

Titre du projet : LUBNAN

Volet : International

Porteur du projet : Cécile Cornou

Laboratoires impliqués : ISTerre, Université Libanaise, Université Notre-Dame (Liban)

Bilan du projet 2014-2015

Bilan d'activité (1 page max)

Le financement obtenu auprès de l'appel d'offres du Labex International concernait l'accueil en stage à ISTerre d'étudiants de l'université libanaise ainsi que la dispense d'un enseignement en sismologie de l'ingénieur au sein du master recherche Génie Civil de l'Université Libanaise.

Dans ce cadre, trois étudiants, en 5^{ème} année d'école d'ingénieur de l'université libanaise, ont été accueillis pour une durée de 3 mois au printemps 2015 :

- Anthony Adwan. Evaluation quantitative de l'apport de la méthode H/V dans les sites présentant des géométries complexes, encadrement : C. Cornou, B. Guillier (ISTerre)
- Rita Abou Jaoude. Analysis of the 2D spatial variability of seismic ground motion in laterally heterogeneous soil configurations, encadrement: C. Cornou, E. Chaljub (ISTerre)
- Michelle Al Makari. Prise en compte du comportement non-linéaire du sol pour l'estimation des effets aggravants de la coïncidence de fréquences sol-structure, encadrement : C. Salameh, Pierre-Yves Bard, Bertrand Guillier (ISTerre)

Les résultats obtenus lors des stages de Rita Abou Jaoude et de Michelle Al Makari ont donné lieu à des articles de conférences présentés en décembre 2015 lors du 9^{ème} colloque national de l'Association Française de Génie Parasismique. Ces actes de conférences sont joints en annexe.

Désirant approfondir leurs compétences en sismologie et en géophysique, Rita Abou Jaoude et Michelle Al Makari ont postulé au M2R Terre Solide de l'UJF, formation qu'elles suivent actuellement.

Par ailleurs, C. Cornou a dispensé, en 2014, un enseignement intitulé « utilisation de la géophysique en sismologie de l'ingénieur » au sein du M2R Génie Civil de l'université libanaise. Cet enseignement a été reconduit en 2015 et co-financé par l'Université Libanaise.

Illustrations - avec légende et crédit (à envoyer également séparément)

Production scientifique (articles scientifiques, actes de congrès...)

Actes de conférences avec comité de lecture:

Abou Jaoude, R., Cornou, C., & Chaljub, E. (2015). Analyse de la variabilité spatiale bidimensionnelle du mouvement sismique pour des configurations de sols latéralement hétérogènes, 9^{ème} colloque national de l'Association Française de Génie Parasismique, 30 novembre – 2 décembre 2016, Marne-la-Vallée, France. (oral)

Salameh, C., Almakari, M., Bard, P.-Y., Cornou, C., & Guillier, B. (2015). Prise en compte de la coïncidence de fréquences sol-structure dans les évaluations de vulnérabilité et de risque sismiques se basant sur l'approche neuronale, 9^{ème} colloque national de l'Association Française de Génie Parasismique, 30 novembre – 2 décembre 2016, Marne-la-Vallée, France. (oral)

Bilan financier succinct (*avec suivant les cas : co-financements éventuels, équipements achetés, missions, recrutements divers, fonctionnements divers...*)

Accueil de 3 étudiants libanais en stage à ISTerre : 9200 euros

Co-financement de la mission d'enseignement de C. Cornou à l'université libanaise en novembre 2014 : 1200 euros, le complément de la mission ayant été pris en charge par l'ANR Libris.

Annexes si besoin ou lien sur des sites existants et pérennes jusqu'à la fin du Labex (2020)

Analyse de la variabilité spatiale bidimensionnelle d'un mouvement sismique pour des configurations de sols latéralement hétérogènes.

Rita Abou Jaoudé*,** — Cécile Cornou* — Emmanuel Chaljub*

* ISTERre (Institut des Sciences de la Terre), CNRS/UJF/IRD

Maison des Géosciences BP53X

38041 Grenoble Cédex 9

{cecile.cornou, emmanuel.chaljub} @ujf-grenoble.fr

ritaaboujaoude@hotmail.co.uk

** Université Libanaise, Faculté de Génie, Branche II, Roumieh, Liban

RESUME : De nombreux séismes ont montré des distributions spatialement très hétérogènes des dégâts sur de courtes distances (de quelques dizaines à quelques centaines de mètres), même pour des structures de génie civil semblables (par exemple, Boumerdes 2003 ; Christchurch, 2010). Hormis des défauts structurels propres à ces structures, ces variations de dommages pourraient être causées par un mouvement du sol variable en amplitude et en phase d'un site à l'autre. La variabilité spatiale du mouvement sismique peut en effet conduire à des mouvements différentiels importants pouvant particulièrement affecter la réponse des structures de grande portance au sol (ponts, barrages, etc.). L'objectif de cette étude est de mieux comprendre la relation entre la variabilité spatiale du mouvement sismique et la variation spatiale de la structure du sous-sol, notamment à proximité des bords de vallée sédimentaire. Nous avons utilisé le mouvement sismique en surface calculé, dans le cadre du projet européen NERA, pour une vallée bidimensionnelle ayant différents profils de vitesse en ondes et excitée par des ondes planes verticalement incidentes en ondes SH dans une gamme de fréquences de 0.1 à 20 Hz. La variabilité du mouvement sismique en surface est analysée en termes de fonction de cohérence. La perte de cohérence sur de courtes distances du mouvement sismique est particulièrement prononcée à proximité des bords de vallée. Cette perte de cohérence, causée par les ondes de Love localement diffractées sur les bords de la structure, est d'autant plus importante que les sédiments sont « mous ». Les pertes de cohérence se produisent dans des bandes de fréquences étroites qui dépendent du modèle de vitesse en ondes S et de la distance depuis le bord de la vallée. Les analyses réalisées dans cette étude suggèrent que la cohérence diminue fortement lorsque la longueur d'onde de l'onde de surface (modes fondamental et harmoniques) est égale à environ 2 fois l'épaisseur locale des sédiments sous le couple de récepteurs considérés pour le calcul de la cohérence.

MOTS-CLÉS: Variabilité spatiale, Cohérence, Mouvement du sol,

1. Introduction

De nombreux séismes ont montré des distributions spatialement très hétérogènes des dégâts sur de courtes distances (de quelques dizaines à quelques centaines de mètres), même pour des structures de génie civil semblables (par exemple, Boumerdes 2003 ; Christchurch, 2010). Hormis des défauts structurels propres à ces structures, ces variations de dommages pourraient être causées par un mouvement du sol variable en amplitude et en phase d'un site à l'autre. La variabilité spatiale du mouvement sismique peut en effet conduire à des mouvements différentiels importants pouvant particulièrement affecter la réponse des structures de grande portance au sol (ponts, barrages, etc.). L'objectif de cette étude est de mieux comprendre la relation entre la variabilité spatiale du mouvement sismique et la variation spatiale de la structure du sous-sol, notamment à proximité des bords de vallée sédimentaire. Nous avons utilisé des sismogrammes synthétiques calculés, dans le cadre du projet européen NERA, pour une vallée bidimensionnelle ayant différents profils de vitesse en ondes S et excitées par des ondes planes verticalement incidentes en ondes SH. La variabilité du mouvement sismique à proximité des bords de vallée est analysée en termes de fonction de cohérence afin d'étudier les liens possibles entre la cohérence et les caractéristiques géométrique et mécanique du site, exprimées en terme de longueur d'onde.

1. Données et méthodes

Cette étude est basée sur les mouvements synthétiques du sol calculés à l'aide de la méthode des éléments spectraux (Chaljub et al., 2007) sur un large ensemble de vallées bidimensionnelles. Les données synthétiques, calculées durant le projet européen NERA, contiennent les vitesses et déformations enregistrées par des récepteurs virtuels localisés à la surface de 972 vallées sédimentaires bidimensionnelles, de différentes géométries (Figure 1) et caractéristiques mécaniques, caractérisées notamment par 6 profils de vitesses en ondes P et S (modèles de vitesse NERA 1, NERA 2, NERA 3, NERA 4, NERA 5, NERA 6). Ces vallées sont excitées par des ondes planes verticalement incidentes de polarisation SH et SV ayant un contenu fréquentiel variant entre 0.1 Hz et 20 Hz.

