simulations. A

l'inverse, une normalisation par rapport au rocher montre que les coefficients EC8 sous-estiment fortement (d'environ 20-30%) les résultats des simulations.

En supposant que le spectre de réponse élastique de calcul donnée dans l'EN 1998:200X est calculé au site, alors aux regards des résultats exposés au chapitre 5 « Résultats des simulations » et sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol :

- Les illustrations dans les fichiers nommés *-COMPARAISON-EC8.pdf montrent que les coefficients simplifiés des Eurocodes 8 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, à première vue et en considérant tous les cas, les coefficients EC8 ont tendance à surestimer l'amplification d'environ 15-20%.
 - Pour le cas d'une onde SV incidente sur une butte de hauteur $H=25$ m et $b/H = 1.0$, l'amplification (en considérant la fonction de transfert) dans la gamme de période 0.2–0.7 s est sous-estimée d'environ 10-15% par les EC8. Cette configuration géométrique est néanmoins extrême et peu probable.
- Les illustrations dans les fichiers nommés *-MAX-RECEIVERS.pdf montrent que :
 - La forme de la variation spatiale du maximum du ratio des spectres de réponse est complexe et dépend fortement du type d'onde incidente (SH ou SV).
 - La forme de la variation spatiale des coefficients d'amplification (e.g., ratio spectre de réponse en accélération) est à peu près similaire à celle présentée pour le cas des buttes homogènes décrite en Figure 20-(bas).
- Les illustrations dans les fichiers nommés *-MEAN-RECEIVERS.pdf montrent que la dépendance spatiale des coefficients d'amplification dépend fortement de la fréquence d'intérêt. La Figure 20-(bas) est donc ajustable au niveau des valeurs S_T et D .
- Les résultats obtenus avec un ratio d'impédance de 5 sont présents en ANNEXE10. Les illustrations dans les fichiers nommés *-COMPARAISON-EC8.pdf montrent que l'ordre de grandeur de l'amplification est similaire à celui obtenu pour un ratio d'impédance de 2.5.
 - Néanmoins, les gammes de périodes amplifiées dépendent de la vitesse des ondes S de la couche lâche en surface.

