

ÉVALUATION DES FRÉQUENCES PROPRES DES GRADINS DU STADE DE BARAKI-ALGER À L'AIDE DES ESSAIS DE VIBRATIONS AMBIANTES.

EVALUATION OF THE NATURAL FREQUENCIES OF THE GRANDSTANDS OF THE BARAKI-ALGER STADIUM, THROUGH AMBIENT VIBRATION TESTS.

Réception : 15/02/2022

Acceptation : 22/03/2022

Publication : 08/06/2022

AIROUCHE¹ Abdelhalim, AKNOUCHE¹ Hassan, BENKACI¹ Nassima, BECHTOULA¹ Hakim¹ Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (C.G.S), 01 rue Kaddour Rahim, BP252, 16040 H-Dey, Algerairouche@yahoo.fr; hairouche@cgs-dz.org; haknouche_70@yahoo.fr; nbenkaci@cgs-dz.org; hbechtoula@cgs-dz.org

Résumé - La structure des stades de football présente des différences majeures comparée aux autres structures courantes de génies civils telles que les bâtiments. En effet, le stade étant le lieu principal des grands événements sportifs et sociaux, et en raison de sa capacité d'accueil considérable, il est soumis à la fois aux mouvements synchronisés et aux mouvements aléatoires des grandes foules. Ceci peut engendrer des niveaux de vibration élevés qui peuvent devenir désagréables pour les spectateurs ou, dans des cas extrêmes, conduire à la panique. Par conséquent, les caractéristiques dynamiques des gradins des stades doivent être identifiées avec précision afin d'atténuer les problèmes causés par ces vibrations excessives.

Dans cet article, l'identification expérimentale des fréquences propres des gradins du stade de Baraki au sud-est d'Alger, en utilisant des tests de vibrations ambiantes, est présentée. Les équipements utilisés, la méthodologie des tests et les techniques de traitement de données ainsi que les principaux résultats obtenus sont y décrits.

Mots - clés : Gradins de stade, Identification expérimentale, Fréquences propres.

Abstract-The structure of the Football stadiums presents major differences compared to other common civil engineering structures such as buildings. Indeed, the stadium being the main location of major sports and social events, and due to its large capacity, it is subject to both synchronized movement and random movement of large crowds. This can result in high vibration levels that can become uncomfortable for spectators or, in extreme cases, lead to panic. Therefore, the dynamic characteristics of stadium grandstands need to be accurately identified in order to mitigate the problems caused by these excessive vibrations.

In this paper, the experimental identification of the natural frequencies of the Baraki stadium bleachers, using ambient vibration tests, is presented. The used equipment, the test methodology and data processing techniques as well as the main results obtained are described in this paper.

Keywords: Stadium grandstands, Experimental identification, Natural frequencies.

1-Introduction

L'objectif premier lors de la conception et la réalisation des ouvrages est de garantir la sécurité des personnes. Cet objectif est d'autant plus important pour les édifices accueillants un très grand nombre de personnes, telles que les immeubles de grande hauteur, les salles de

conférences et les complexes sportifs comme les stades de football.

De tels édifices sont susceptibles de subir des charges dynamiques importantes et peuvent être soumis à des vibrations excessives pendant leur durée de vie. C'est le cas des tribunes des stades pour lesquelles les typologies structurelles basées sur des solutions techniques

légères et élancées sont fréquemment adoptées [1 & 2], ce qui les rend très sensibles aux vibrations. De ce fait, Il est fortement recommandé de mesurer leurs caractéristiques dynamiques (fréquences et modes propres et amortissement modal) afin de mieux comprendre leur comportement dynamique sous des charges de services ainsi que sous des charges extrêmes telles que celles causées par des excitations sismiques ou des mouvements de foules. En outre, ces caractéristiques dynamiques mesurées peuvent servir à la mise à jour des modèles numériques afin de rendre ces derniers encore plus fiables et plus précis [3].

Ces deux dernières décennies, plusieurs sujets de recherche utilisant des méthodes d'identification expérimentales ont été consacrés à la performance dynamique des structures de stade. Ces projets ont été rendus possibles grâce à la disponibilité de nouveaux capteurs plus performants, de systèmes d'acquisition de données peu onéreux et de techniques d'estimation des paramètres modaux plus fiables [4 - 9]. Jones et al. [10] ont démontré que la réponse dynamique des tribunes de stades dépend non seulement des caractéristiques mécaniques de base, à savoir la rigidité, la masse et l'amortissement, mais aussi de la nature de la charge tels que les effets des mouvements de foules. Reynolds et al. [11] ont effectué des essais de vibrations forcées et des essais de vibrations ambiantes pour identifier les caractéristiques dynamiques des gradins d'un stade. La comparaison des résultats des simulations numériques aux données expérimentales a révélé que les fréquences calculées sont inférieures aux fréquences mesurées. Ceci est peut être dû à la rigidité supplémentaire causée par les éléments non-structuraux qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle numérique. Caprioli et al. [12] ont effectué des tests sur le stade Giuseppe-Mezza à Milan pendant les matchs de football et les concerts de musique. L'objectif étant d'étudier les deux principales sources de vibrations d'origine humaine que sont les charges impulsives et les charges à caractère rythmique. Ils ont observé que le niveau de vibrations du mouvement coordonné (rythmique) est plus important que celui dû aux

charges impulsives (réactions suite à un but marqué pendant le jeu, par exemple).

