



**HAL**  
open science

## 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 Salameh, Michelle Almakari, Pierre-Yves Bard, Bertrand Guillier,  
Cécile Cornou

### ► To cite this version:

Christelle Salameh, Michelle Almakari, Pierre-Yves Bard, Bertrand Guillier, Cécile Cornou. 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.. 9ème Colloque National AFPS2015, Nov 2015, Marne-la-Vallée, France. insu-01742606

**HAL Id: insu-01742606**

**<https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01742606>**

Submitted on 25 Mar 2018

**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.

---

# 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 Salameh<sup>1</sup>, Michelle Almakari<sup>2</sup>, Pierre-Yves Bard<sup>1</sup>, Bertrand Guillier<sup>1</sup>,  
Cécile Cornou<sup>1</sup>

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/s<sup>2</sup>- 10 m/s<sup>2</sup>). 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]):

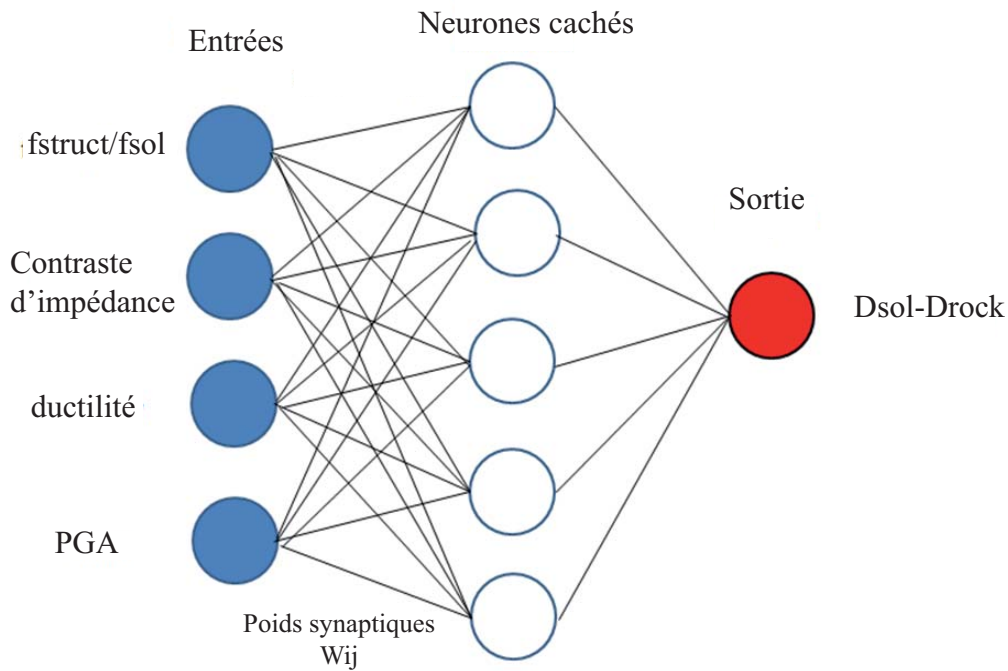
$$\begin{aligned} D0 : dmax < 0.7dy, DI = dmax/(0.7dy); \text{ aucun dégât} \\ D1 : 0.7dy < dmax < 1.5dy, DI = 1 + (dmax - 0.7dy)/(1.5dy - 0.7dy); \text{ léger} \\ D2 : 1.5dy < dmax < 0.5(dy + du), DI = 2 + (dmax - 1.5dy)/[0.5(dy + du) - 1.5dy]; \text{ modéré} \\ D3 : 0.5(dy + du) < dmax < du, DI = 3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

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  $d_y$ ); 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.



