



Analyse expérimentale sous vibrations ambiantes d'un pont à haubans sur l'oued Dib à Mila

Abderrahmane Kibboua* — **Mohamed Naboussi Farsi*** — **Jean-Luc Chatelain*,**** — **Bertrand Guillier*,**** — **Farid Bouriche***

* *Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS)*

01, rue Kaddour Rahim, BP 252, Hussein-Dey, Alger, Algérie

a.kibboua@cgs-dz.org

***Institut pour la Recherche et le Développement (IRD)*

Maison des Géosciences, Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique (LGIT), BP 53, 38041 Grenoble cedex 9, France

RÉSUMÉ. Cet article concerne l'exécution et l'interprétation des tests de vibrations ambiantes réalisés sur un pont à haubans sur l'oued Dib dans la ville de Mila en Algérie. Le traitement des mesures obtenues lors de ces tests permet de déterminer les caractéristiques dynamiques de l'ouvrage. Par ailleurs, un modèle numérique tridimensionnel de l'ouvrage a été développé dans le but d'estimer les fréquences propres ainsi que les modes de vibration associés. Ces informations sont nécessaires à l'organisation des tests sur le site (positionnement des capteurs, ordre de grandeur des fréquences à mesurer et formes des modes associés). Les fréquences obtenues par le modèle 3D sont comparées à celles obtenues expérimentalement par l'enregistrement de la réponse du pont au bruit de fond. Les coefficients d'amortissement des modes propres du pont obtenus au moyen de la méthode du décrétement aléatoire sont comparés à ceux obtenus expérimentalement sur des ponts similaires qui ont la même longueur de la travée centrale.

ABSTRACT. The proposed paper concerns the execution and interpretation of the results of ambient vibration tests done on a cable stayed bridge across the Mila Oued Dib River in Algeria. In addition, a three dimensional finite element model of the bridge is developed in order to assess the frequencies and the associated modes of vibration. This information will be necessary in the planning of the test on the site (locations of the sensors, frequencies to be measured and the associated mode shapes of vibration). The frequencies predicted by the 3-D

model are compared with those measured during full-scale ambient vibration measurements of the bridge. The same with the modal damping coefficients obtained by the random-decrement method are compared to those of similar bridges which have the same length of the central span.

MOTS-CLÉS : vibrations ambiantes, pont à haubans, caractéristiques dynamiques, modèle numérique, méthode du décrétement aléatoire.

KEYWORDS: ambient vibrations, cable stayed bridge, dynamic characteristics, numerical model, random decrement method.

1. Introduction

Les caractéristiques dynamiques d'ouvrages de génie civil existants peuvent être obtenues en première approximation à partir de modèles mathématiques plus ou moins complexes. Une autre approche consiste à utiliser les modèles réduits. Toutefois, ces méthodes ont montré leurs limites du fait des problèmes posés par la similitude modèle réduit-modèle réel, et également à cause de leur coût. Une dernière approche est l'analyse «in situ» des ouvrages déjà réalisés. La méthode consiste à mesurer et à analyser les réponses des structures à des sollicitations naturelles ou artificielles. Dans cet article, nous avons utilisé les réponses à des sollicitations par le bruit de fond (vibrations ambiantes). De plus, la faible amplitude (10^{-6} à 10^{-4} g) des sollicitations n'endommage pas les structures qui se comportent dans le domaine élastique linéaire. Enfin, les études dynamiques basées sur le bruit de fond sont rapides, simples, peu coûteuses et ne constituent pas de gêne pour les structures en service.

2. Description de l'ouvrage

L'ouvrage étudié est un pont à haubans comprenant trois travées de 111 m, 280 m et 111 m pour une longueur totale de 502 m. Il relie les villes de Mila à Jijel et il est classé ouvrage stratégique pour la wilaya de Mila. Le tablier, composé de deux voies est en béton précontraint avec une largeur totale de 13.30 m. L'épaisseur de la dalle (partie supérieure du voussoir préfabriqué) est de 20 cm, raidi par trois nervures de 2 m de haut et 0.22 m de large. Les pylônes sont en forme de H, constitués chacun de piles et de mâts respectivement au dessous et au dessus du tablier (Figure 1). Le haubanage du tablier est en demi - éventail et latéral, avec un total de 88 câbles, 44 soutenant la travée centrale et 22 pour chaque travée de rive. Les câbles des haubans sont constitués avec des barres en acier de 7 mm de diamètre et ont des sections variant entre 22.5 et 55.5 cm².