Le présent article porte sur la caractérisation dynamique expérimentale d'une tribune du stade de Baraki au sud-est d'Alger. Le premier objectif de l'étude est d'évaluer les fréquences propres de la structure du stade sous l'effet de vibrations ambiantes. Le second, exploiter ces fréquences obtenues pour l'élaboration d'un modèle en éléments finis fiable qui pourrait être utilisé dans des simulations numériques ultérieures et évaluer la réponse structurelle des tribunes du stade sous l'action des mouvements de foule. Dans cet article, une description du stade de Baraki est présentée en mettant l'accent sur la tribune analysée. Ensuite, les équipements utilisés, la méthodologie des tests et les techniques d'identification et de traitement de données employées sont abordés. Enfin, les principaux résultats des essais de vibrations ambiantes, effectués sur les tribunes du stade, sont présentés.

2-Description de l'expérimentation

2.1- La structure

Le stade est situé dans la commune de Baraki au sud-est d'Alger et a une capacité globale de 40 000 spectateurs en places assises. Les travaux de construction ont commencé en 2009 et en décembre 2018, période durant laquelle nous avons effectué notre campagne d'essais de vibrations ambiantes, les gros œuvres ainsi que la toiture du stade en charpente métallique sont complètement achevés. Une vue générale du stade est présentée sur la figure 1.

Structurellement, les tribunes sont divisées en 14 modules indépendants, séparés par des joints de 20 cm d'épaisseur (figure 2). Ces modules reposent sur un système de fondation en pieux profonds. Une toiture en charpente métallique couvre l'ensemble des tribunes et repose sur 4 gros poteaux tubulaires de sections triangulaires. Ils sont directement ancrés au sol (figure 3). Des tirants relient le sommet des tribunes à la toiture afin d'empêcher le soulèvement de celle-ci sous l'effet du vent.



Figure 1. Vue générale du stade de Baraki

Figure 1. General view of the Baraki stadium

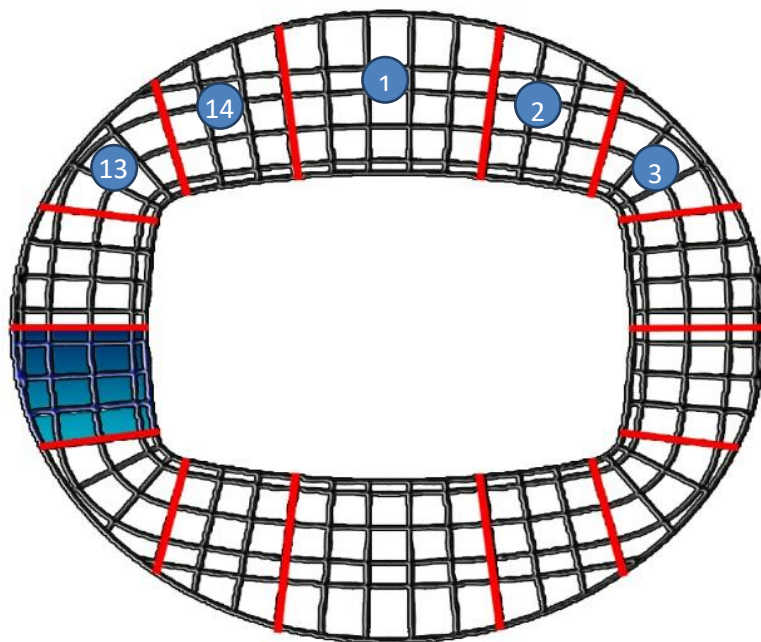


Figure 2. Vue en plan du stade, la partie colorée en bleu représente notre zone d'étude

Figure 2. Plan view of the stadium, the colored zone in blue represents the study area



Figure 3. Vue de face des gradins du stade avec la toiture en charpente métallique.

Figure 3. Front view of the stadium grandstands with the steel roof structure.

2.2-L'instrumentation

La figure 4 montre la tribune sur laquelle les tests de vibrations ambiantes ont été effectués ainsi que le schéma d'instrumentation utilisé pendant les tests. 13 capteurs ont été utilisés pendant les tests : 12 sont réparties sur les gradins, le treizième est fixé au le sol (capteur en champs libre). Les capteurs sont des vélocimètres LennartzTM à trois composantes.

Chaque capteur est relié à une station d'acquisition City Shark, équipée d'un GPS qui permet d'assurer la base de temps des enregistrements. Afin de garantir une cohérence des signaux enregistrés, une configuration unique est appliquée à toutes les stations, à savoir : une durée d'enregistrement de 15 minutes, un gain de 64 et une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz.

