ESTIMATION DES PERIODES FONDAMENTALES DE VIBRATION DES STRUCTURES DECROCHEES

Par
B. TILIOUINE
Professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique (Alger)
T. BRANCI
Maître assistant à l'INES de Chlef
D. BENOUAR
Maître assistant à l'USTHB (Alger)

Résumé

Une procédure numérique est proposée en vue de la description, pour deux signaux nonstationnaires considérés simultanément, des variations temporelles en amplitudes et en contenu fréquentiel. L'applicabilité et la performance de l'algorithme sont illustrées sur la base des analyses spectrale et inter-spectrale de deux composantes accélérométriques du séisme de Constantine du 27 Octobre 1985. Les résultats numériques montrent que l'algorithme présenté fournit une technique très efficace pour le développement de signaux synthétiques nonstationnaires propres aux sites.

1 INTRODUCTION

La représentation conventionnelle de Fourier ainsi que l'analyse spectrale nonstationnaire des enregistrements de tremblements de terre de longue durée requièrent des temps d'exécution très importants même si l'algorithme de le Transformée Rapide de Fourier (FFT) est utilisé [1]. Dans le but de réduire de manière significative le temps d'exécution, une procédure numérique fondée sur le concept de signal analytique est proposée dans cet article. Couplée avec les notions de spectre et d'inter-spectre physique [2] et [3], cette technique numérique permet de dresser un cadre d'analyse nettement plus performant pour l'étude des contenus spectraux des signaux nonstationnaires.

Les résultats obtenus montrent que l'algorithme proposé fournit une technique très efficace pour l'établissement de modèles de régression de paramètres spectraux capables de reproduire des accélérogrammes synthétiques nonstationnaires, en intensité et en contenu fréquentiel, compatibles avec des variables descriptives et physiques telles que la distance hypocentrale, la magnitude et les conditions locales de sites.

2 ALGORITHME NUMERIQUE

Considérons les spectres physiques $P_{xx}(f,t)$ et $P_{yy}(f,t)$ caractérisant respectivement les contenus spectraux des composantes orthogonales x(t) et y(t) de l'accélération dans le plan horizontal. L'inter-spectre physique est défini comme suit :

$$P_{xy}(f,t) = w(t-s)\, x(s)\; w(t-u)\, y(u)\; \exp[-2j\pi f(u-s)]\,du\,ds \quad (1)$$

où f et t représentent les variables fréquence et temps respectivement. Le choix de la fenêtre temporelle, les valeurs de ses paramètres, sa dualité avec la fonction de réponse impulsionnelle et l'effet de troncature de sa longueur sont discutés en détail dans la référence [3].

Dans le but de diminuer sensiblement le temps de calcul, une procédure numérique basée sur le concept de signal analytique est présentée. Autrement dit, cette procédure permet de déterminer simultanément les caractéristiques spectrales des deux accélérogrammes x(t) et y(t) à chaque instant $t = m\,\Delta t$ ($m = 1, 2, \ldots, M$) échantillonné sur la durée $T = M\,\Delta t$ à des intervalles de temps Δt réguliers. Aux fins de mieux clarifier cette idée, considérons les valeurs $h_x(m)$ et $g_x(m)$ des signaux sismiques x(t) et y(t), fenêtrés aux temps $s = t$, et dont les expressions sont données par :

$$h_x(m) = x(s)\, w(m\,\Delta t - s) \quad (2)$$

$$g_y(m) = y(s)\, w(m\,\Delta t - s) \quad (3)$$

Formons alors le signal complexe :

$$s(m) = h_x(m) + j\, g_y(m) \quad (4)$$

En utilisant l'algorithme de FFT, on peut aisément calculer la partie réelle R(k,m) et la partie imaginaire I(k,m) de la transformée S(k,m) de s(m) (k = 1, 2, ..., N), où l'indice m est maintenu pour rappeler que le calcul est effectué au voisinage du temps t = m Δt. Les indices k et N sont associés aux fréquences f = k Δf et f_{max} = N Δf, la plus haute fréquence sélectionnée, compatible avec le théorème de Nyquist ; Δf étant le pas d'échantillonnage en fréquence de S(f,t). On a alors :