Figure 1. Vue générale du pont à haubans sur l'Oued Dib à Mila.

3. Analyse expérimentale

La méthode consiste à placer des capteurs de vitesse ou d'accélération en différents points de la structure de l'ouvrage, pour enregistrer sa réponse au moyen d'une chaîne de mesure (Figure 2). Malgré la faible amplitude de cette sollicitation, il est possible de mesurer la réponse du pont à cette sollicitation et d'en déduire ses caractéristiques dynamiques dans le domaine des petites déformations (Farsi, 1996 ; Boutin *et al.*, 1999 ; Hans, 2002 ; Kibboua, 2006). Ainsi tous les inconvénients liés aux systèmes mécaniques à mettre en place pour générer une sollicitation sont évités. La facilité de mise en œuvre permet de répéter les mesures et de multiplier les structures (ponts, bâtiments, etc.) testées.

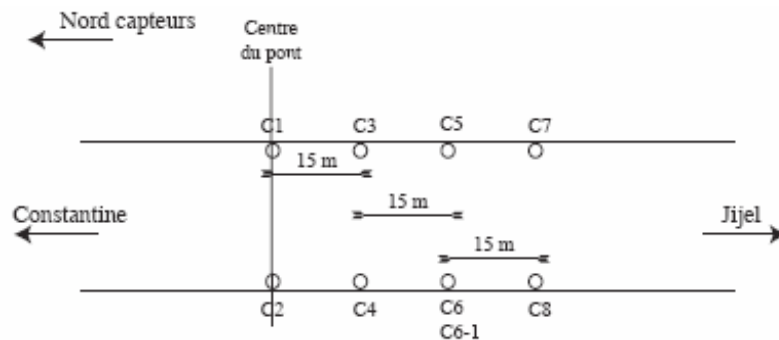


Figure 2. mesure au bruit de fond. Configurations des sismomètres coté Jijel.

3.1. Chaîne de mesure

L'équipement utilisé pour les tests in situ se compose de sismomètres à trois composantes (verticale, horizontale NS et horizontale EO), et de stations d'enregistrement CityShark. Plusieurs enregistrements de bruit de fond ont été réalisés sur le pont à l'aide de ces stations (Chatelain *et al.*, 2000).

3.1.1. Les sismomètres

Ce sont des capteurs de vitesse du type Lennartz 5 secondes à 3 composantes (Le3D-5s), destinés à enregistrer des fréquences de mouvements dus au vent, circulation, etc. Ils sont très adaptés aux ouvrages de génie civil et en particulier aux sols.

3.1.2. La station d'enregistrement CityShark

Il y a deux types de stations d'acquisition CityShark : la station CityShark qui permet la connexion d'un seul capteur à 3 composantes et la station CityShark II qui, permet la connexion simultanée de 6 capteurs à 3 composantes et de numériser leur signal simultanément. La fréquence d'échantillonnage peut varier suivant le cas de 10 à 1000 Hz. Les données enregistrées sont stockées dans une carte flash.

3.2. Détermination des spectres à partir des enregistrements

Le bruit de fond est une sollicitation aléatoire, et l'analyse de la réponse dynamique de l'ouvrage à cette sollicitation consiste à calculer les spectres de Fourier sur plusieurs fenêtres du signal de la réponse et à les moyenner en calculant leur écart type. Cependant, toutes les fenêtres du signal ne peuvent pas être utilisées car le bruit de fond est une sollicitation qui provient de l'activité ambiante autour de la structure étudiée (Figure 3). Pour pouvoir être utilisée dans l'analyse dynamique, il est nécessaire qu'elles représentent un bruit blanc, au moins dans la plage de fréquences des structures de génie civil.