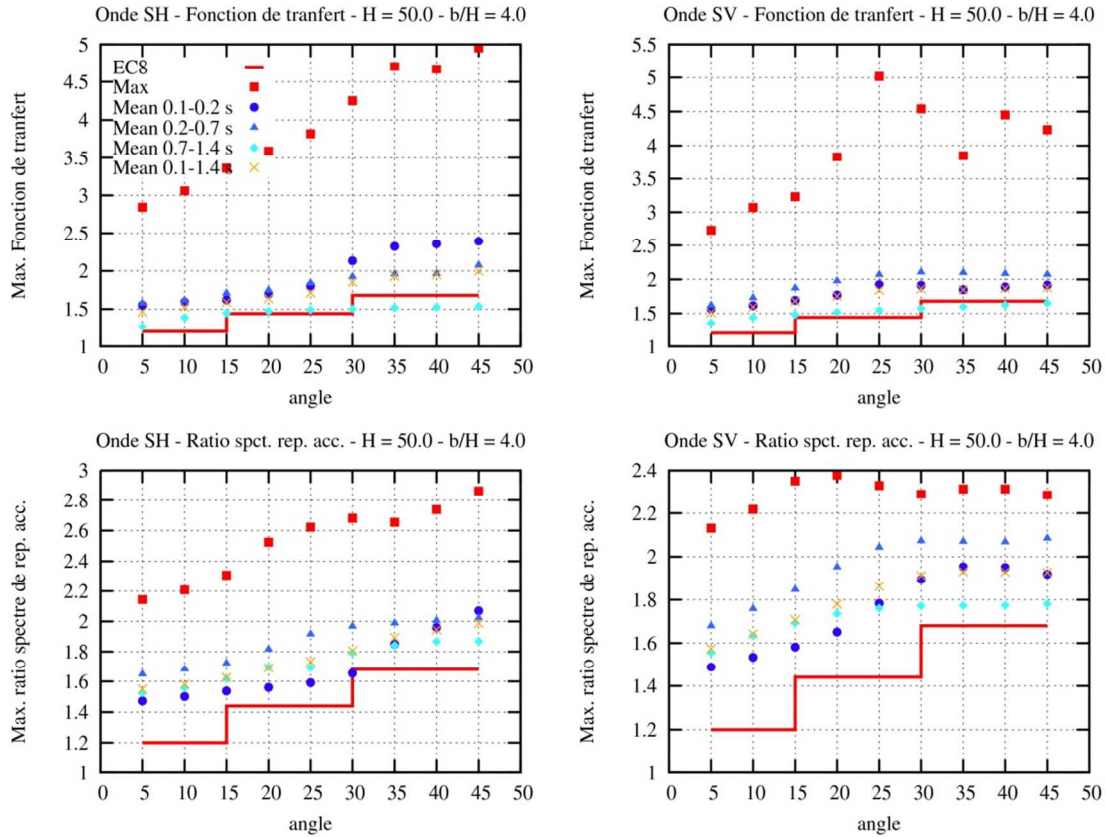


Figure 21 : Calcul des amplifications en normalisant avec le signal enregistré au rocher. La courbe EC8 représente le coefficient S_T augmenté de 20% (comme indiqué par l'annexe A des EC8 lors de la présence d'une couche lâche en surface). Cette courbe ne comprend pas l'amplification S pour un type de sol de classe B.

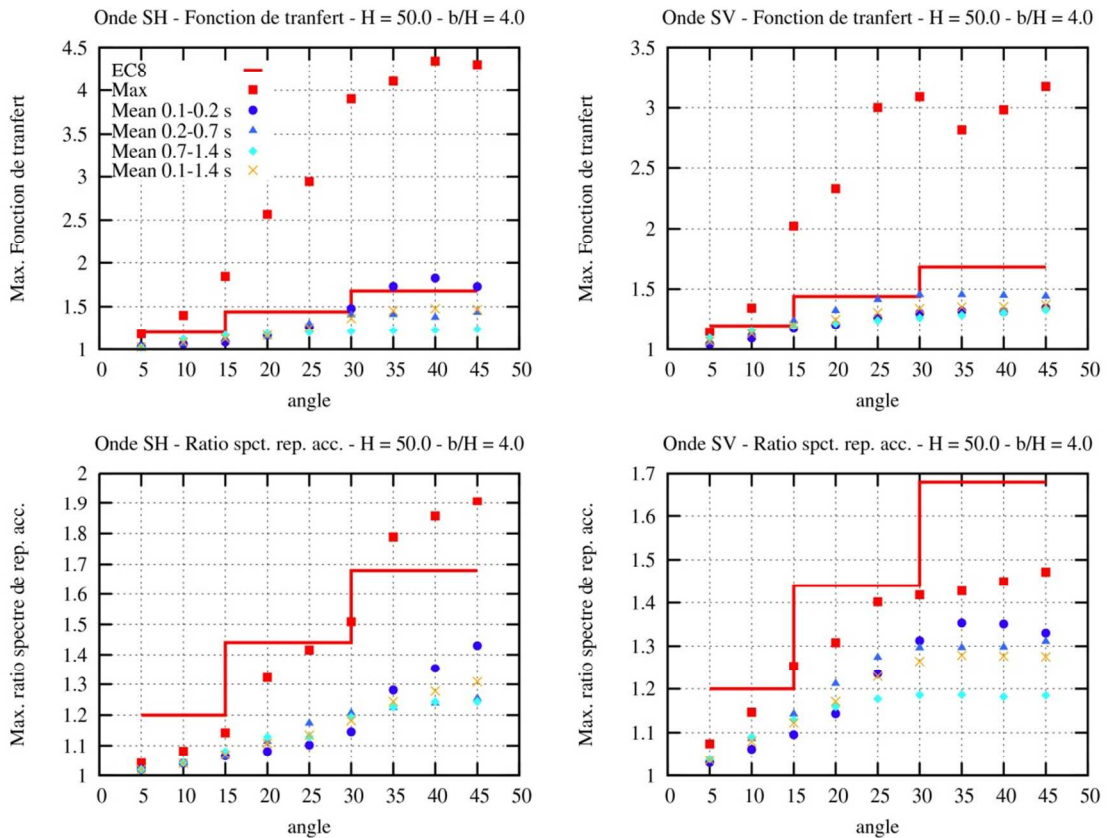


Figure 22 : Calcul des amplifications en normalisant avec le signal enregistré au site (i.e., rocher + couche lâche en surface). La courbe EC8 représente le coefficient S_T augmenté de 20% (comme indiqué par l'annexe A des EC8 lors de la présence d'une couche lâche en surface). Cette courbe ne comprend pas l'amplification S pour un type de sol de classe B.