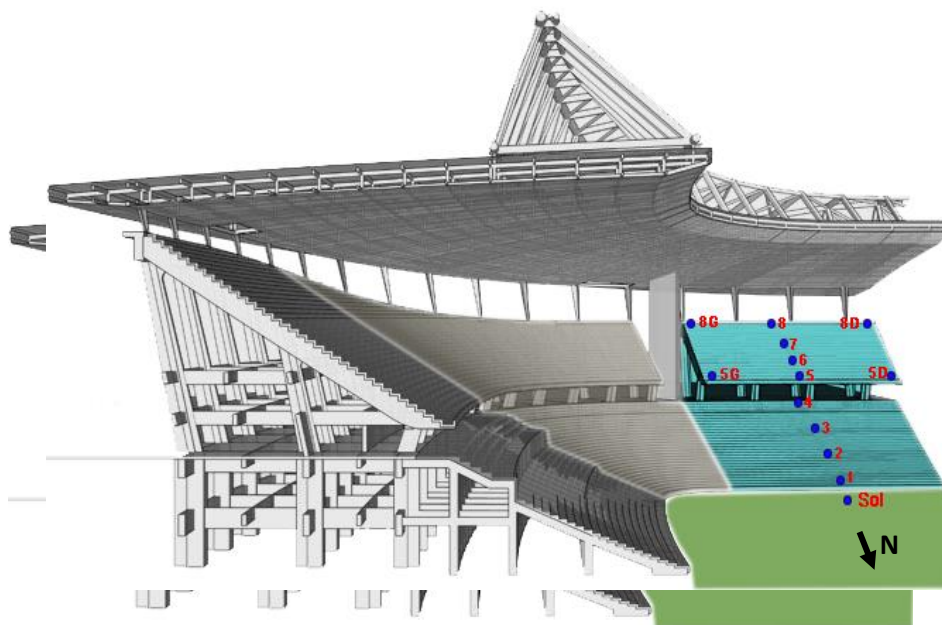


Figure 4. Vue isométrique d'une partie du stade avec emplacement des points d'enregistrement.

Figure 4. Isometric view of a part of the stadium with location of the recording points.

3-Traitement des résultats

Pour analyser les enregistrements réalisés durant les tests nous avons utilisé le code de calcul *ambVibAnalysis* que nous avons développé, sous Matlab, à cet effet. Le programme permet d'effectuer les opérations suivantes :

Partie 1 : prétraitement

- Couper les enregistrements de telle sorte à ce qu'ils aient tous le même début et la même fin.
- Soustraire des enregistrements effectués sur les gradins le mouvement du sol enregistré.
- Subdiviser les enregistrements en fenêtres de 30 secondes.
- Sélection des fenêtres stables en utilisant le critère du rapport STA/LTA. Ce critère consiste en la comparaison de moyennes du signal calculées sur deux durées différentes : une moyenne sur un temps court STA (short time average) de l'ordre de la seconde dont la valeur est sensible aux variations d'amplitudes et une moyenne sur

un temps plus long de l'ordre de 20-30 secondes LTA (long time average) dont la valeur est peu sensible aux variations d'amplitude transitoires. Afin de qualifier la stabilité du signal, des bornes sont définies entre lesquelles ce rapport STA/LTA peut varier. Dans notre cas, les bornes inférieures et supérieures définies sont 0.2 et 2.5 respectivement.

- Affichage des signaux ainsi traités (figure 3).

Partie 2 : analyse spectrale

- Calculer les densités spectrales de puissance (DSP) pour toutes les fenêtres stables et pour tous les points sur lesquels les enregistrements sont effectués. Ces spectres sont ensuite moyennés.
- Affichage des DSP et de leurs moyennes.
- Calculer les pseudos fonctions de transfert définies comme étant le rapport entre la moyenne des DSP de chaque point (Pt1 à Pt8) sur la moyenne des DSP du sol.
- Affichage des résultats.

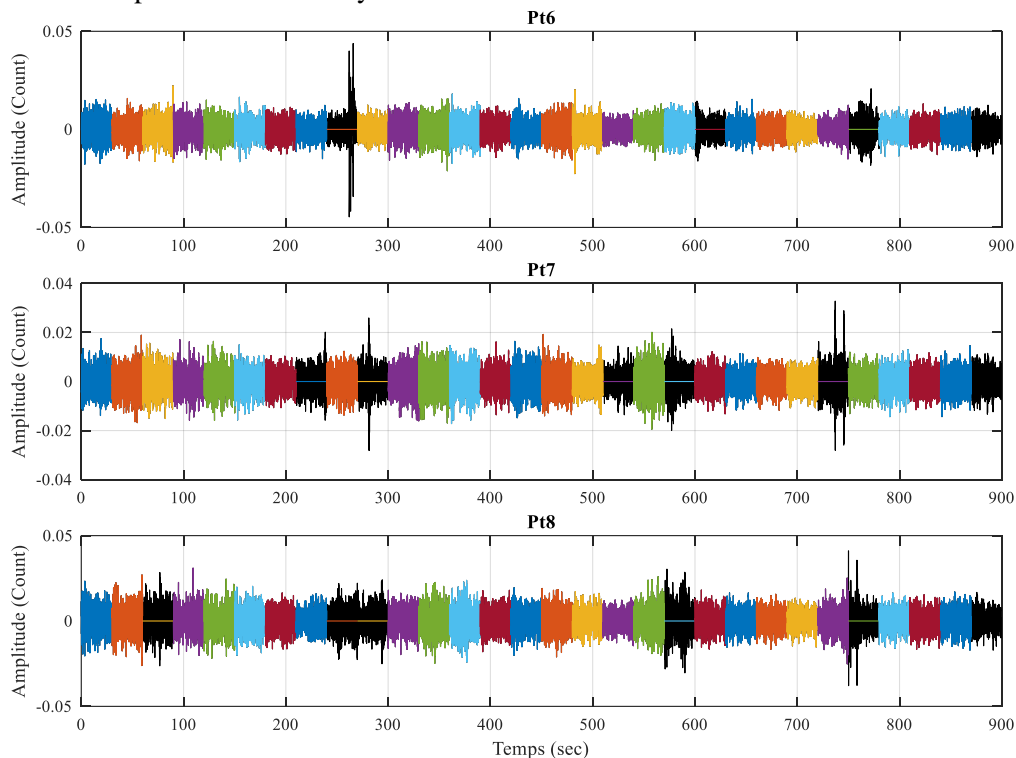


Figure 5. Enregistrement de bruit ambiant à différents points. Choix des fenêtres stables en utilisant les bornes limites STA/LTA. Les fenêtres en couleurs sont stables et celles en noir sont rejetées.