Dans ce papier, nous avons utilisé uniquement une excitation en ondes SH et une géométrie de vallée ayant une épaisseur sédimentaire maximale de 250 m, une largeur de 20 km et une valeur X_h de 700 m. Les pentes considérées sont $\alpha_1 = 20$ degrés et $\alpha_2 = 65$ degrés. Les vitesses des ondes P (V_P), des ondes S (V_S) et la densité ρ dans le substratum rocheux sont, respectivement, de 2000 m/s, 1000 m/s et 2500 kg/m³. La densité dans les sédiments varie linéairement avec la vitesse des ondes S : $\rho(z) = 1600 + 0.6 (V_S(z) - 100)$, avec z la profondeur. Le facteur de qualité des ondes S est $Q_S(z) = V_S(z)/10$ tandis que le facteur de qualité des ondes P est $Q_P(z) = \text{Min}(2 * Q_S(z), V_P(z)/10)$. Nous avons considéré trois profils de vitesses en ondes S dont les caractéristiques sont indiquées dans le Tableau 1 et représentées sur la Figure 2.

Les sismogrammes sont calculés à 401 récepteurs espacés de 50 m le long de chaque vallée et 10 récepteurs au rocher, localisés en dehors de la vallée et espacés de 1 km. La Figure 3 montre les vitesses simulées pour la vallée sédimentaire d'épaisseur maximale de 250 m et le modèle de vitesse NERA 1.

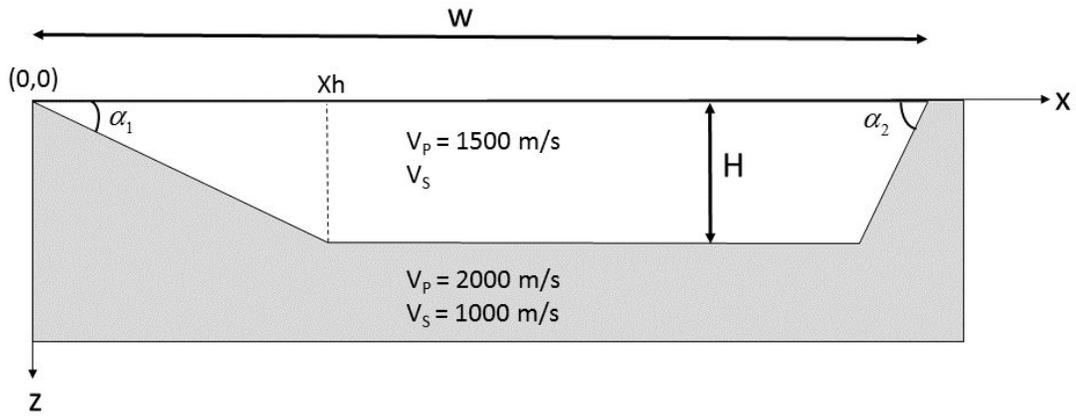


Figure 1 : Géométrie type d'une vallée 2D. Chaque vallée est caractérisée par sa largeur (W), son épaisseur maximale (H), les pentes, α_1 et α_2 , des bords de vallées.

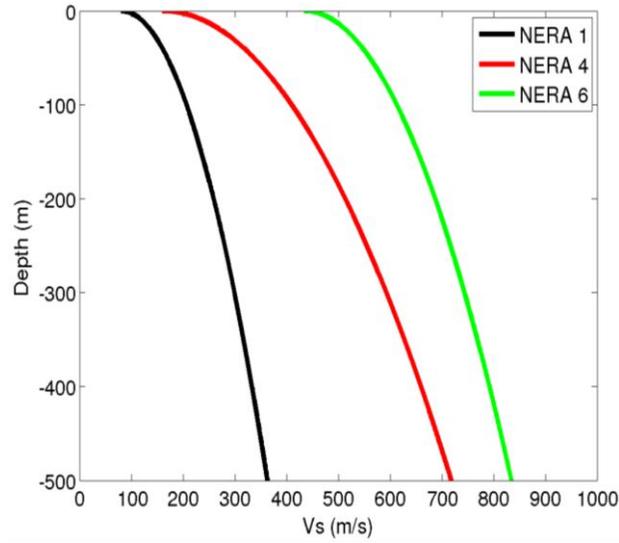


Figure 2 : Profils de vitesse en ondes S considérées pour les modèles NERA 1, NERA 4 et NERA 6.

Tableau 1 : Caractéristiques des profils de vitesse en ondes S des modèles NERA 1, NERA 4 et NERA 6.

Loi de vitesse	$V_S(z) = V_{S0} + (V_{S1} - V_{S0}) \left[\frac{(z - z_0)}{(z_1 - z_0)} \right]^{0.5}$; $z_0 = 0$ m, $z_1 = 1000$ m		
Modèle	NERA 1	NERA 4	NERA 6
V_{S0} (m/s)	80	160	434
V_{S1} (m/s)	480	950	1000

La cohérence permet de mesurer les variations de phase entre deux ou plusieurs signaux enregistrés à différentes positions. C'est une méthode stochastique largement utilisée en ingénierie pour l'estimation de la variabilité spatiale.

Dans cette étude, nous avons utilisé la module de la cohérence complexe, $\tilde{\gamma}$, plus communément appelé la « lagged coherency » (Zerva, 2009):

$$|\tilde{\gamma}_{jk}(\omega)| = \frac{|\tilde{S}_{jk}(\omega)|}{\sqrt{\tilde{S}_{jj}(\omega)\tilde{S}_{kk}(\omega)}} \quad [1]$$

Avec j et k , les indices correspondant à deux sites distincts; ω , la pulsation; $\tilde{S}_{jk}(\omega)$, l'interspectre lissé et $\tilde{S}_{jj}(\omega)$, l'autospectre lissé. Les signaux temporels sont décimés jusqu'à obtenir une fréquence d'échantillonnage de 25 Hz et les spectres ont été lissés sur 11 points en utilisant une fenêtre de Hamming (Abrahamson et al., 1991).

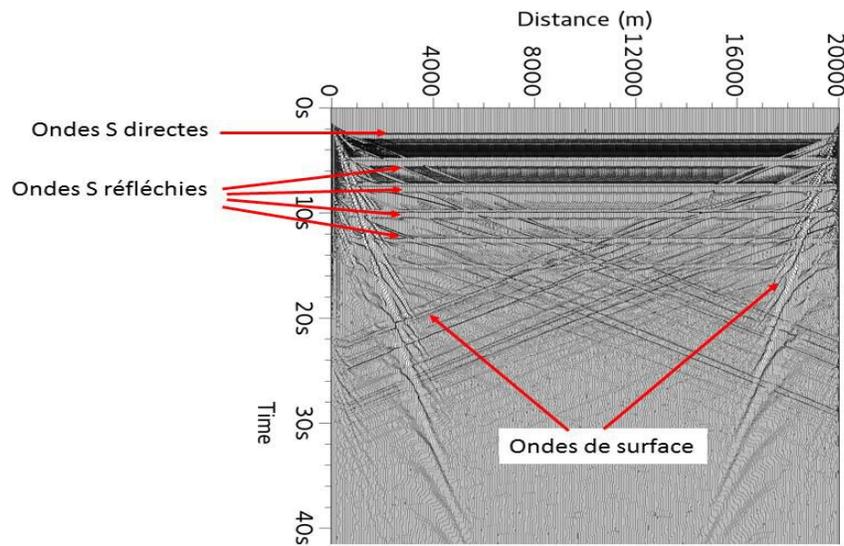


Figure 3: Vitesses simulées pour la vallée sédimentaire de profondeur 250 m et le modèle de vitesse NERA 1. Un gain de type AGC (Automatic Gain Control) a été appliqué aux traces sismiques.

Afin d'étudier l'effet des ondes de Love diffractées aux bords de la vallée sur la cohérence, nous avons sélectionné une fenêtre temporelle débutant avant l'arrivée de l'onde SH et comprenant l'onde de Love diffractée. La durée des fenêtres de temps sélectionnées est de 5 s, 3 s et 2 s pour, respectivement, les modèles de vitesse NERA1, NERA4 et NERA6. Les sismogrammes ont été recalés sur le temps d'arrivée de l'ondes SH de sorte que la cohérence ne soit sensible qu'à l'onde de Love (Figure 4).