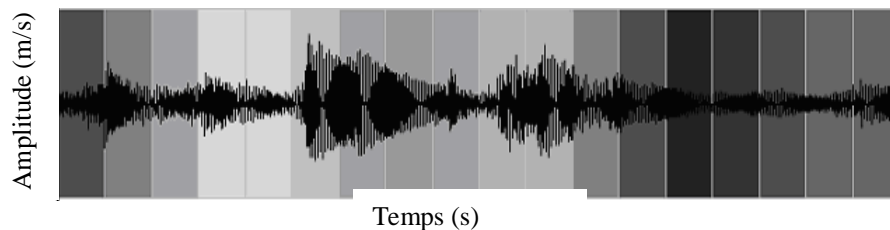


Figure 3. Enregistrement de bruit de fond sur le pont dans la direction verticale

Une fois les fenêtres de signal choisies, l'amplitude spectrale est calculée sur chaque fenêtre par une transformée de Fourier. Les spectres sont ensuite lissés avec une fenêtre glissante dont la forme et la largeur dépendent de la fréquence (Konno *et al.*, 1998). Puis ces spectres sont moyennés et un écart type est calculé (figures 4 et 5). Les transformées de Fourier des signaux enregistrés permettent de déterminer les fréquences propres de l'ouvrage qui sont extraites, par simple repérage des pics correspondant aux maxima des réponses.

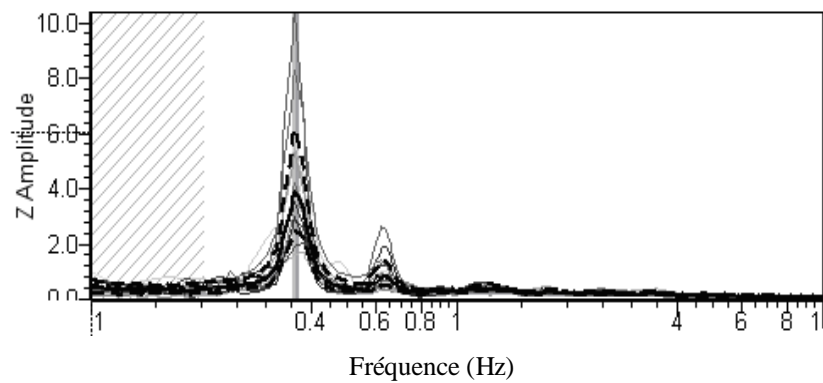


Figure 4. Spectres sur les différentes fenêtres de l'enregistrement de bruit de fond sur le pont dans la direction verticale

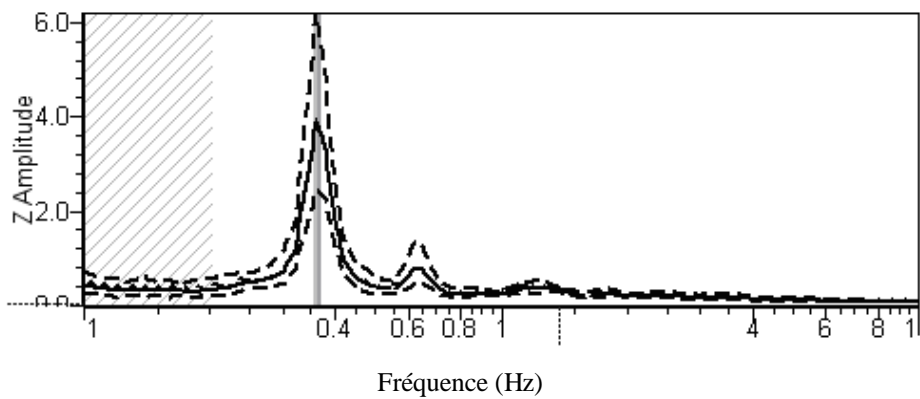


Figure 5. Spectres de l'enregistrement de bruit de fond sur le pont dans la direction verticale. Le trait continu est la moyenne des spectres calculés sur les différentes fenêtres et les traits discontinus représentent l'écart type.