Figure 5. Recording of ambient noise at different points. Stable window selection using STA/LTA bounds. Color windows are stable and black windows are rejected

4-Résultats et discussions

Nous avons calculé les DSP et les fonctions de transfert pour chaque point d'enregistrement comme décrit précédemment, pour les deux composantes Nord-Sud et Est-Ouest.

Rappelons que la direction Nord-Sud du capteur est alignée avec le tracé des points d'enregistrement de 1 à 8 (figure 4). Nous appelons la direction longitudinale celle correspondant à l'orientation Nord-Sud et la direction transversale celle correspondant à l'orientation Est-Ouest.

Le tracé des DSP montre une allure commune pour tous les points, toutefois elles sont plus ou moins chahutées pour les points allant de 1 à 4. L'amplitude des DSP est la plus importante au point 8 (figure 6 et figure 7).

Pour une meilleure lecture des résultats, nous avons superposé les fonctions de transfert des points allant de 5 à 8 et ceux des points à gauche et à droite des points 5 et 8 respectivement nommés 5G, 5D et 8G, 8D, sur la figure 8.

Dans la direction longitudinale des gradins, trois fréquences sont apparentes (figure. 8-a), la première dont l'amplitude est la plus importante au point 8 est à 5 Hz, la deuxième à 6.4 Hz et une troisième apparaît à la fréquence de 8.2 Hz. Le pic à la fréquence de 8.2 Hz est apparent sur tous les points d'enregistrement dans la direction longitudinale, y compris sur les points d'enregistrement à droite et à gauche des gradins (5G, 5D, 8G, 8D).

Dans la direction transversale, deux fréquences sont apparentes (figure 8-b) : la première dont l'amplitude est la plus importante au point 8 est à la fréquence 5.6 Hz et la deuxième à la fréquence de 8.2 Hz. Le pic à la fréquence de 8.2 Hz apparaît sur tous les points d'enregistrement sauf au sommet des gradins au point 8, ainsi qu'aux points de droite et de gauche (pt. 8G et pt. 8D).

La fréquence de 8.2 Hz semble être une fréquence qui correspond à un mode de torsion. Le mouvement de torsion est normalement visible dans les deux directions, surtout aux points à droite et à gauche des gradins. Seulement, la présence des tirants qui relie la

toiture aux gradins, empêche ce mouvement à la fréquence de 8.2 Hz au sommet dans la direction transversale (points 8, 8G et 8D) alors qu'il est bien visible aux points 5, 5G et 5D.

Dans la direction longitudinale, où le mouvement est permis au sommet, la fréquence de 8.2 Hz est bien présente sur tous les points d'enregistrement, avec une amplitude beaucoup plus grande aux points à droite et à gauche des gradins (5G, 5D, 8G et 8D) où le mouvement de torsion est le plus perceptible (figure. 8a). L'axe du centre de torsion est proche du milieu des gradins, dans le sens longitudinal pas loin du point 5.

5-Conclusion

Dans cet article, une identification expérimentale des fréquences propres des gradins du stade de Baraki a été présentée à travers les enregistrements de vibrations ambiantes.

Le calcul des fonctions de transfert donne une première fréquence de 5 Hz dans le sens longitudinal et une fréquence de 5.6 Hz dans le sens transversal. Une deuxième fréquence est obtenue uniquement dans le sens longitudinal de l'ordre de 6.4 Hz alors qu'une troisième fréquence pouvant être attribuée à un mode de torsion est observée dans les deux directions, de l'ordre de 8.2 Hz.

Il convient de noter que les résultats obtenus dans cette étude serviront à l'élaboration d'un modèle en élément finis fiable qui peut être utilisé dans des simulations numériques ultérieures pour évaluer la réponse structurelle de la tribune du stade sous différentes conditions de chargement dynamique.

Une autre perspective à ce travail, consiste à instrumenter le stade pour des enregistrements de vibrations ambiantes pendant les matchs. Ces enregistrements constitueront un outil intéressant pour des comparaisons d'avant et après la mise en service et pour la surveillance de l'intégrité structurelle du stade.

