

ÉVALUATION EXPÉRIMENTALE DU DEGRÉ DE PRÉCISION DANS LA REPRODUCTION DES SIGNAUX SISMIQUES DU SYSTÈME TABLE VIBRANTE DU CGS

EXPERIMENTAL EVALUATION ON THE DEGREE OF ACCURACY IN THE REPRODUCTION OF SEISMIC SIGNALS OF CGS SHAKING TABLE

Réception : 02/03/2022

Acceptation : 22/04/2022

Publication : 08/06/2022

AKNOUCHE¹ Hassan, AIROUCHE¹ Abdelhalim, BENKACI¹ Nassima, BECHTOULA¹ Hakim¹Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 01 rue Kaddour Rahim, BP252, 16040 H-Dey, Algerhaknouche_70@yahoo.fr; airouche@yahoo.fr; nbenkaci@cgs-dz.org; hbechtoula@cgs-dz.org

Résumé- L'objectif de ce travail consiste à valider expérimentalement les courbes de performances uniaxiales et évaluer le degré de précision dans la reproduction des signaux d'entrées en utilisant les techniques de compensation incorporées dans le contrôleur digital de la table vibrante du CGS. Une série d'essais sur table vibrante a été effectuée en utilisant des accélérations harmoniques et sismiques pour quatre cas de chargement : table vide, table avec spécimen 60 tonnes et deux spécimens élastiques de 20 tonnes de masses avec des fréquences fondamentales de 5 Hz et 10 Hz.

Mots - clés : Table vibrante, compensation, contrôle adaptative, amortissement, itération en off line.

Abstract- The objective of this study is to validate the uniaxial sinusoidal performances curves and to assess the accuracy and fidelity in signal reproduction using the advanced adaptive control techniques incorporated into the MTS Digital controller and software of the CGS shaking table. A set of shake table tests using harmonic and earthquake acceleration records as reference/commanded signals were performed for four test configurations: bare table, 60 tons rigid mass and two 20 tons elastic specimens with natural frequencies of 5 Hz and 10 Hz.

Keywords: Shaking table, compensation, adaptive control, damper, off line iteration

1-Introduction

Les tremblements de terre destructifs qui se sont produits dans les villes principales de l'Algérie pendant la période 1981-2003 ont eu comme conséquence une initiative pour la construction d'un simulateur sismique à six degrés de liberté au Centre National de Recherches Appliquées en Génie Parasismique, CGS. Le but de cette installation est de promouvoir la recherche expérimentale en génie parasismique en Algérie et d'apporter des réponses aux phénomènes observés lors de ces séismes.

La table vibrante est le seul moyen permettant de simuler correctement la force d'inertie sur les systèmes de masse répartis dans un laboratoire. Ceci est considéré comme un avantage important mais la capacité du simulateur de reproduire les signaux d'entrées peut être considérée comme un défi principal

pendant un test sur table vibrante. Néanmoins, il est bien connu dans la littérature que, vu la complexité du système table vibrante, la reproduction des excitations sismiques est imparfaite. Le degré de distorsion dans la reproduction des signaux sismiques dépend de différents facteurs. Les plus influents identifiés dans la littérature sont liés à : (1) la configuration et les caractéristiques des boucles d'asservissement (type d'algorithme de commande, signaux de retour, système d'acquisition de données...); (2) paramètres physiques du système (fondation, fréquence de la colonne d'huile, caisson, servo-valves...); (3) caractéristiques physiques et mécaniques du spécimen d'essai (spécimen linéaire ou non-linéaire). Du point de vue commande, le spécimen et la table vibrante doivent être considérés comme un système complet dont la réponse en fréquence changera avec chaque spécimen, Réf. [1]. La dynamique complexe des systèmes table vibrante résulte des

multiples interactions dynamiques linéaires et non-linéaires entre les différentes composantes du système table vibrante (mécanique, hydraulique et électronique) et du spécimen d'essai, Réf. [2].