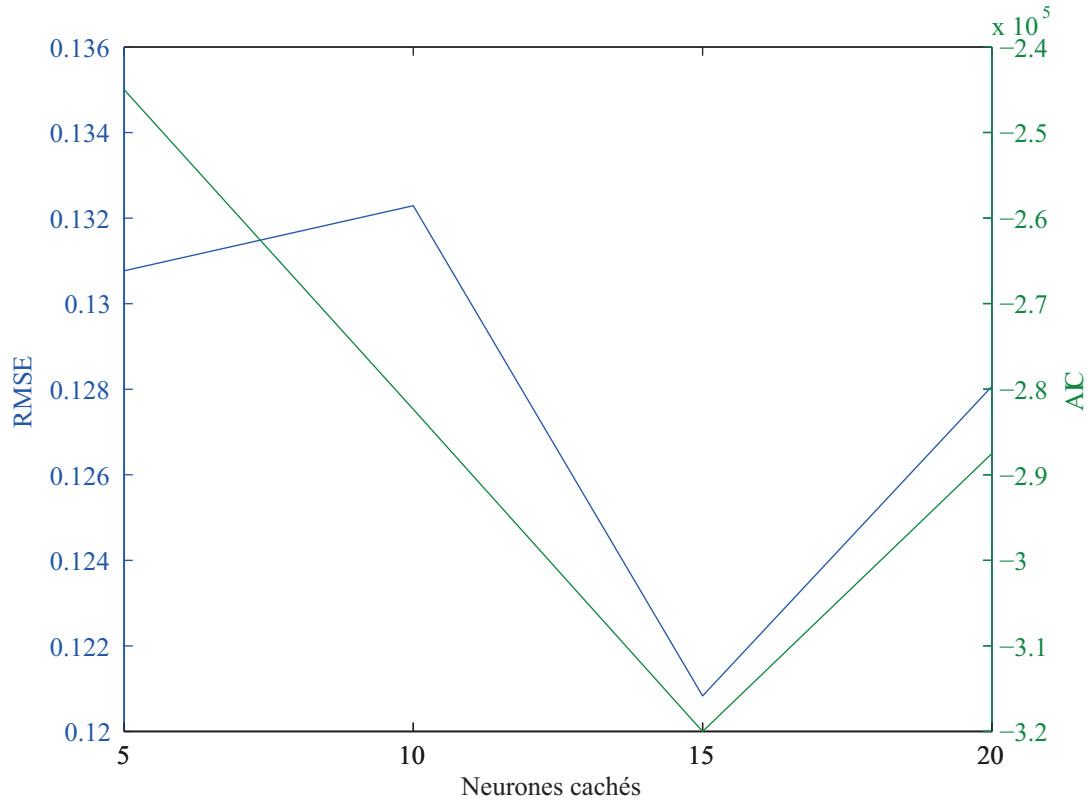
**Figure 1:** Architecture du réseau neuronal montrant la couche d'entrée, la couche intermédiaire de neurones cachés et la couche de sortie.

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).

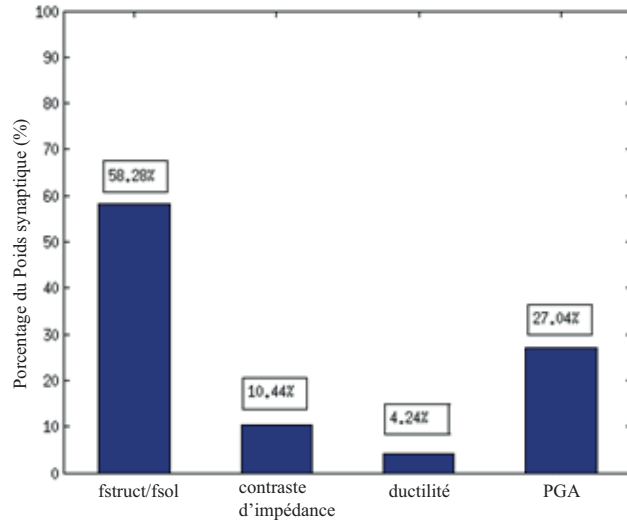
### 3.2. Utilisation du réseau

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])