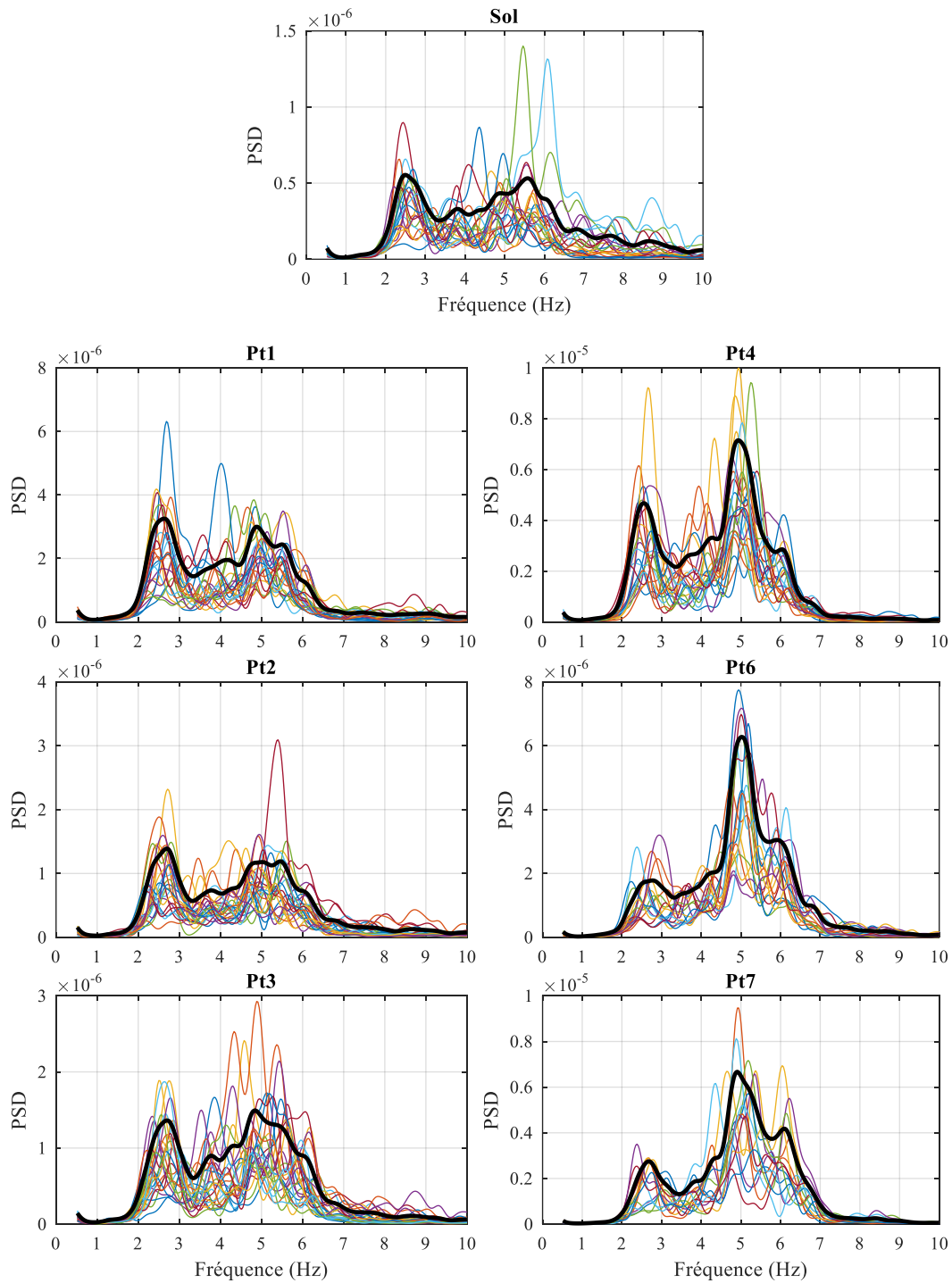


Figure 6. Densités spectrales de puissance (DSP) des fenêtres stables et leurs moyennes (composante Nord-Sud), suite....

Figure 6. Power spectral densities (PSD) of stable windows and their averages (North-South component), continued....