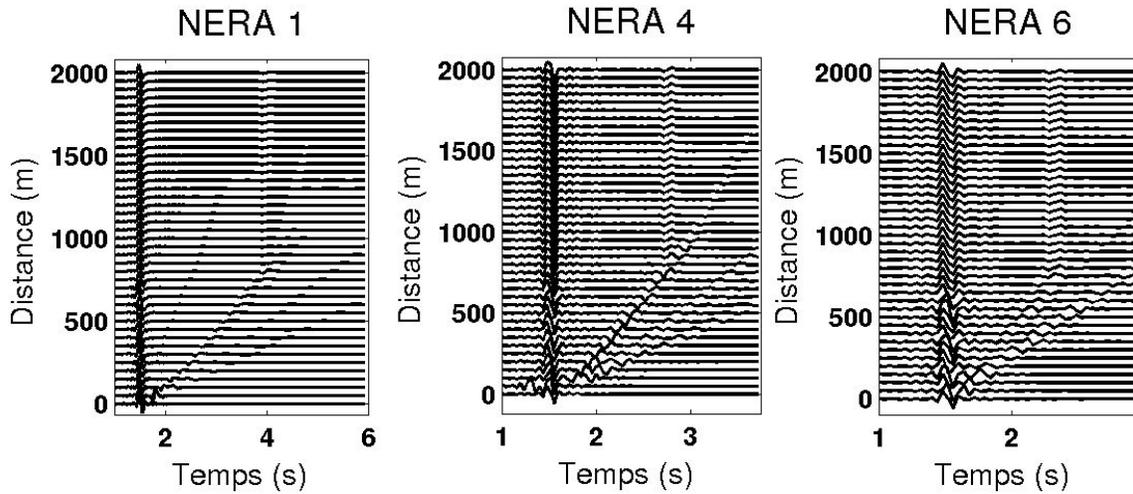


Figure 4 : Signaux en vitesse alignés sur le temps d'arrivée de l'onde SH pour les trois modèles de vitesses NERA 1, NERA 4 et NERA 6. Le récepteur localisé à une distance de 0 m est situé au bord de la vallée.

2. Cohérence spatiale

La Figure 5a présente les cohérences calculées, à différentes fréquences, entre la vitesse enregistrée au récepteur localisé au bord de la vallée ($x = 0$ m) et les vitesses enregistrées dans la vallée (Figure 1). La cohérence est proche de 1 pour des distances supérieures à $X_h = 700$ m due au fait que la fenêtre d'analyse, pour les récepteurs localisés à plus de 700 m du bord, contient principalement les ondes SH directe et réfléchie (Figure 4). A proximité des bords, la cohérence diminue particulièrement pour les modèles de vitesse NERA1 et NERA4 qui présente de faibles vitesses d'ondes S. Par ailleurs, la perte de cohérence affecte préférentiellement les fréquences inférieures à 4 Hz. La Figure 5b indique, pour différentes distances entre la station localisée au bord de la vallée et des stations dans la vallée, la cohérence en fonction de la fréquence. Alors que les cohérences sont proches de 1 pour le modèle de vitesse le plus raide (NERA 6), les modèles de vitesse NERA 1 et NERA 4 présentent des pertes de cohérences dans des bandes de fréquences étroites, variables selon la distance entre stations. Plus la distance inter-station augmente, plus la perte de cohérence se produit à des fréquences faibles. Pour le modèle NERA 1, par exemple, nous observons une forte perte de cohérence pour une distance de 50 m à de 4 Hz et à 2 Hz pour une distance de 100 m (Figure 5b).

Par ailleurs, aux fréquences supérieures à 6 Hz, la cohérence croît notablement pour tendre vers 1. Ces fortes cohérences à haute fréquence s'expliquent par le fait que les ondes de Love se propagent avec des longueurs d'onde inférieures à 20 m aux fréquences supérieures à 6 Hz et, hormis à proximité même du bord de vallée (distance inférieure à 50 m), ces ondes ne « voient » pas la variation latérale de vitesses du milieu (Figure 6).

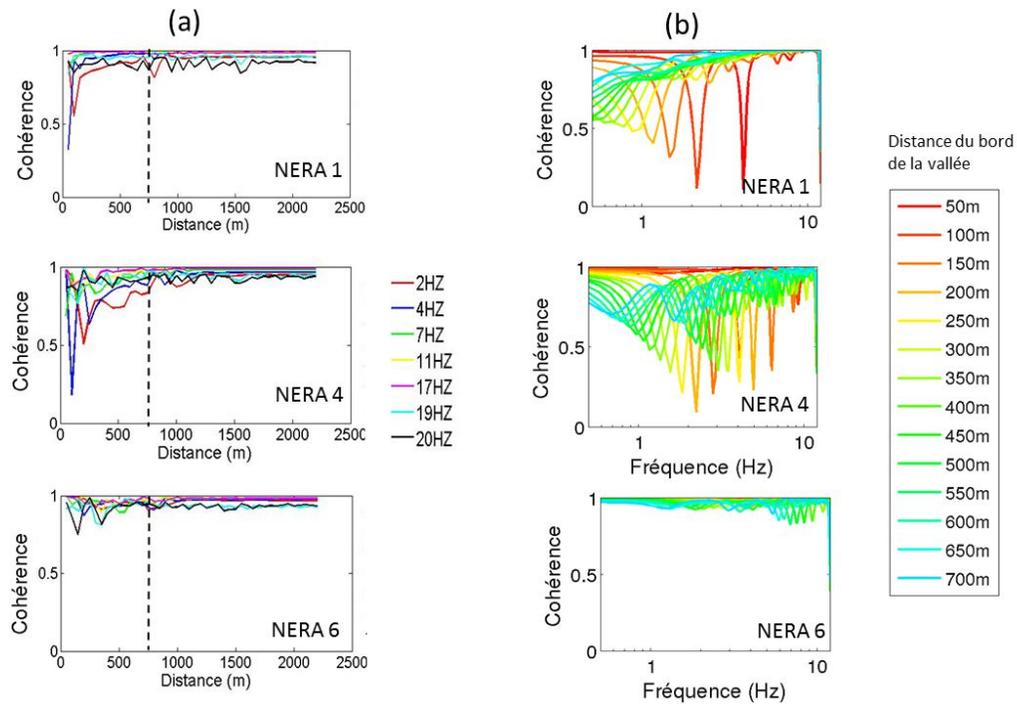


Figure 5 : (a) Cohérence en fonction de la distance depuis le récepteur localisé au bord de la vallée pour les modèles de vitesse NERA 1, NERA 4 et NERA 6 et différentes fréquences. La ligne en pointillé indique la distance X_h (Figure 1). (b) Cohérence en fonction de la fréquence pour les modèles de vitesse NERA 1, NERA 4 et NERA 6 et pour différentes distances entre le récepteur localisé au bord de la vallée et les récepteurs dans la vallée.

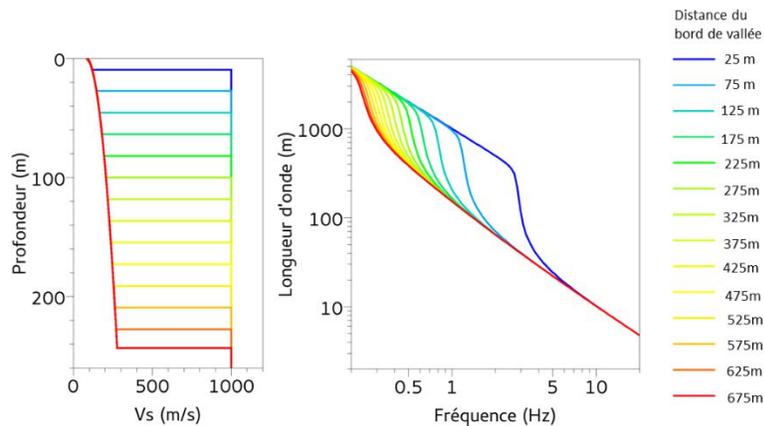


Figure 6 : (gauche) Profils de vitesse en ondes S aux sites localisés à différentes distances depuis le bord de la vallée ; (droite) Longueur d'onde du mode fondamental des ondes de love en fonction de la fréquence et pour les différents modèles de vitesses en ondes S présentés en (a).

4.Relation entre cohérence, longueur d'ondes et épaisseur des sédiments

Afin de mieux comprendre la relation entre la perte de cohérence, l'épaisseur des sédiments et les longueurs d'ondes associées, nous avons calculé les cohérences pour chaque couple de récepteurs espacés de 50 m. Les cohérences ont ainsi été calculées entre les signaux enregistrés aux récepteurs situés entre 0 et 50 m, 50 et 100 m, 100 et 150 m, 150 et 200 m, etc.