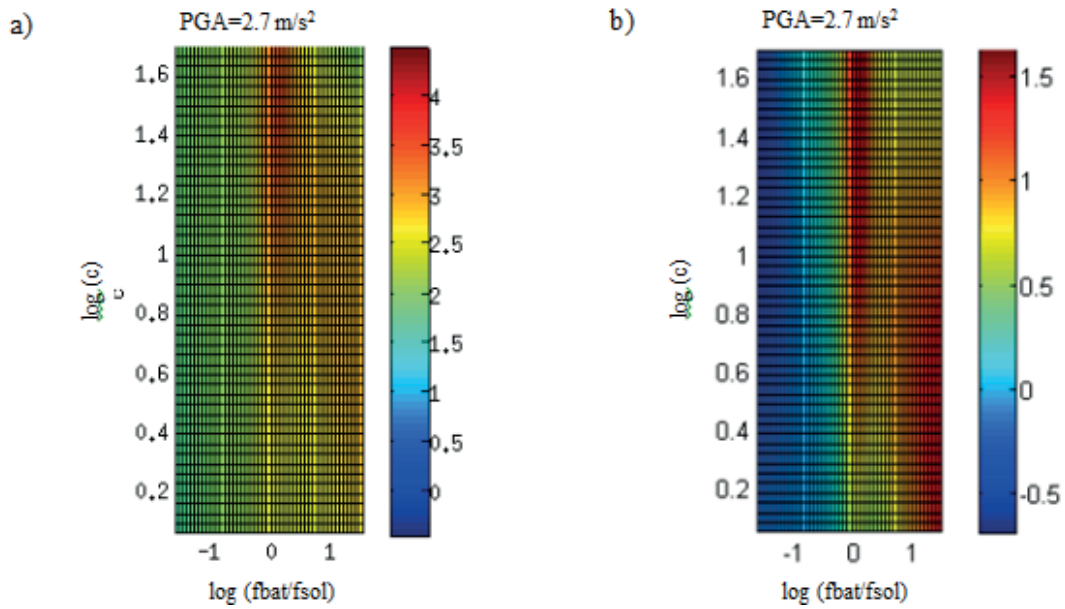
$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_h} |W_{ij}^h|}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_h} |W_{ij}^h|} (\%) \quad [8]$$

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.

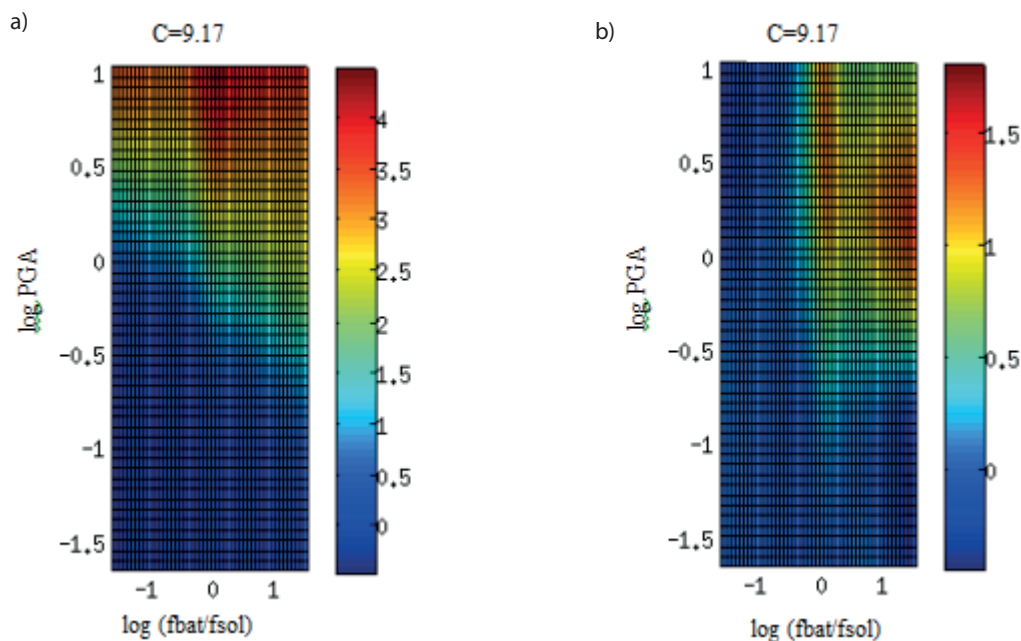


**Figure 3:** Pourcentage du poids synaptique des 4 paramètres d'entrée:  $f_{bat}/f_{sol}$ , contraste d'impédance, ductilité et PGA.



**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'accélérogrammes 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. Macroseismic 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) .