$$S(k,m) = R(K,m) + j\, I(k,m) \quad (5)$$

En utilisant les propriétés de la transformée de Fourier, on peut montrer que les transformées $H_x(k,m)$ de $h_x(m)$ et $G_y(k,m)$ de $g_y(m)$ sont données par :

$$2\,H_x(k,m) = R(k,m) + R[(N+1-k),m] + j\{I(k,m) - I[(N+1-k),m]\} \quad (6)$$

$$2\,G_y(k,m) = I(k,m) + I[(N+1-k),m] + j\{R(k,m) - R[(N+1-k),m]\} \quad (7)$$

Les valeurs des spectres physiques de x(t) et y(t), ainsi que celles de leur inter-spectre au voisinage du temps t = m Δt sont simultanément obtenues à partir des relations suivantes :

$$P_{xx}(f,t) = H_x^*(f,t)\; H_x(f,t) \quad (8)$$

$$P_{yy}(f,t) = G_y^*(f,t)\; G_y(f,t) \quad (9)$$

$$P_{xy}(f,t) = H_x^*(f,t)\; G_y(f,t) \quad (10)$$

De même, les valeurs de l'énergie instantanée des composantes x(t) et y(t) ainsi que celles de leur inter-énergie, peuvent être calculées à chaque instant t, par intégration des équations (8 à 10) :

$$U_{xx}(t) = P_{xx}(f,t)\; df \quad (11)$$

$$U_{yy}(t) = P_{yy}(f,t)\; df \quad (12)$$

$$U_{xy}(t) = P_{xy}(f,t)\; df \quad (13)$$

Il convient de noter, que le présent algorithme diffère dans son approche de celui décrit dans la référence [4] en ce qu'il permet le traitement simultané de deux accélérogrammes à chaque incrément de temps. Toutefois, une performance similaire peut être atteinte en traitant successivement les deux signaux analytiques suivants :

$$s_x(m) = h_x(m) + j\, g_x(m) \quad (14)$$

$$s_y(m) = h_y(m) + j\, g_y(m) \quad (15)$$

Le présent schéma de calcul numérique conduit à une économie de l'ordre de 60% de temps C.P.U., lors de son application pratique sur des échantillons d'accélérogrammes de différentes durées.

3 ILLUSTRATIONS NUMERIQUES ET DISCUSSIONS

Aux fins d'examiner l'applicabilité et la performance des développements numériques obtenus dans le paragraphe précédent pour la caractérisation nonstationnaire des signaux sismiques, plusieurs accélérogrammes ont été analysés. Cependant pour des raisons de clarté et de limitation d'espace, seuls les résultats obtenus pour les deux composantes horizontales enregistrées en champ proche lors du séisme de Constantine du 27 Octobre 1985 (Figure 1a et Figure 1b) seront présentés.

Le choc majeur de taille modérée M_s = 6 (intensité VIII) s'est produit aux environs de 19h35' (heure locale). L'épicentre du séisme a pour coordonnées 36.46 N et 6.76° E et correspond à une profondeur au foyer de 10 km. Il s'agit du plus fort événement enregistré depuis 1947 dans la région Est de l'Atlas Tellien. Les séismes les plus récents d'intensités comparables ressentis dans la région de Constantine remontent au début et à la fin de la première moitié du siècle (20 Août 1908 et 6 août 1947). L'accélération maximale était de l'ordre de 0.2 g et a eu pour effet de provoquer un sentiment de panique générale notamment dans le voisinage immédiat de la ville.