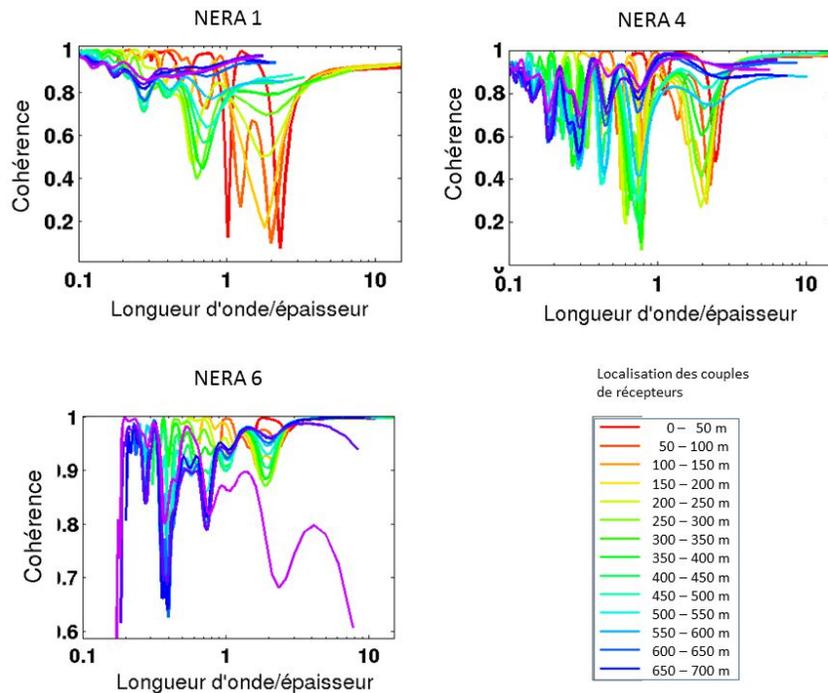


Figure 7 : Cohérence, pour les modèles de vitesse NERA 1, NERA 4 et NERA 6, en fonction du rapport longueur d'ondes sur épaisseur locale à l'aplomb du couple de récepteurs considérés pour le calcul de la cohérence. Les différentes courbes en couleur correspondent aux différents couples de récepteurs. La longueur d'ondes considérée est celle du mode fondamental des ondes de Love.

La figure 7 montre, pour les modèles de vitesse NERA 1, NERA 4 et NERA 6, la cohérence en fonction du rapport longueur d'ondes (mode fondamental des ondes de Love) sur épaisseur locale des sédiments à l'aplomb du couple de récepteurs considéré pour le calcul de la cohérence. Nous observons des pertes de cohérence à des rapports longueur d'onde / épaisseur sédimentaire caractéristiques d'environ 2 quel que soit le modèle de vitesse considéré, ainsi qu'à des rapports plus variables entre 0.3 - 0.4 et 0.7 - 0.8. L'amplitude de la perte de cohérence à ces rapports caractéristiques dépend du modèle de vitesse considéré et de la distance depuis le bord de la vallée du couple de récepteurs. Plus le couple de récepteurs est proche du bord de la vallée, plus la forte perte de cohérence se produit à des rapports longueur d'ondes sur épaisseur élevés.

Afin d'étudier sur les baisses de cohérence étaient liées à un mode de propagation d'onde de Love particulier, nous avons calculé les courbes de dispersion des 4 premiers modes des ondes de Love en fonction du rapport longueur d'ondes sur épaisseur. La Figure 8 montre les cohérences calculées pour chaque couple de capteurs espacés de 50 m en fonction de la fréquence et, pour le couple de récepteurs situés à 200 et 250 m du bord de la vallée, le report des valeurs de cohérence sur les courbes de dispersion des 4 premiers modes des ondes de Love en fonction du rapport longueur d'ondes sur épaisseur. Pour le modèle de vitesse NERA 1 et ce couple de récepteurs, les pertes de cohérences se produisent à 1 Hz et 2.5 Hz. Ces pertes de cohérence peuvent être associées soit aux caractéristiques de propagation, pour un rapport longueur d'ondes sur épaisseur de 2, du mode fondamental et du second harmonique des ondes de Love, soit aux caractéristiques de propagation du mode fondamental à différentes longueurs d'ondes. Les séries temporelles indiquées sur la Figure 4 indiquent clairement la présence de plusieurs modes d'ondes de Love, ce qui tend à suggérer des pertes de cohérence lorsque la longueur d'onde correspond à 2 fois l'épaisseur sédimentaire locale

quel que soit le mode de propagation considéré. Pour le modèle NERA 4, nous observons également une perte de cohérence associée au mode fondamental et au deuxième harmonique des ondes de Love pour un rapport longueur d'ondes sur épaisseur locale de 2.

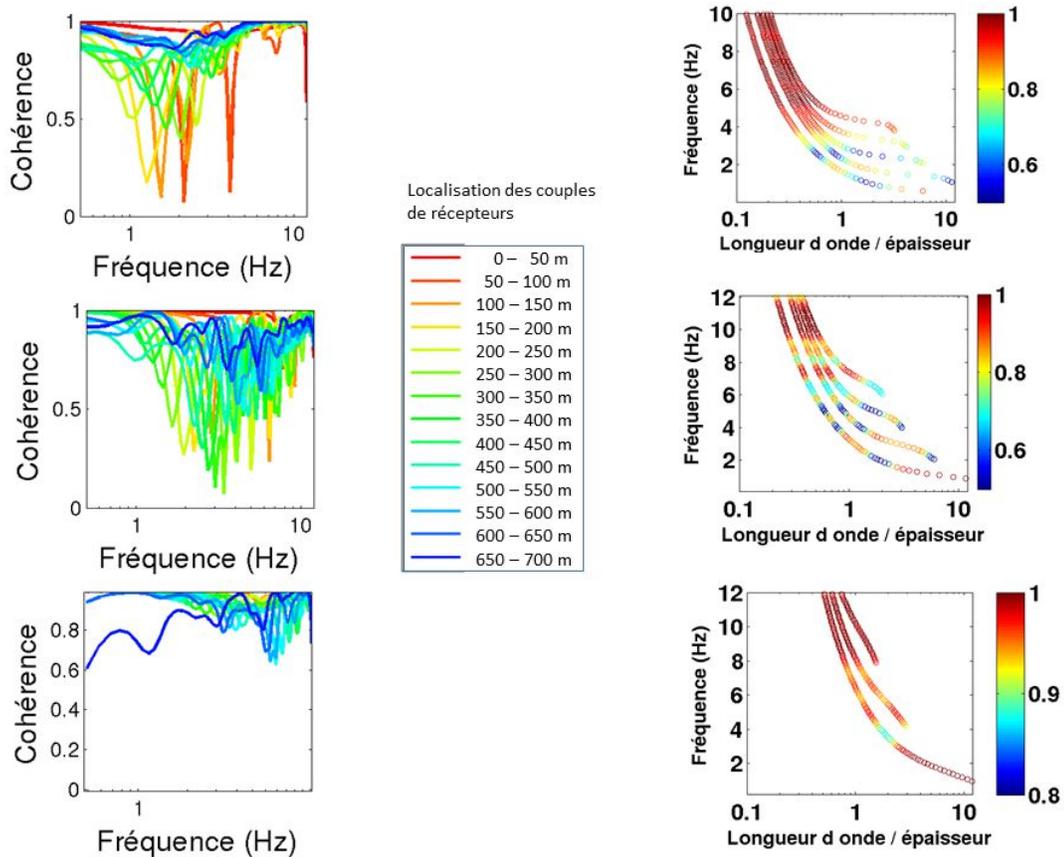


Figure 8 : (Gauche) Cohérence en fonction de la fréquence pour différents couples de récepteurs ; (Gauche) Courbes de dispersion des 4 premiers modes des ondes de Love exprimées en terme de fréquence et de rapport entre la longueur d'onde et l'épaisseur locale des sédiments à l'aplomb du couple de récepteurs situés entre 200 m et 250 m du bord de la vallée. La courbe de dispersion est calculée à partir du modèle de vitesse ayant l'épaisseur sédimentaire locale précédemment mentionnée. Les valeurs de cohérence sont reportées en couleur.

5. Conclusion

L'analyse des sismogrammes synthétiques calculés pour une vallée bidimensionnelle ayant différents profils de vitesse en ondes S excitée par une onde plane verticalement incidente de polarisation SH montre que la variabilité spatiale du mouvement sismique, exprimée en terme de fonction de cohérence, est importante à proximité du bord de la vallée. Cette perte de cohérence, causée les ondes de Love localement diffractées sur les bords de la structure, est d'autant plus importante que les sédiments sont « mous ». Les pertes de cohérence se produisent dans des bandes de fréquences étroites, fréquences d'autant plus élevées que les récepteurs considérés pour le calcul de la cohérence sont proches du bord de la vallée. Par ailleurs, les analyses réalisées dans cette étude suggèrent que la cohérence diminue fortement lorsque la longueur d'onde de l'onde de surface (modes fondamental et harmoniques) est égale à environ 2 fois l'épaisseur locale des sédiments sous le couple de récepteurs considérés pour le calcul de la cohérence.