6.3. BUTTES HOMOGENES DISSYMETRIQUES

Aux regards des résultats exposés au chapitre 5 « Résultats des simulations » et sous l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire du sol :

- Pour le cas d'une butte homogène de hauteur $H = 50$ m et de ratio $b/H = 4.0$, les illustrations dans les fichiers nommés *-COMPARAISON-EC8.pdf et *-MAX-RECEIVERS.pdf montrent que les coefficients d'amplifications du côté de la pente d'angle α_2 sont proches de ceux d'une butte symétrique d'angle $\alpha = \alpha_2$. De plus, les illustrations dans les fichiers nommés *-MAX-RECEIVERS.pdf montrent que les coefficients d'amplifications du côté de la pente d'angle α_1 sont proches de ceux d'une butte symétrique d'angle $\alpha = \alpha_1$.
- Les illustrations dans les fichiers nommés *-MAX-RECEIVERS.pdf montrent que la variation spatiale du coefficient d'amplification dans le cas d'une butte dissymétrique peut être représentée selon la Figure 23 au niveau des valeurs $S_T(\alpha_1)$, $S_T(\alpha_2)$ et D .

- Les illustrations dans les fichiers nommés *-MEAN-RECEIVERS.pdf montrent que la dépendance spatiale des coefficients d'amplification dépend fortement de la fréquence d'intérêt. La Figure 23-(bas) est donc ajustable au niveau des valeurs $S_T(\alpha_1)$, $S_T(\alpha_2)$ et D .

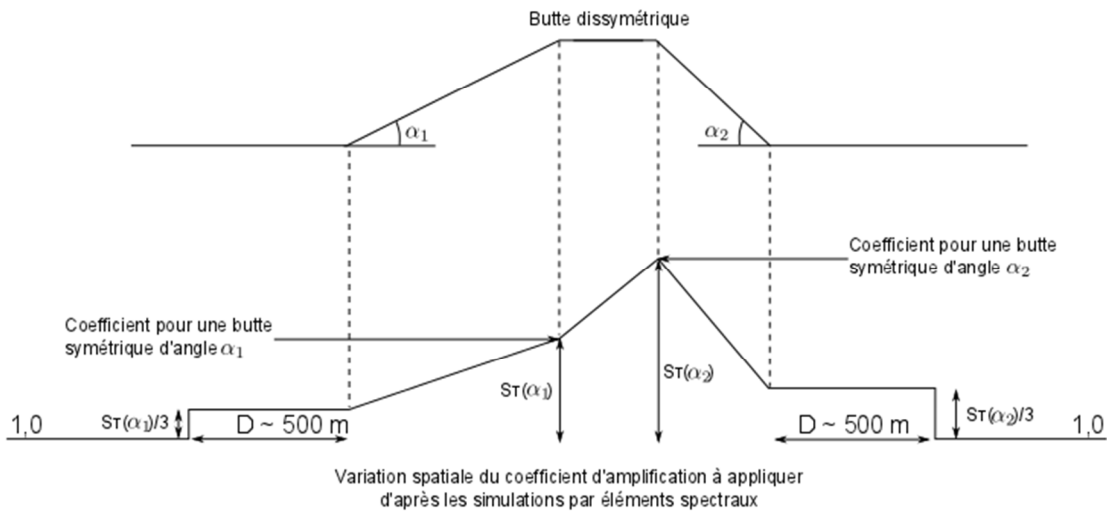


Figure 23 : Forme d'une butte (haut), et forme de la variation spatiale des coefficients obtenus via la méthode des éléments spectraux (bas).

7. Conclusions , recommandations et perspectives

Suite aux 504 simulations effectuées afin de mieux comprendre les amplifications ou dé-amplifications liées aux effets topographiques, nous retiendrons que :

- Le coefficient d'amplification S_T est dépendant de la fréquence, à l'inverse des recommandations EC8 qui préconisent un coefficient d'amplification S_T indépendant de la fréquence (cf. Annexe 1 - paragraphe A.1).
- L'extension spatiale des effets de la topographie est plus complexe que celle recommandée par les EC8 (cf. Annexe 1 - paragraphe A.2-(d)).
- La majoration du coefficient d'amplification S_T d'au moins 20% lors de la présence d'une couche lâche en surface est ambiguë vis-à-vis du coefficient d'amplification lithologique S (EN 1998-1 :200X) (cf. Annexe 1 - paragraphe A.2-(c)).
- L'amplification sismique ne décroît pas toujours rapidement à l'intérieur de la butte, contrairement aux recommandations EC8 (cf. Annexe 1 - paragraphe A.3). Cette décroissance dépend de la gamme de périodes considérées (cf. fichiers *-MEAN-RECEIVERS.pdf dans les répertoires ANNEXE*).
- La constance du problème (1D, 2D ou 3D) est la fonction de transfert et non le spectre de réponse.

Par ailleurs, cette étude nous permet de répondre aux questions évoquées en synthèse :

- Est-ce que les valeurs de coefficients S_T proposées correspondent bien à la majorité des cas que l'on peut rencontrer ? → La réponse dépend de l'angle α et de la gamme de périodes considérées.
 - En fusionnant 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.
 - 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%).