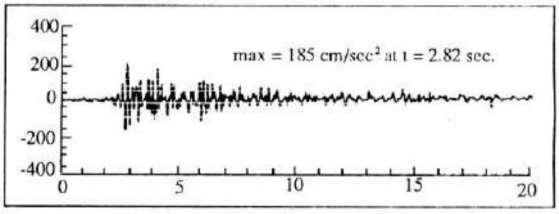


Figure 1a : Composante d'accélération S00W.

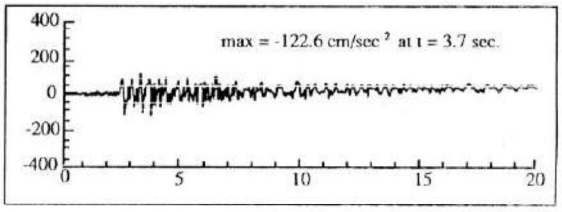


Figure 1b : Composante d'accélération S90W.

Les spectres physiques associés aux deux composantes horizontales S00W et S90W enregistrées à Constantine sont représentées respectivement sur les figures (2a) et (2b). Ces spectres ont été déterminés en appliquant l'algorithme numérique décrit ci-dessus, aux enregistrements de durée commune 20 sec., échantillonnés avec un pas en temps de 0.02 sec. et en utilisant une longueur de fenêtre égale à 5.12 sec. (soit pour chaque instant, 128 points en fréquence couvrant ainsi la largeur de bande 0.07-25 Hz).

On constate pour chacun des deux spectres, que les temps d'occurrence des pics des principales ondes constitutives sont approximativement du même ordre de grandeur. Cette observation est typique pour les mouvements impulsifs enregistrés en champ proche. On peut noter

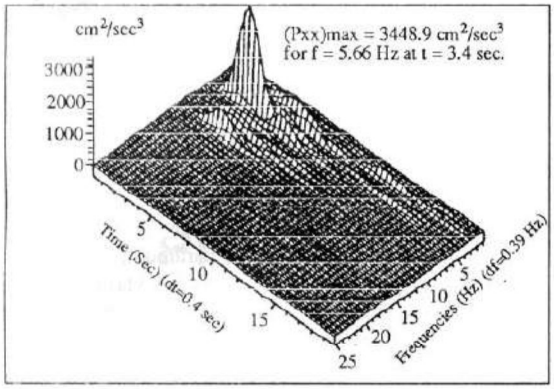


Figure 2a : Spectre physique de la composante S00W.

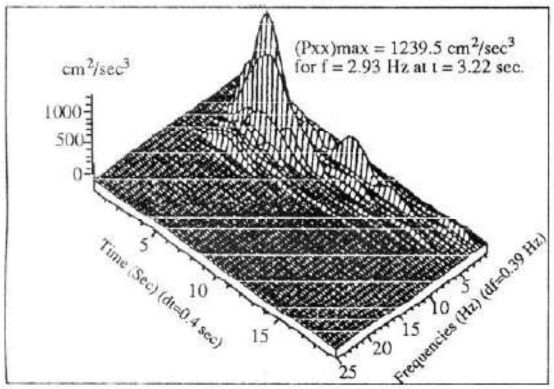


Figure 2b : Spectre physique de la composante S90W.

aussi, que les valeurs des pics des spectres physiques et les fréquences correspondantes varient considérablement d'une composante à l'autre, bien que leurs temps d'occurrence soient très voisins : $(P_{xx}(f,t))_{max}$ = 3448.9 cm²/sec³ pour f = 5.66 Hz à t = 3.4 sec. pour la composante S00W et $(P_{yy}(f,t))_{max}$ = 1239.5 cm²/sec³ pour f = 2.93 Hz à t = 3.22 sec. pour la composante S90W. On observe clairement que le contenu spectral et la distribution d'énergie changent avec le temps au cours du passage des ondes sismiques au site. Ces temps d'occurrences sont voisins de ceux des pointes d'accélérations maximales des deux composantes accélérométriques.