Des analyses approfondies impliquant d'autres vallées bidimensionnelles de caractéristiques géométrique et mécanique différentes mériteraient d'être réalisées pour confirmer ou non ces résultats, ainsi que pour mieux appréhender la physique sous-jacente à la perte de cohérence à ce rapport longueur d'onde sur épaisseur de 2.

6.Références

Abrahamson, N. A., « Spatial Variation of Earthquake Ground Motion for Application to Soil-Structure Interaction ». *Electrical Power Research Institute, Rpt. No. EPRI TR-100463, Tier 2*, 1992.

Chaljub, E., Komatitsch, D., Vilotte, J. P., Capdeville, Y., Valette, B., & Festa, G. (2007). « Spectral-element analysis in seismology », *Advances in Geophysics*, 48, 365-419, 2007.

Zerva A. , « Spatial Variation of Seismic Ground Motion: Modeling and Engineering Applications », 2009 by Taylor ad Francis Group, LLC.

Prise en compte de la coïncidence de fréquences sol-structure dans les évaluations de vulnérabilité et de risque sismiques se basant sur l'approche neuronale.

Christelle Salameh¹, Michelle Almakari², Pierre-Yves Bard¹, Bertrand Guillier¹,
Cécile Cornou¹

1. ISTERre, Université J. Fourier, Grenoble, France
1381 Rue de la piscine, 38400 Saint Martin d'Hères
 2. Université Libanaise, Faculté de Génie Branche 2
Roumieh, El Metn, Liban
-

RÉSUMÉ. Il a été observé maintes fois dans les investigations post-sismiques, que les bâtiments présentant des fréquences de résonance similaires à celles du sol de fondation étaient soumis à des dommages sensiblement plus importants (Caracas 1967, Mexico 1985, Pujili 1996, L'Aquila 2009). Cette observation n'est généralement que très peu, ou de façon très indirecte, prise en compte d'une part dans les règlements parasismiques actuels (échelle du bâtiment), et d'autre part dans les études de risque et vulnérabilité sismiques (échelle urbaine). Nous avons réalisé une analyse théorique pour étudier l'effet de la coïncidence entre les fréquences du sol et du bâtiment. Dans un premier temps, 887 profils de sols réels ayant un comportement linéaire sont associés à un ensemble d'oscillateurs élastoplastiques à 1 degré de liberté. Les résultats obtenus à ce jour permettent de quantifier l'incrément de dommages entre sol et rocher en fonction de la coïncidence de fréquence. Cette analyse a été faite en tenant compte d'autres paramètres liés à l'excitation (PGA), au sol (contraste d'impédance) ou à la structure (ductilité notamment) en se basant sur l'approche neuronale qui ne nécessite aucune connaissance a priori.

ABSTRACT. It has been observed repeatedly in the post-seismic investigations that structures having frequencies similar to that of soil foundation exhibited significantly greater damage (Caracas 1967, Mexico 1985, Pujili 1996, L'Aquila 2009). However this observation is generally not taken directly into account neither in present-day seismic regulations (small scale), nor in large-scale seismic risk analysis. We considered a theoretical analysis to study the effect of coincidence between soil and building frequencies. As a first step, 887 realistic soil profiles having a linear behavior are associated with a set of elastoplastic oscillators of 1 degree of freedom. The results obtained to date are used to quantify the damage increment related to the coincidence of frequencies depending on other parameters such as the peak ground acceleration (PGA), the ground (impedance contrast) and the structure (ductility) based on neural network approach that does not require any a priori knowledge.

MOTS-CLÉS : coïncidence spectrale, fréquence, dommages, vulnérabilité, risque sismique.

KEYWORDS: spectral coincidence, frequency, damage, vulnerability, seismic risk.

1. Introduction

La plupart des effets destructeurs d'un séisme proviennent de vibrations couplées à des ondes générées par un glissement soudain le long d'une faille. Ces vibrations sont caractérisées par leurs fréquences et amplitudes associées. Les ondes issues de ce glissement sont caractérisées par leur type (ondes volumiques - compression ou cisaillement - et ondes de surface), ainsi que leur vitesse de propagation. Celle-ci, relativement stable en profondeur est toutefois fortement variable près de la surface, car elle est directement liée à la structure du sol et du substratum rocheux. Par conséquent, la propagation de ces ondes est fortement affectée par les hétérogénéités de surface, et par la répartition spatiale de l'amplitude des vibrations sismiques. Cette variabilité spatiale liée à la géologie est généralement appelée «effets de site». Les caractéristiques d'amplitude et de fréquence des secousses ont évidemment un impact sur le comportement des structures. Comme première approximation, un bâtiment peut être considéré comme un "pendule inversé", ou comme une colonne noyée dans le sol: son comportement vibratoire est très similaire à celle d'un oscillateur ayant un ou plusieurs degrés de liberté, et un ou plusieurs modes de vibration, caractérisé par leurs fréquences, leurs déformées modales et amortissement: ainsi les dégâts dans un bâtiment sont principalement liés à des déformations internes qu'il subit, qui à leur tour sont liés au déplacement total imposé par le séisme et les fréquences fondamentales de la structure.

Si l'une des fréquences du sol coïncide avec la fréquence du bâtiment, et que l'énergie incidente est suffisante, le mode correspondant sera particulièrement excité, et la déformation résultante sera plus importante. Ainsi le couplage entre résonateurs est un élément clé dans la distribution spatiale des dommages lors d'un tremblement de terre, liée à la distribution des fréquences des sols et des bâtiments, et le niveau de résonances associées (en fonction principalement du contraste de rigidité - en profondeur pour le sol, et entre le sol et la structure pour le bâtiment - et l'amortissement dans les sols et les structures). Ce concept théorique d'un double résonateur est observé à plusieurs reprises dans les investigations post-sismiques (Castillon 1887; Caracas 1967, Mexique 1985, Pujili 1996): les bâtiments ayant des fréquences fondamentales coïncidant avec les fréquences de résonance du sol subissent des dommages plus importants.

Toutefois, cette observation n'est généralement prise en compte ni dans les règlements parasismiques actuels (à petite échelle), ni dans l'analyse de risque sismique à l'échelle urbaine. Il existe souvent un manque de cohérence entre les études de risque sismique qui considèrent les fréquences réelles du sol, et les cartes de risque sismique à grande échelle, qui introduisent de façon indirecte la fréquence du bâtiment. Le plus souvent, l'estimation de l'aléa sismique comprend une modélisation des actions sismiques en fonction des conditions géologiques locales, par le biais de «proxies de site»: la vitesse moyenne des ondes S à une profondeur de 30 m, V_{s30} , est la plus utilisée actuellement. De nombreux travaux récents soulignent la pertinence de la fréquence fondamentale du sol comme un autre "proxy" éventuel, d'autant plus que sa mesure est facilement obtenue par les vibrations ambiantes (méthode H/V qui se répand dans le monde entier (Nakamura 1989)). Cependant, la plupart des études de risque et vulnérabilité sismiques n'introduisent pas les paramètres dynamiques qui sont faciles à extraire (Dunand 2005); au contraire ils utilisent des informations traditionnelles comme la typologie et l'âge de construction afin d'établir des formules empiriques corrélant les dommages à l'intensité macrosismique à grande échelle.

L'objectif de ce travail est de se concentrer sur les effets de coïncidence entre fréquences fondamentales des sols et des bâtiments, afin d'en tirer une estimation de l'accroissement des dommages, qui pourrait être appliquée sur de vrais sites où un manque d'information sur le sol ou la structure ne permet pas une modélisation appropriée de leur réponse. Dans cette perspective, une approche théorique est entamée pour établir une compréhension physique et une relation quantitative entre le dommage attendu et les différents paramètres physiques liés au signal sismique d'entrée, et à la réponse du sol de fondation et de la structure, en considérant la coïncidence de fréquences. Pour cela, l'approche du réseau de neurones artificiels est utilisée pour analyser un large nombre de modèles constitués par un signal incident, un profil réel de sol et un bâtiment à un degré de liberté; cette approche ne nécessite aucune

connaissance a priori du jeu de données et permet de relier le paramètre de sortie (incrément de dommages) aux différents paramètres d'entrée (PGA, ductilité, contraste d'impédance, et rapport de fréquences structure/sol).