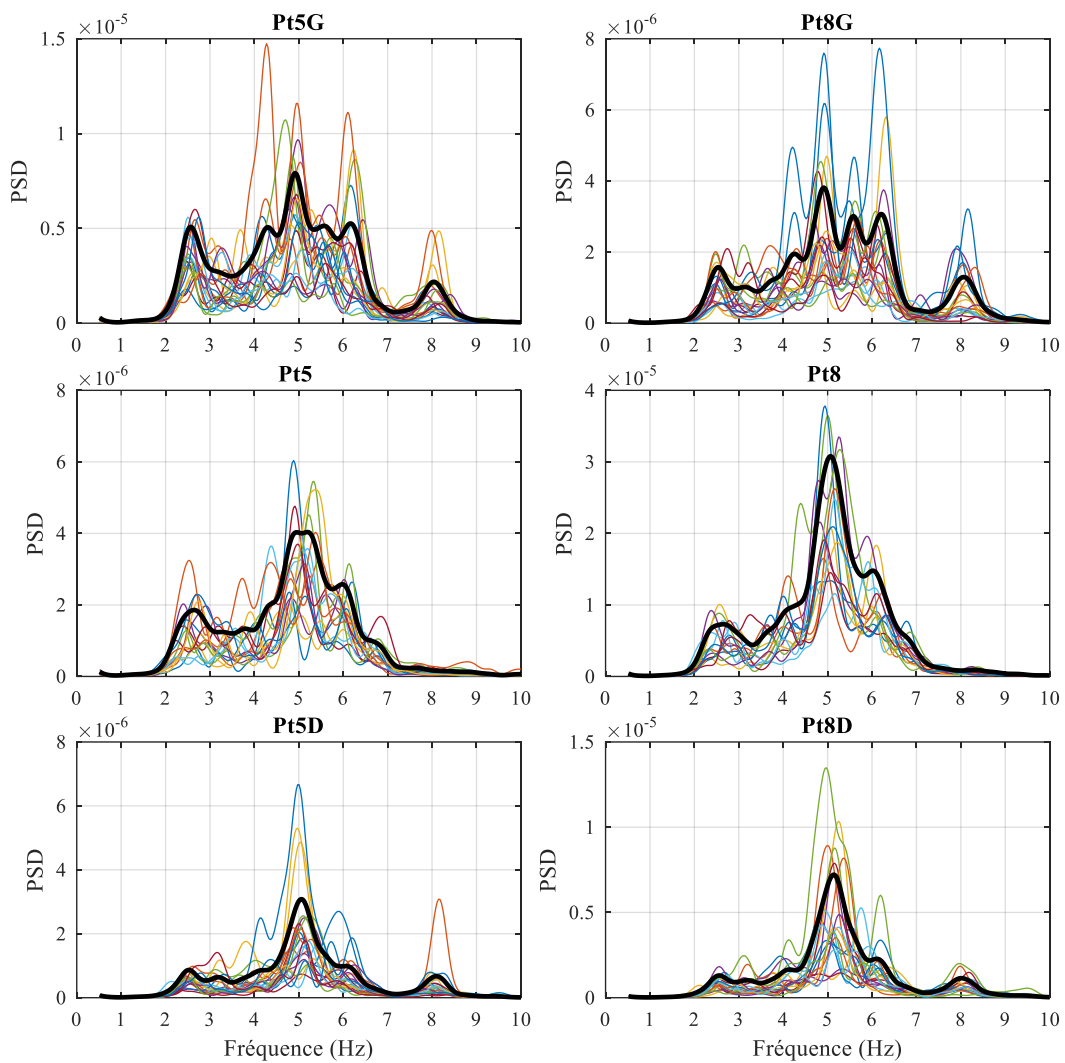


Figure 6. Densités spectrales de puissance (DSP) des fenêtres stables et leurs moyennes (composante Nord-Sud)

Figure 6. Power spectral densities (PSD) of stable windows and their averages (North-South component)