Par ailleurs, il est intéressant de noter qu'aucun lissage du contenu spectral n'est nécessaire pour l'interprétation des spectres nonstationnaires. En effet, le lissage du contenu fréquentiel est systématiquement obtenu en utilisant le concept de spectre physique.

Les figures (3a) et (3b) montrent respectivement les variations des valeurs positives et des valeurs négatives de l'inter-spectre physique des deux accélérogrammes horizontaux. Il est clair que les valeurs de l'inter-corrélation varient avec le temps en intensité, à l'encontre du spectre physique, l'inter-spectre peut prendre des valeurs négatives (Figure 3b). Ces valeurs correspondent aux interférences destructives alors que les valeurs positives sont associées aux interférences constructives entre les deux composantes accélérométriques.

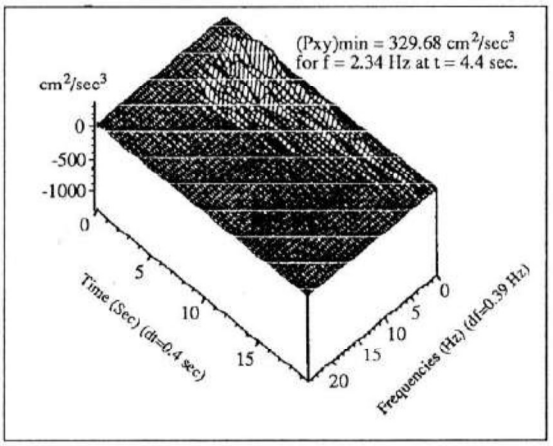


Figure 3a : Valeurs positives de l'inter-spectre $Re[P_{xy}(f,t)]$.

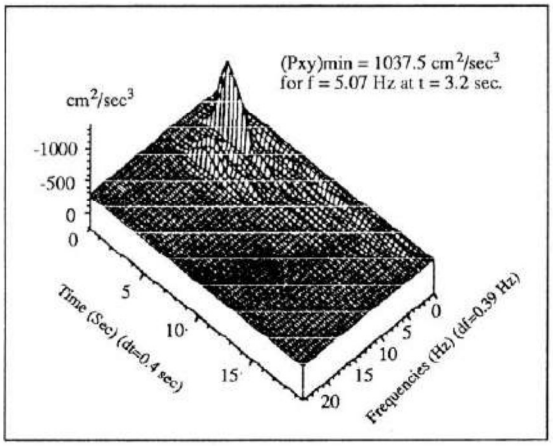


Figure 3a : Valeurs négatives de l'inter-spectre $Re[P_{xy}(f,t)]$.

Il convient de remarquer que les analyses spectrales, telles que celles décrites ci-dessus, permettent d'envisager des perspectives très utiles pour la décomposition du contenu spectral en ondes de volume et de surface selon la nature des sites étudiés, aux fins de mieux appréhender le problème de l'évaluation de stabilité des structures (sous l'action sismique de chaque type d'ondes) et de clarifier davantage les lois de régressions de leurs amplitudes en fonction de la distance.

De plus, les expressions de l'énergie instantanée (équations 11 à 13) peuvent être utilisées aux fins de détecter les directions majeures de la polarisation des ondes sismiques constitutives au cours de leur passage au site (Figure 4).

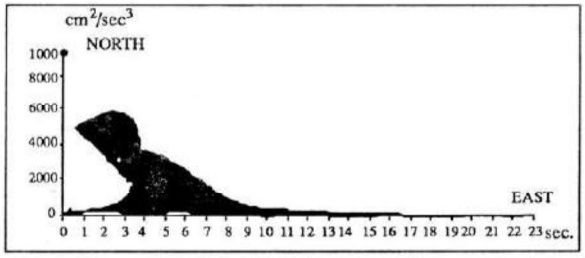


Figure 4 : Polarisation de l'énergie instantanée.