2. Matériels et Méthodes: Cas d'un oscillateur sur un profil réel de sol à plusieurs couches

L'étude de la coïncidence de fréquences comporte une combinaison d'une structure associée à un sol de fondation et un signal sismique injecté à sa base: l'excitation sismique consiste en une série de 60 accélérogrammes synthétiques réalistes correspondant à différents scénarios (magnitude 3 à 7, distance 10 km-100 km, PGA 0,02 m/s²- 10 m/s²). 887 profils réels multicouches compilés de KIKNET (sites japonais), Boore (sites californiens), NERIES (sites européens), sont combinés à 141 oscillateurs à un degré de liberté avec un comportement élasto-plastique et des propriétés réalistes issues du projet européen Risk-UE (Lagomarsino et Giovinazzi 2006): ce dernier couvre une large gamme de périodes fondamentales, limites élastiques, coefficients de ductilité, classant les structures en 5 catégories principales: maçonnerie, béton armé, béton armé avec basse, moyenne, et haute classe de ductilité. Un signal sismique est introduit et modifié en se propageant à travers les différentes couches du sol en raison du mécanisme de réflexion et transmission au niveau des interfaces (Kennet, 1983). Le signal amplifié arrivant en surface du sol est ensuite injecté à la base de la structure. L'équation du mouvement d'un oscillateur amorti ayant un amortissement de 5% sous une excitation sismique est résolu par la méthode pas à pas de Newmark (Eq. [1]):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad [1]$$

Le déplacement maximal au sommet de l'oscillateur est ainsi obtenu: s'il est inférieur à la limite élastique alors la structure n'est pas endommagée et le mouvement est dans ce cas élastique; au contraire si le déplacement maximal dépasse la limite élastique, il entre dans le domaine plastique avec des dommages irréversibles. Un total de 7504020 combinaisons (887 profils de sol x 60 signaux sismiques x 141 types de structure) est donc pris en considération. Pour chaque modèle, les calculs de déplacements maximaux sont effectués pour 2 configurations: l'une considérant la structure sur le sol de fondation, et l'autre prenant en compte la même structure sur le substratum rocheux correspondant. Un nouvel indice est conçu pour quantifier l'incrément de dommages en se basant sur le projet européen Risk-UE (Lagomarsino et Giovinazzi 2006). Cet indice est un nombre réel de 0 à 4 décrivant l'état d'endommagement en comparant le déplacement maximal de la structure avec différents seuils de déplacement selon les équations suivantes (Eq. [2]):

$$\begin{aligned} D0 : dmax < 0.7dy, DI = dmax/(0.7dy); \text{ aucun dégât} \\ D1 : 0.7dy < dmax < 1.5dy, DI = 1 + (dmax - 0.7dy)/(1.5dy - 0.7dy); \text{ léger} \\ D2 : 1.5dy < dmax < 0.5(dy + du), DI = 2 + (dmax - 1.5dy)/[0.5(dy + du) - 1.5dy]; \text{ modéré} \\ D3 : 0.5(dy + du) < dmax < du, DI = 3 + [dmax - 0.5(dy + du)] [du - 0.5(du - dy)]; \text{ important} \\ D4 : dmax > du, DI = 4; \text{ ruine} \end{aligned} \quad [2]$$

L'étape suivante consiste à relier statistiquement l'incrément de dommage aux paramètres d'entrée principaux: le rapport de fréquences structure/sol, le contraste d'impédance, l'accélération maximale du sol (PGA), la limite élastique dy. Compte tenu de l'énorme nombre de résultats, l'approche du réseau neuronal artificiel est considérée comme la technique la plus appropriée pour obtenir des corrélations entre tous les paramètres sans aucune connaissance a priori de la base de données ni des formes fonctionnelles qui décrivent une certaine dépendance entre les paramètres (Derras 2012).

3. L'approche du Réseau Neuronal Artificiel

3.1. Construction du réseau

Le réseau de neurones optimal choisi pour cette base de données est un réseau composé de 4 paramètres d'entrées: $\log(f_{struct} / f_{sol})$, $\log(PGA)$, $\log(\text{contraste d'impédance})$, et la ductilité (rapport de la limite ultime du sur la limite élastique δy); 1 sortie: l'incrément des indices de déplacements sur sol et rocher d'une part et un autre réseau avec le déplacement maximal sur sol uniquement; et 1 couche intermédiaire de 8 neurones «cachés» (Fig. 1). La fonction d'activation est tanh sigmoïde pour la couche intermédiaire et celle de sortie. L'algorithme utilisé est BFGS (méthode de quasi-Newton). Le jeu de données est divisé aléatoirement en: 70% pour l'apprentissage, 15% pour la validation et 15% pour le test.

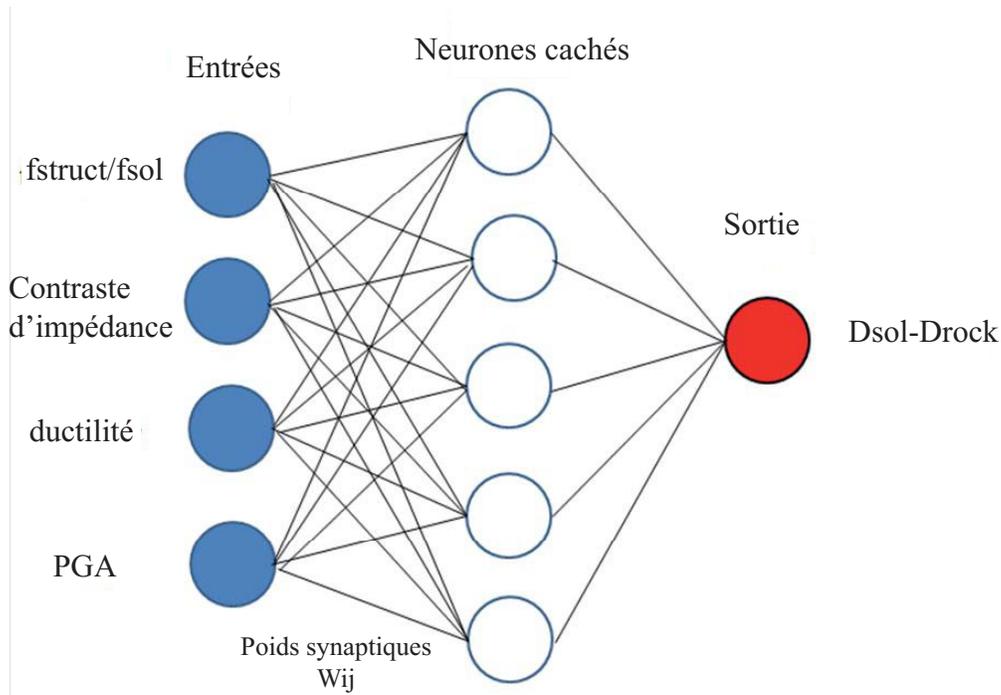


Figure 1: Architecture du réseau neuronal montrant la couche d'entrée, la couche intermédiaire de neurones cachés et la couche de sortie.

Le nombre optimal de neurones cachés est déterminé à partir du critère d'information d' Akaike (AIC) proposé par Akaike (1974) et de l'erreur quadratique moyenne RMSE (Eq. [3] et [4]). Plus les paramètres AIC et RMSE sont faibles, mieux est le modèle neuronal (Fogel 1990; Murata *et al.* 1994)

$$AIC = N \times \log MSE + 2 \times K, \text{ si } N/K < 40 \quad [3]$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad [4]$$

avec N: nombre d'échantillons utilisés pour l'apprentissage; K : nombre de poids synaptiques dans le réseau. La figure 2 montre que le nombre optimal de neurones cachés est égal à 15.