3.3. Fréquences modales expérimentales

Un total de 6 modes de vibration du pont de Mila a été identifié à partir des enregistrements de bruit de fond dans la gamme de fréquence de 0-1 hertz. Le mode fondamental est un mode vertical avec une fréquence de 0.36 Hz. Le premier mode transversal s'est avéré se produire à la fréquence de 0.39 Hz. Quant au mode longitudinal, il se produit à la fréquence de 0.38 Hz.

Pour les besoins d'exploitation et de visualisation rapides des résultats, les principales fréquences caractéristiques mesurées sur l'ouvrage sont consignées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Fréquences modales du pont expérimentalement identifiées

Mode	Fréquences (Hz)	Classification du mode
1	0.36	Vertical (Z)
2	0.38	Longitudinal (NS)
3	0.39	Transversal (EO)
4	0.55	Transversal (EO)
5	0.56	Longitudinal (NS)
6	0.63	Vertical (Z)

3.4. Estimation des coefficients d'amortissement

L'analyse par la méthode du décrément aléatoire (Delome *et al.*, 1990) pour l'estimation de la valeur du coefficient d'amortissement des modes propres du pont a été utilisée ; elle permet d'évaluer l'amortissement par observation de la réponse de la structure du pont à partir d'enregistrements de bruit de fond.

3.4.1. Valeurs des coefficients d'amortissement

Les valeurs des coefficients d'amortissement obtenues sur le pont de Mila sont comparées à celles obtenues expérimentalement sur les ponts de Tampico et Figueira da Foz. Ces valeurs sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Fréquences modales et amortissements modaux des ponts Mila, Tampico et Figueira da Foz

Identification	Longueur totale (m)	f ₁	f ₂	f ₃	f ₄
		(Hz)	(Hz)	(Hz)	(Hz)
		ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)

Pont de Mila	502	0.36	0.39	0.55	0.63
		0.40	0.24	0.34	1.25
Tampico Bridge	640	0.40	0.45	0.90	-
		0.39	0.20	-	-
Figueira da Foz Bridge	405	0.51	0.60	0.73	0.87
		1.60	1.30	1.60	1.00

4. Analyse modale

La structure du pont de Mila avec une configuration géométrique complexe est modélisée en éléments finis à l'aide du logiciel SAP 2000 (SAP 2000, 1997).

Le tablier a été modélisé à l'aide de 2959 éléments de type *coque* (shell element) ; les pylônes (mâts + piles) et les câbles ont été modélisés au moyen de 316 éléments de type *barre* (frame element) ; le modèle comprend 2412 nœuds.

Les pylônes sont supposés encastés au niveau du sol, faisant abstraction de toute interaction avec le sol et du fluide avec les piles. La liaison tablier / pylônes a été modélisée comme une liaison fixe.

4.1. Résultats de l'analyse modale

Les fréquences modales du modèle analytique du pont dont la participation de la masse modale de vibration est supérieure à 5 % de la masse totale sont récapitulées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Fréquences de vibration et participation massique de chaque mode

Mode	Fréquences (Hz)			Participation modale (%)		
	f_x	f_y	f_z	U_x	U_y	U_z
1	1.088	0.344	0.343	67.21	57.74	11.14
2	1.189	0.769	0.749	8.48	25.56	12.47
3	3.768	1.689	0.900	6.13	6.41	17.89
4	-	-	6.810	-	-	11.10

5	-	-	6.995	-	-	6.46
6	-	-	8.915	-	-	12.10

x : direction longitudinale ; y : direction transversale ; z : direction verticale

4.2. Comparaison des résultats mesurés avec ceux du modèle en élément finis

Les fréquences propres mesurées expérimentalement sont comparées aux valeurs calculées numériquement et sont données dans le tableau 4 ci-après.

Tableau 4 : Comparaison des fréquences mesurées et des fréquences calculées

Direction	Mode	f_{mes} (Hz)	f_{cal} (Hz)	f_{cal} / f_{mes}
Vertical	1	0.36	0.343	0.96
	2	0.63	0.749	1.19
Transversal	1	0.39	0.344	0.88
	2	0.55	0.769	1.40
Longitudinal	1	0.38	1.088	2.86
	2	0.55	1.109	2.02

Dans les directions verticale et transversale, les valeurs calculées numériquement à l'aide du modèle 3-D en éléments finis sont relativement comparables à celles mesurées expérimentalement pour les deux premiers modes. Cependant, dans la direction longitudinale, le modèle en élément finis s'avère trop rigide. Ainsi, il y a lieu de modifier le schéma statique du pont pour obtenir une fréquence numérique aussi proche que possible de celle obtenue expérimentalement.