En outre, la procédure de caractérisation nonstationnaire peut être employée avantageusement pour le développement d'accélérogrammes synthétiques. A titre indicatif, les figures (5a) et (5b) montrent respectivement le modèle de spectre physique idéalisé et l'accélérogramme artificiel correspondant, compatible avec une classe d'événements sismiques de magnitude élevée ($6.5 < Ms < 7.5$) enregistré en champ proche ($d < 10$ km) sur un site rocheux.

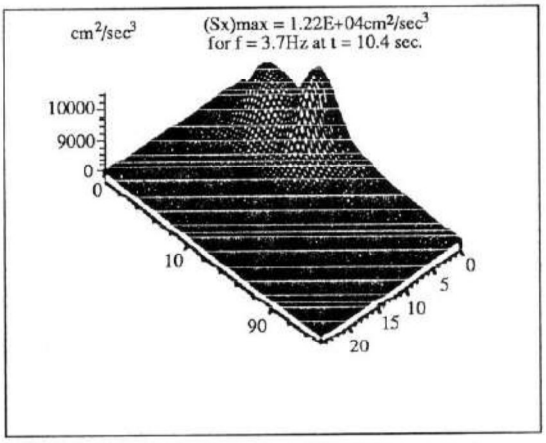


Figure 5a : Modèle de spectre physique idéalisé.

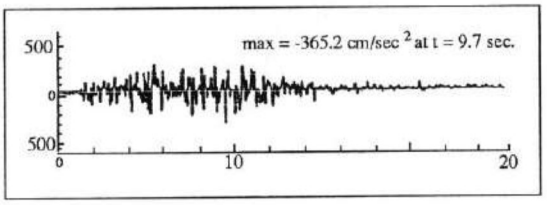


Figure 5b : Accélérogramme artificiel.

4 CONCLUSIONS

Les analyses spectrales et inter-spectrales non stationnaires des mouvements forts aux sites de construction peuvent être effectuées avec précision en employant la technique de caractérisation nonstationnaire des signaux sismiques présentée dans cet article. Elles peuvent fournir des informations d'une grande utilité notamment pour les effets de sites en champ proche sur la nature, la durée de vibration des ondes sismiques constitutives ainsi que la concentration temporelle de l'énergie sismique destructrice.

En outre, cette procédure de caractérisation nonstationnaire conjuguée à l'utilisation de l'algorithme numérique constituent un cadre d'analyse très performant pour des études de corrélations plus stables entre les paramètres maximaux des mouvements forts ou les paramètres caractéristiques du spectre physique d'une part et les variables physiques telles que distance source-recepteur, magnitude et conditions locales de sites, d'autre part.

L'utilisation de l'algorithme proposé pour le développement d'accélérogrammes synthéthiques nonstationnaires spectralement optimisés permet de réaliser un gain de temps C.P.U. de l'ordre de 60% ❸

BIBLIOGRAPHIE

[1] J.W. Cooley, P.A.W. Lewis and P.D Welch, (1969) : "*The Fast Fourier Transform and its applications*". Trans. I.E.E.E., Trans. education, Vol. E12, N°1, pp 27-34.

[2] W.D. Mark, (1970) : "*Spectral analysis of the convolution and filtering of nonstationary sthocastic process*". J. of Sound and Vib., Vol 11, N°1.

[3] B. Tiliouine, (1982) : "*Nonstationary analysis and simulation of seismic signals*". Ph.D., Dept. of Civil Engrg., Stanford Univ., Stanford, C.A., USA.

[4] B. Tiliouine, M. Hammoutene and H.C. Shah, (1991) : "*A two-dimensional nonstationary model for spectral analysis and simulation of seismic accelerations*". SMIRT 11 Transactios, Vol. K, Tokyo, Japan, pp. 13-20.

[5] M. Hammoutene, B. Tiliouine and P.Y. Bard, (1992) : "*A two-dimensional optimized accelerograms scaled for magnitude, distance and soil conditions*". 10th World Conf. on Eartq. Engrg., Madrid, Spain, pp. 817-821.