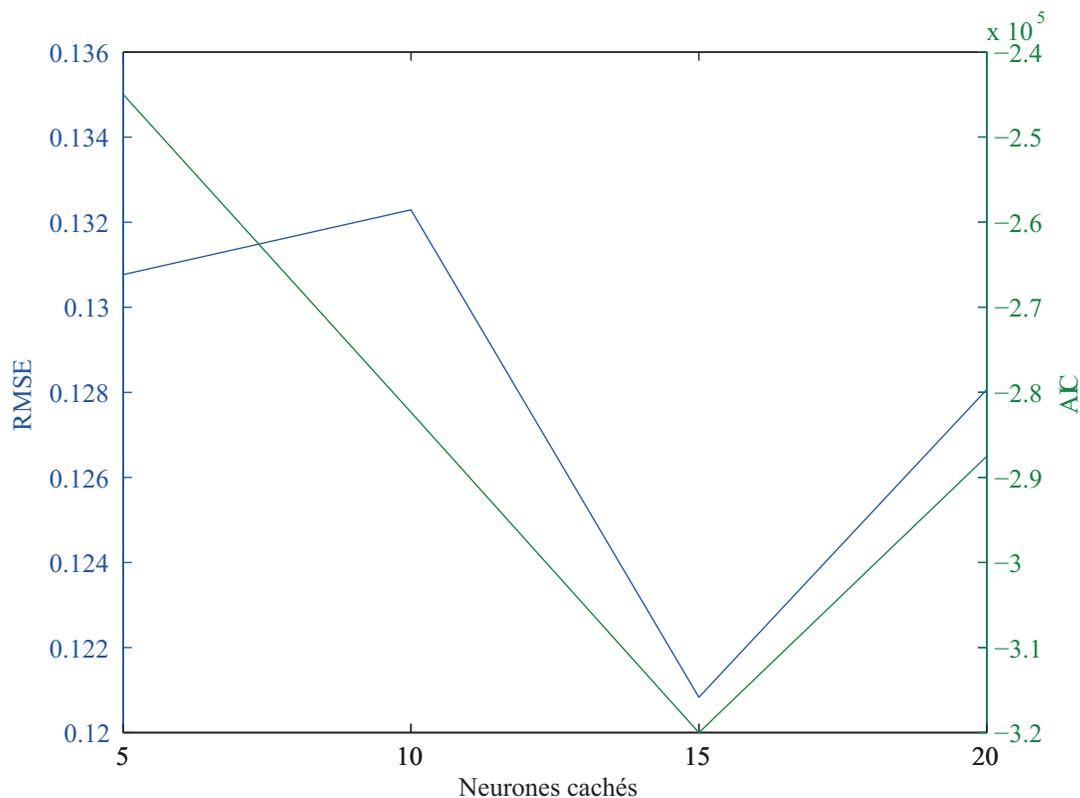


Figure 2: Choix du nombre de neurones cachés en fonction de l'AIC et RMSE.

Les paramètres d'entrée (I_n) et sortie (T_n) sont ensuite normalisés (Eq. [5]): cette étape est importante pour améliorer l'efficacité de l'apprentissage du réseau de neurones et accélérer le processus de calcul. Le but est d'assurer que la distribution statistique des valeurs pour chaque entrée et sortie est presque uniforme (Meenakshi and Mohan 2012).

$$I_n = 2 \times \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} - 1$$

$$T_n = 2 \times \frac{T - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} - 1 \quad [5]$$

La performance du réseau neuronal est évaluée en se basant sur des indicateurs statistiques (Longhi *et al.* 2005): le coefficient de corrélation (R2) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Le réseau ainsi construit, des

corrélations sont déterminées entre l'entrée et sortie à travers les matrices de poids et de biais et se basant sur les fonctions d'activation (tanh - sigmoïde) selon l'équation (Eq. [6]):

$$T_n = \tanh(b2 + [w2] \times \tanh(b1 + [w1] \times I_n)) \pm \sigma \quad [6]$$

Dans l'étape de post-traitement, les entrées I et sorties O sont dénormalisées en utilisant les mêmes paramètres initiaux selon: (Eq. [7])

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} \times (I_n + 1) \times (I_{max} - I_{min}) + I_{min} \\ O &= \frac{1}{2} \times (O_n + 1) \times (T_{max} - T_{min}) + T_{min} \end{aligned} \quad [7]$$

L'apprentissage est exécuté plusieurs fois pour assurer une bonne convergence du réseau neuronal en raison du changement dans les conditions initiales (poids et biais).

3.2. Utilisation du réseau

Chaque paramètre d'entrée introduit est initialisé par un poids arbitraire, et le processus d'apprentissage consiste à modifier ces poids de façon à optimiser l'erreur entre les sorties calculées et celles observées. Une fois la convergence a lieu, le pourcentage du poids synaptique de chaque paramètre d'entrée introduit est calculé: (Eq. [8])

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_h} |W_{ij}^h|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_h} |W_{ij}^h|} (\%) \quad [8]$$

avec N : nombre d'entrées, H : nombre de neurones cachés et Wij poids synaptique entre le noeud i de la couche d'entrée et le noeud j de la couche cachée.

La figure [3] met en relief les pourcentages des poids synaptiques pour chacun des 4 paramètres d'entrée: le plus important est le rapport de fréquences entre sol et structure (58,28 %) qui confirme la pertinence de ce paramètre dans la prediction de l'augmentation des dégâts. Toutefois on peut remarquer que le second paramètre significatif est le PGA, à savoir, le niveau d'excitation. En utilisant les matrices des poids et biais finaux et les remplaçant dans les fonctions d'activation (Eq. [6]), nous pouvons calculer la sortie (rapport de dommages du sol par rapport au rocher) en fonction de chacune des variables d'entrée considérées. La ductilité est négligé en raison de son faible poids synaptique (4,24 %). Les graphiques résultants présentent l'influence du rapport de fréquences structure/sol, contraste maximal de vitesse (C) (Fig. [4]) et le signal incident (PGA) (Fig. [5]) sur l'incrément de dommages Dsol-Drocher. L'effet de la coïncidence de fréquence est évident avec un pic de dommages prononcé pour fstruct / fsol = 1. Comme on s'y attendait, les dommages augmentent avec le contraste de vitesse d'une part, et avec le PGA d'autre part. Ainsi, le réseau de neurones permet d'estimer l'incrément de dégâts en connaissant 4 paramètres: PGA sur le rocher (un proxy pour un scénario de tremblement de terre), la ductilité (la typologie du bâtiment), le contraste de vitesse (un proxy pour l'amplification du sol) et le rapport de fréquences. Ce dernier est relativement facile à mesurer ou prévoir à partir de la méthode des vibrations ambiantes.

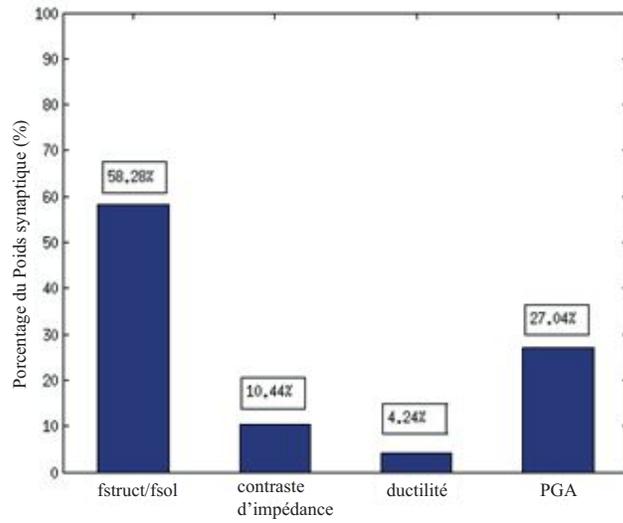


Figure 3: Pourcentage du poids synaptique des 4 paramètres d'entrée: f_{bat}/f_{sol} , contraste d'impédance, ductilité et PGA.

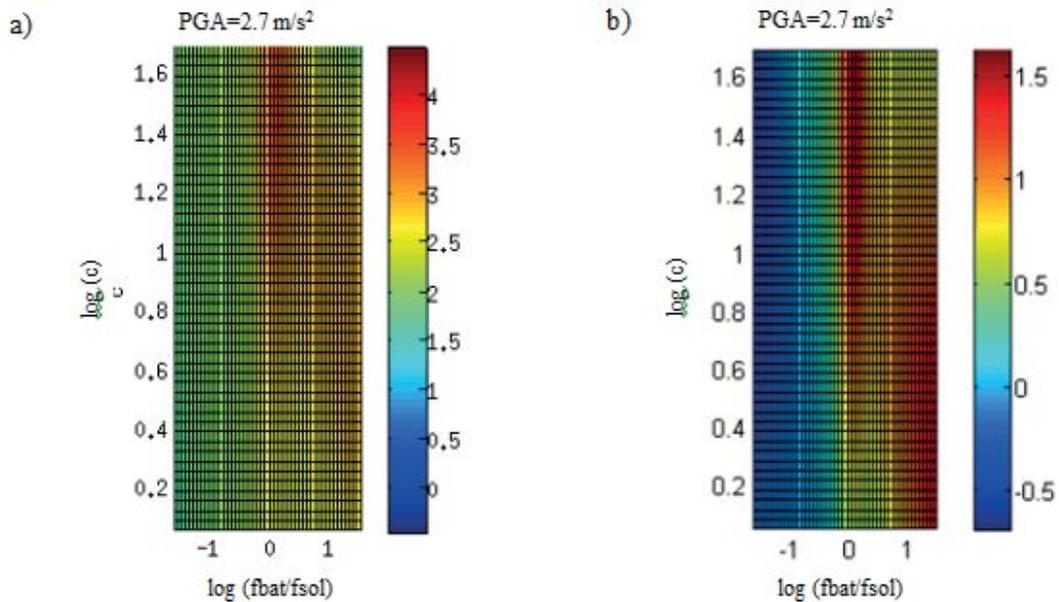


Figure 4: a) Déplacement absolu sur sol, b) Incrément de dommages entre sol et rocher en fonction du contraste d'impédance et f_{struct}/f_{sol} pour un $PGA= 2.7 \text{ m/s}^2$.