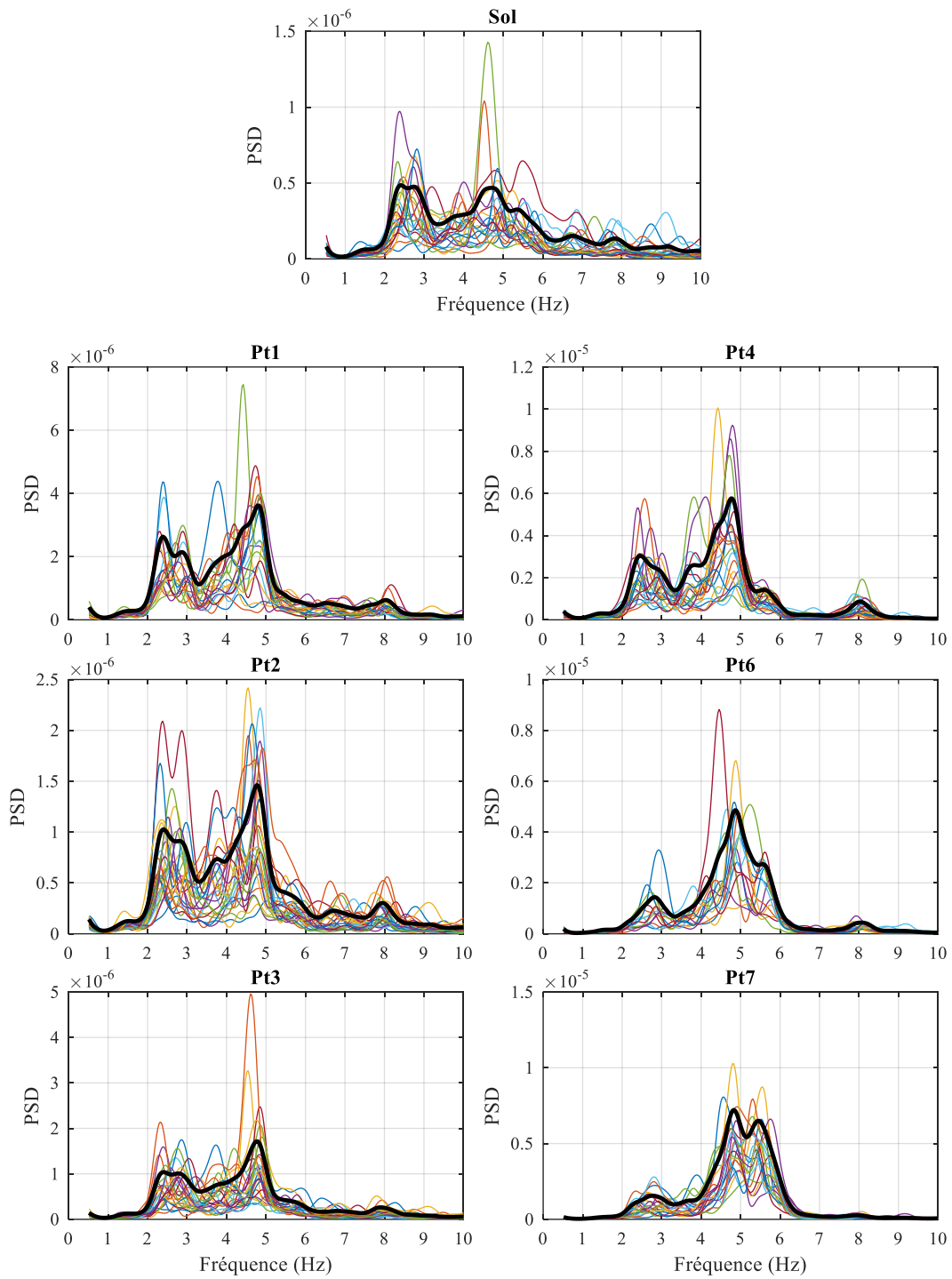


Figure 7. Densités spectrales de puissance (DSP) des fenêtres stables et leurs moyennes (composante Est-Ouest), suite....

Figure 7. Power spectral densities (PSD) of stable windows and their averages (East-West component), continued....

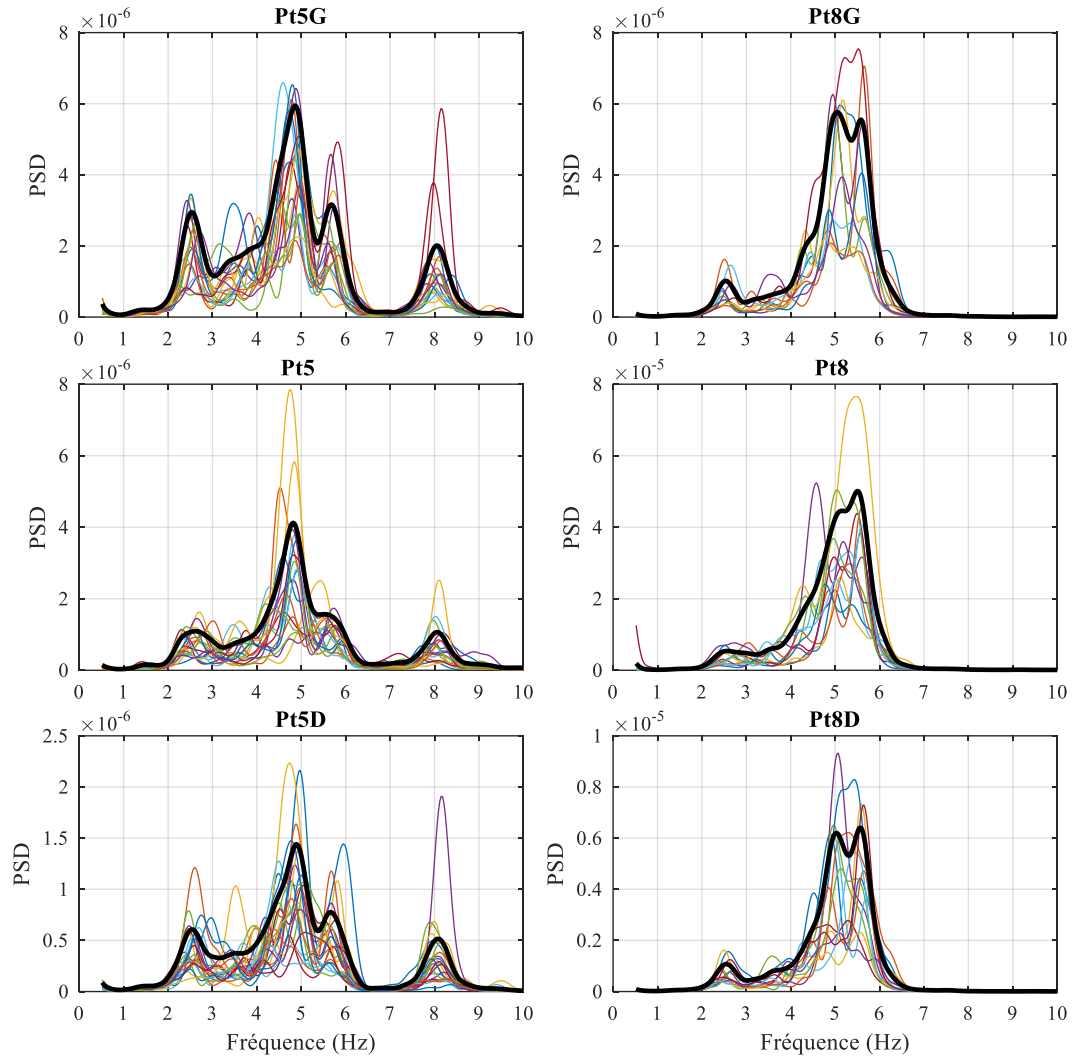


Figure 7. Densités spectrales de puissance (DSP) des fenêtres stables et leurs moyennes (composante Est-Ouest)

Figure 7. Power spectral densities (PSD) of stable windows and their averages (East-West component)