- Y a-t-il un nombre de cas significatifs où l'amplification due aux effets topographiques est sous-estimée ou surestimée ? Oui, cf. réponse à la question ci-dessus.
- Peut-on préciser certains termes qualitatifs tels que « à proximité de la crête », « largeur de la crête notablement inférieure à la largeur de la base » ?
 - Il est difficile de quantifier ces termes, or au vu des résultats, la réponse dépend de nouveau de la gamme de périodes considérées. Nous pouvons néanmoins affirmer que l'influence spatiale de la butte sur le mouvement sismique est inversement proportionnelle à la gamme de périodes considérées (cf. fichiers *-MEAN-RECEIVERS.pdf dans les répertoires ANNEXE*).

En complément de cette étude, il serait judicieux d'explorer :

- L'influence de l'amortissement sur la réponse dynamique d'une butte (i.e., effectuer de nouveaux les simulations en tenant compte du facteur de qualité du milieu).
- L'influence de l'angle d'incidence sur la réponse dynamique de la butte.
- La relation entre les longueurs d'ondes mises en jeu et la variabilité spatiale des coefficients d'amplifications S_T .
- Cette étude paramétrique en trois dimensions.

8. Bibliographie

Une partie des articles sont présents dans le répertoire « ARTICLES » du CD joint au rapport.

De Martin, F. (2011) "Verification of a Spectral-Element Method Code for the Southern California Earthquake Center LOH.3 Viscoelastic Case". Bull. Seism. Soc. Am. Vol. 101 No 6, pp 2855-2865

Fardis M. N., E. Carvalho, A. Alnashai, E. Faccioli, P. Pinto, A. Plumier (2005) "Designers' Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5". Series editor H. Gulvanessian.

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

Paolucci, R. (2002) "Amplification of earthquake ground motion by steep topographic irregularities". Earthquake Engng Struct. Dyn. Vol. 31, pp 1831-1853.

Annexe 1

Eurocode 8 – Partie 5 – « Fondations, ouvrages de soutènement et aspects géotechniques »

Annexe A

Version finale soumise au vote formel
Version Août 2003

Page 33
prEN 1998-5:200X (F)

Annexe A (normative)

Coefficients d'amplification topographique

A.1 Cette annexe fournit certains coefficients simplifiés d'amplification de l'action sismique, utilisés dans les vérifications de stabilité des pentes. Ces coefficients, notés S_T , sont considérés, en première approximation, comme indépendants de la période fondamentale de vibration et, par là-même, multiplient par un facteur constant les ordonnées du spectre de réponse élastique de calcul donné dans l'EN 1998-1:200X. Il convient d'appliquer ces coefficients d'amplification de préférence lorsque les pentes font partie d'irrégularités topographiques bidimensionnelles, comme les buttes et versants longs de hauteur supérieure à environ 30 m.

A.2 Pour des inclinaisons moyennes des terrains en pente, inférieures à environ 15°, les effets topographiques peuvent être négligés, alors qu'une étude spécifique est recommandée dans le cas d'une topographie locale fortement irrégulière. Pour des inclinaisons plus importantes, les indications suivantes sont applicables :

(a) *Versants et pentes isolés.* Il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les sites situés à proximité de la crête ;

(b) *Buttes dont la largeur de la crête est notablement inférieure à la largeur à la base.* Il convient d'utiliser une valeur $S_T \geq 1,4$ à proximité de la crête des pentes dont l'angle d'inclinaison moyen est supérieur à 30°, et une valeur $S_T \geq 1,2$ pour les angles inférieurs ;

(c) *Présence d'une couche lâche en surface.* Dans le cas d'une couche lâche en surface, il convient d'augmenter la valeur de S_T , donnée en (a) et (b), d'au moins 20 % ;

(d) *Variation spatiale du coefficient d'amplification.* On peut admettre que la valeur de S_T décroît linéairement, en fonction de la hauteur au-dessus de la base du versant ou de la butte, jusqu'à valoir un à la base.

A.3 En général, l'amplification sismique décroît rapidement à l'intérieur de la butte. C'est pourquoi les effets topographiques à considérer pour les analyses de stabilité sont plus importants et restent pour la plupart superficiels le long des crêtes de buttes ; ils sont beaucoup plus faibles dans le cas de glissements de terrain profonds pour lesquels les surfaces de rupture passent à proximité de la base. Si dans ce dernier cas la méthode d'analyse pseudo-statique est utilisée, les effets topographiques peuvent être négligés.



Centre scientifique et technique
Direction Risques et Prévention
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34