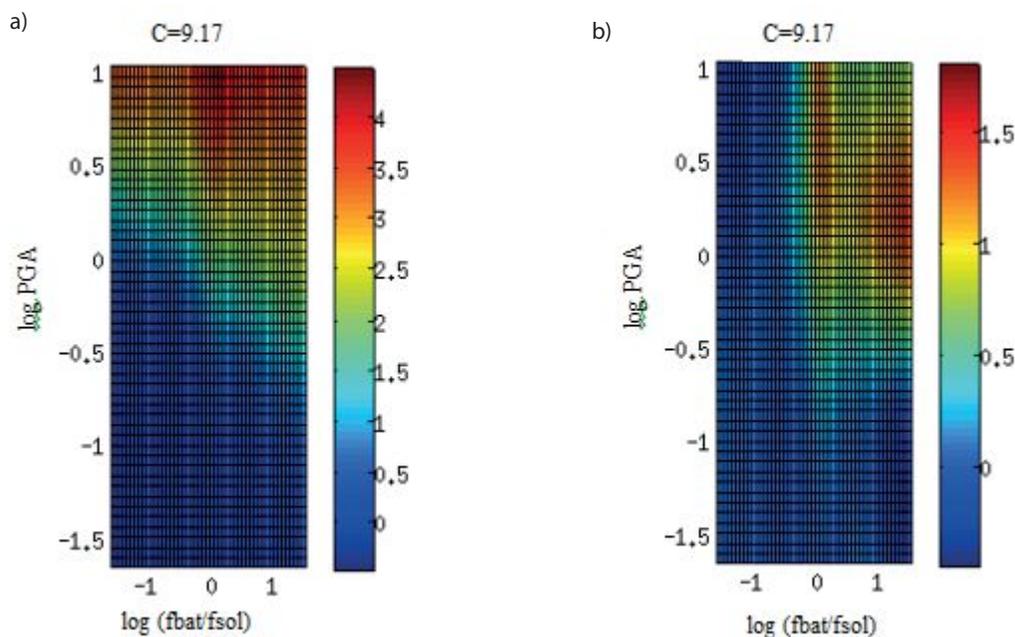


Figure 5: a) Déplacement absolu sur sol, b) Incrément de dommages entre sol et rocher en fonction du PGA et f_{struct}/f_{sol} pour un contraste d'impédance $c=9.17$.

4. Conclusions

L'effet de la coïncidence de fréquences du sol et de la structure est étudié en utilisant la réponse d'un oscillateur simple parfaitement élasto-plastique (défini par deux paramètres: la limite élastique et la fréquence fondamentale) à la surface d'un site multicouche (caractérisé par deux paramètres clés: le contraste d'impédance et la fréquence fondamentale) et une série d'accélérographes imitant un séisme avec une gamme variable de distance et de magnitude (liée à l'accélération maximale au sol PGA et au contenu spectral). Les dommages structuraux sont caractérisés par la demande en ductilité (rapport du déplacement maximal par rapport à la limite élastique), et par l'incrément de dommages en raison de l'amplification du sol en comparant la réponse de l'oscillateur élasto-plastique sur le sol et sur le substratum rocheux affleurant. Plusieurs centaines de profils de sols réalistes sont considérées pour explorer les effets de la coïncidence spectrale sur les dommages pour une large gamme de typologies de construction classiques. Un indice d'augmentation de dégâts a été introduit pour quantifier l'incrément de dommages dû à l'amplification du sol. Le grand nombre de résultats (plus de 7,5 millions) nous a conduit à utiliser une approche de réseau neuronal pour explorer la dépendance entre les dommages et les paramètres du sol et du bâtiment. Malgré l'absence de toute forme fonctionnelle a priori, il a été confirmé que le paramètre clé qui contrôle l'augmentation des dégâts est le rapport f_{struct}/f_{soil} , avec un poids synaptique dépassant 58 %. L'effet de cette coïncidence spectrale entre le sol et la structure apparaît très clairement à PGA modéré, avec un pic de dommages prononcé pour $f_{struct} / f_{soil} = 1$. Une prochaine étape importante serait de trouver un proxy pour l'amplification du sol qui serait mesurable plus facilement, à savoir l'amplitude H/V obtenue des mesures de bruit ambiant à la place du contraste d'impédance qui demande des essais géotechniques plus coûteux et difficiles à acquérir.

5. Remerciements

Ce travail a été soutenu par le programme de recherche (ANR Libris 2010-2014) en collaboration entre les laboratoires ISTerre (Grenoble, France), le Centre Libanais Geophysical Research (CRG) , l'Université Saint - Joseph de Beyrouth, Notre Dame University- Louaizé NDU, IPGP, EDYTEM CETE et est partiellement financé par l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement). Les auteurs remercient également Boumediène Derras pour son aide et conseils dans l'approche du Réseau Neural Artificiel.

References

- [Akaike(1974)] Akaike, H., 1974. A new look at the statistical model identification. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 19, 716–723.
- [Chatelain et al.(2000)] Chatelain, Gueguen, Guillier, Frechet, Bondoux, Sarrault, Sulpice and Neuville] Chatelain, J.L., Gueguen, P., Guillier, B., Frechet, J., Bondoux, F., Sarrault, J., Sulpice, P., Neuville, J.M., 2000. Cityshark: A user-friendly instrument dedicated to ambient noise (microtremor) recording for site and building response studies. *Seismological Research Letters* 71, 698–703.
- [Derras et al.(2012)] Derras, Bard, Cotton and Bekkouche] Derras, B., Bard, P.Y., Cotton, F., Bekkouche, A., 2012. Adapting the neural network approach to pga prediction: An example based on the kik-net data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 102, 1446–1461.
- [Dunand(2005)] Dunand, F., 2005. Pertinence du bruit de fond sismique pour la caractérisation dynamique et l'aide au diagnostic sismique des structures de génie civil. Ph.D. thesis. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [Fardis et al.(2009)] Fardis, Carvalho, Alnashai, Faccioli, Pinto and Plumier] Fardis, M.N., Carvalho, E., Alnashai, A., Faccioli, E., Pinto, P., Plumier, A., 2009. *Designers' Guide to EN 1998-1 and 1998-5. Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistant Structures*. Thomas Telford Limited.
- [Fogel(1990)] Fogel, D.B., 1990. An information criterion for optimal neural network selection. *IEEE transactions on neural networks/a publication of the IEEE Neural Networks Council* 2, 490–497.
- [Harb(2003)] Harb, J., 2003. Risks of liquefaction in the greater beirut area, in: *Soil Rock America 2003, 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering and 39th U.S. Rock Mechanics Symposium*, P.J. Culligan, H.H. Einstein and A.J. Whittle Editors, VGE.
- [Housner and Brady(1963)] Housner, G., Brady, A., 1963. Natural periods of buildings, in: *Selected Earthquake Engineering Papers of George W. Housner*, ASCE. pp. 403–437.
- [Kennett(1983)] Kennett, B., 1983. *Seismic wave propagation in stratified media*. Cambridge University Press.
- [Lagomarsino and Giovinazzi(2006)] Lagomarsino, S., Giovinazzi, S., 2006. Macro seismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering* 4, 415–443.
- [Longhi et al.(2005)] Longhi, Nijkamp, Reggianni and Maierhofer] Longhi, S., Nijkamp, P., Reggianni, A., Maierhofer, E., 2005. Neural network modeling as a tool for forecasting regional employment patterns. *International Regional Science Review* 28, 330–346.

- [Meenakshi and Mohan(2012)] Meenakshi, A., Mohan, V., 2012. Knowledge management in edaphology using self organizing map (som). International Journal of Database Management Systems 4.
- [Michel(2007)] Michel, C., 2007. Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville-Apport des techniques expérimentales in situ-Application à Grenoble. Ph.D. thesis. Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- [Murata et al.(1994)Murata, Yoshizawa and Amari] Murata, N., Yoshizawa, S., Amari, S.I., 1994. Network information criterion-determining the number of hidden units for an artificial neural network model. Neural Networks, IEEE Transactions on 5, 865-872.
- [Nakamura(1989)] Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports 30.
- [PS92(1995)] PS92, 1995. Règles de construction parasismique, DTU règles.
- [UBC97(1997)] UBC97, 1997. Uniform building code, earthquake regulations for seismic isolated structures. Whitter (CA, USA) .