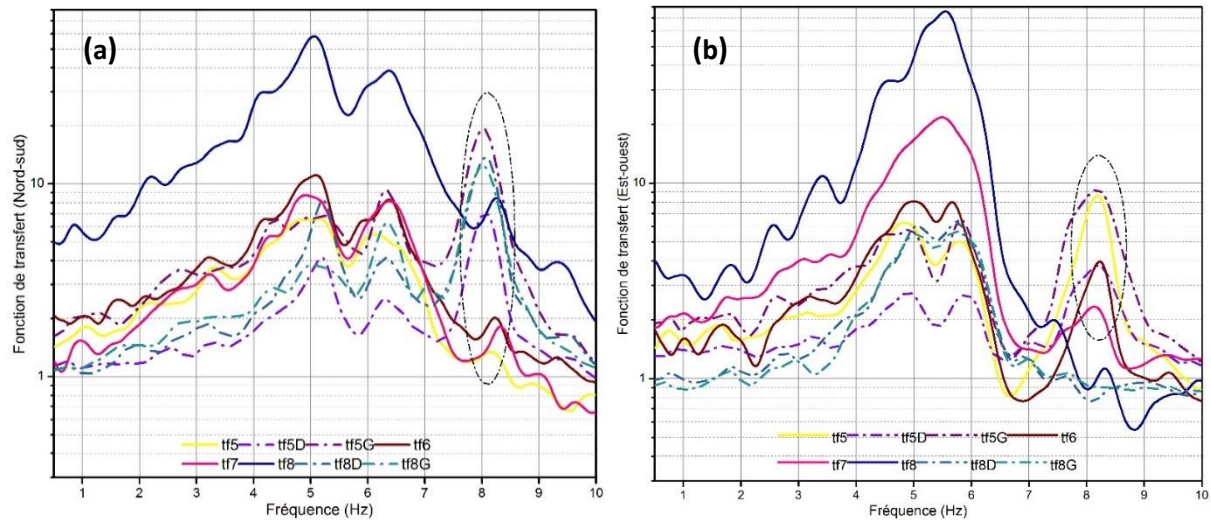


Figure 8. Fonctions de transfert calculées pour les points de mesure de 5 à 8 et les points pt5G, pt5D, pt8G et pt8D, dans les deux directions (a) Nord-Sud (longitudinale) et (b) Est-Ouest (transversale). L'ellipse en trait point-tiret montre une fréquence d'un mode de torsion.

Figure 8. Transfer functions calculated for measurement points 5 to 8 and points pt5G, pt5D, pt8G and pt8D, in both directions (a) North-South (longitudinal) and (b) East-West (transverse). The dashed ellipse shows a frequency of a torsional mode.

Références bibliographiques

- [1] Jones, C., Reynolds and P., Pavic, A., *Vibration serviceability of stadium structures subjected to dynamic crowd loads : A literature review.*, J. Sound Vib. 330, 1531–1566, 2011
- [2] Catbas, F. N., Celik, O., Avci, O., Abdeljaber, O., Gul, M. and Do, N. T., *Sensing and Monitoring for Stadium Structures: A Review of Recent Advances and a Forward Look.*, Front. Built Environ. 3-38, 2017, doi: 10.3389/fbuil.2017.00038
- [3] Jones, C. A., and Reynolds, P., *Finite element modeling and updating of a stadium structure using in-service data*, in Proceedings of the 27th International Modal Analysis Conference (Orlando, FL, USA), 2009.
- [4] McConnell, K. G., *Vibration Testing: Theory and Practice.*, New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1995
- [5] Peeters, B., Van der Auweraer, H., Vanhollenbeke, F., and Guillaume, P., *Operational modal analysis for estimating the dynamic properties of a stadium structure during a football game.*, Shock Vibration. 14, 283–303, 2007, doi:10.1155/2007/531739
- [6] Salyards, K. A. and Noss, N. C., *Experimental evaluation of the influence of human-structure interaction for vibration serviceability.*, J. Perform. Constr. Facil. 28, 458–465. 2014, doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000436
- [7] Sazak, H. O., Catbas, F. N. and Gul, M., *Structural health monitoring and evaluating structural performance of a stadium.*, in Civil Engineering Topics, Vol. 4, Conf. Proc. of the Society for Experimental Mechanics Series, Ed. T. Proulx (New York, NY: Springer New York), 365–372. (2011).
- [8] Setareh, M., *Vibration studies of a cantilevered structure subjected to human activities using a remote monitoring system.*, J. Perform. Constr. Facil. 25, 87–97, 2011, doi:10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000125.
- [9] Shen, Y., Yang, P., Zhang, P., Luo, Y., Mei, Y., Cheng, H. et al., *Development of a multitype wireless sensor network for the large-scale structure of the national stadium in China.*, Int.



J. Distrib. Sens. Networks 9, 1–16, 2013,
doi:10.1155/2013/ 709724.

[10] Jones, C. A., Reynolds, P., Zappa, E., Manzoni, S. and Cigada, A., *Verification of crowd dynamic excitation estimated from image processing techniques.*, in Dynamics of Civil Structures, Vol. 4, Conf. Proc. of the Society for Experimental Mechanics Series, Ed. T. Proulx (New York, NY: Springer), 205–216, 2011.

[11]. Reynolds, P., Pavic, A. and Carr, J., *Experimental Dynamic Analysis of the Kingston Communications Stadium.*, The Structural Engineer, 85(8): p. pp. 33-39, 2007.

[12] Caprioli, A., Castellani, A., Cigada, A. and Vanali, M., *Vibration monitoring of the G. Meazza stadium during concerts and soccer matches.*, Proc., International modal analysis conference, Orlando, FL, USA, 2005.