5. Conclusion

Un pont à haubans est un ouvrage dont le comportement dynamique est relativement complexe avec plusieurs modes de vibrations couplés.

La maîtrise des équipements de mesure ainsi que la mise en œuvre de la méthodologie d'auscultation dynamique de l'ouvrage n'ont pas été faciles compte tenu du site d'implantation de l'ouvrage et de ses dimensions. En plus, du fait que le pont devait rester opérationnel au cours des essais, plusieurs heures d'enregistrements ont été nécessaires.

Le traitement et l'interprétation des signaux enregistrés ont été réalisés avec un logiciel spécifique qui a permis d'extraire les caractéristiques dynamiques du pont. Il a fallu extraire pas moins de 75 modes de vibration pour identifier les principaux modes de vibration à retenir afin de mobiliser une masse modale de 90% et plus de

la masse totale. Par ailleurs, un modèle numérique en éléments finis du pont a été développé sur la base des informations collectées au niveau du maître d'ouvrage.

Les fréquences calculées pour les modes de vibration vertical et transversal sont comparables à celles mesurées sur site, par contre celles du mode de vibration longitudinal en sont très éloignées. Ceci s'explique par la liaison fixe retenue dans le modèle alors que le tablier repose en réalité sur les traverses des pylônes par l'intermédiaire d'appuis en élastomère fretté. Pour le pont à haubans de Mila, les valeurs d'amortissement varient entre 0.40% et 1.25%. Par ailleurs, pour le pont Tampico, les coefficients d'amortissement mesurés sont $\xi_1 = 0.38\% \sim 0.41\%$ et $\xi_2 = 0.20\%$, alors que pour le pont Figueira da Foz, les valeurs obtenues sont $\xi_1 = 1.6\%$, $\xi_2 = 1.3\%$, $\xi_3 = 1.6\%$ et $\xi_4 = 1.0\%$. Ces valeurs des coefficients d'amortissement mesurés sont très faibles par rapport aux valeurs utilisées dans les calculs pour les structures en béton qui sont de l'ordre de 5% à 7%.

6. Bibliographie

- Boutin C., Hans S., Erdin I., Lorient M., Approche de la vulnérabilité sismique par l'étude du comportement de bâtiments réels, Rapport de recherche n° 265, septembre 1999, ENTPE.
- Chatelain J-L., Guéguen P., Guillier B., Fréchet J., Bondoux F., Sarrault J., Sulpice P., Neuville J-M., «CityShark : A User-friendly Instrument Dedicated to Ambient Noise (Microtremor) Recording for Site and Building Response Studies », *Seismological Research Letters*, vol. 71, n° 6, 2000, p. 698-703.
- Farsi MN., Identification des structures de génie civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâti existant, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 1996.
- Hans S., Auscultation dynamique de bâtiments et modélisation par homogénéisation. Contribution à l'analyse de la vulnérabilité sismique, Thèse de doctorat, ENTPE, 2002.
- Huerta CI., Roesset JM., Stokoe KH., «Evaluation of the random decrement method for in-situ soil properties estimation; The effects of surface geology on seismic motion », *Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds)*, ISBN 90 5809 030 2, 1998, p. 749-756.
- Kibboua A., Analyse dynamique sous vibrations ambiantes d'un pont à haubans sur l'Oued Dib à Mila, Mémoire de magister, Ecole Nationale des Travaux Publics, 2006.
- Konno K., Ohmachi T., « Ground- Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor », *Bull. Seism. Soc. Am.*, vol. 88, n°1, 1998, p. 228-241.
- SAP 2000, Computers and Structures, Inc., *SAP 2000 Structural Analysis Program: Non Linear Version 7.40*, Berkeley, California, 1997.