Dans la littérature, nous trouvons un nombre limité de travaux de recherches se concentrant sur la modélisation des systèmes complets table vibrante et la reproduction des signaux sismiques, Réfs. [2-13].

L'objectif de ce travail consiste en une investigation expérimentale portant sur l'évaluation de la performance du contrôleur de la table vibrante du CGS concernant le degré de précision dans la reproduction des signaux sismiques et par conséquent sa capacité de compensation des distorsions générées par les non linéarités du système table vibrante ainsi que les caractéristiques dynamiques des spécimens à tester. Des tests sur table vibrante seront menés en utilisant quatre cas de chargement : table vide, table avec spécimen rigide de 60 tonnes de masse, deux spécimens d'essais élastiques de 20 tonnes de masse et de fréquence fondamentale égale à 5Hz et 10Hz équipés d'amortisseurs visqueux linéaires.

2- Présentation de la table vibrante du CGS

La table vibrante servo-hydraulique à six degrés de liberté du CGS est opérationnelle sur une bande fréquentielle de 0 à 100 Hz. La plateforme ou le caisson en acier mesure 6.1m x 6.1m et pèse 40 tonnes. Elle peut porter une charge utile maximum de 60 tonnes. La plateforme a une forme de pyramide inversée, avec une hauteur de 2.2m. Elle est raidie intérieurement par des fers plats en acier ayant la forme de nid d'abeilles donnant ainsi à la plateforme une rigidité à la flexion très élevée. Sur la surface de la plateforme, on trouve, pour l'encastrement des spécimens à tester, un total de 169 trous d'ancrages de diamètre 30mm et 20mm espacés respectivement de 25 et 50 cm dans les deux directions, Fig. 1. Le signal d'entrée est appliqué à la structure à l'aide de 12 vérins servo-hydrauliques, quatre vérins verticaux et huit vérins horizontaux. Chaque vérin est commandé par une servo-valve à trois étages MTS256 ayant un plein débit de 1600lpm sur une bande fréquentielle de 0 à 50Hz. La capacité de chacun

des quatre vérins verticaux est de 440kN et 330kN pour chacun des huit vérins horizontaux. Les vérins de la table sont attachés à une fondation en béton armé d'un volume de 2700 m³ et un poids de 6200 tonnes conçu pour réduire à 0.01g les vibrations générées par le mouvement de la table vibrante à 10m du massif de réaction.

Le poids statique du caisson de la table vibrante et du spécimen est soutenu par un support statique composé de quatre appuis pneumatiques de 1400 kN de capacité.

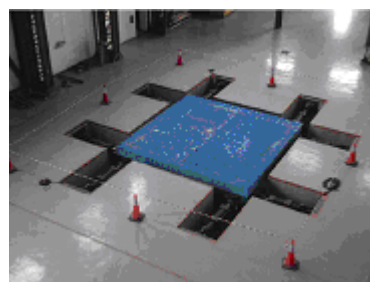


Figure 1 : Table vibrante à six degrés de liberté du CGS

Ces appuis sont attachés au caisson dans sa partie inférieure parallèlement aux vérins verticaux. Ce système permettra une utilisation plus efficace des vérins verticaux pour les charges dynamiques. La course de la table vibrante dans la direction longitudinale est de ± 250 mm, ± 150 mm dans la direction transversale et ± 100 mm dans la direction verticale. La vitesse maximale est de 1.0m/sec dans la direction horizontale et 0.8m/sec dans la direction verticale. L'accélération maximale est de ± 2.5 g et de ± 3.2 g dans les directions horizontales et verticales respectivement. Pour le cas d'un spécimen rigide avec une masse de 60 tonnes, les valeurs de l'accélération sont respectivement 1.0g et 0.8g dans la direction horizontale et verticale respectivement. Le moment de renversement maximum de la table est de 180tm. La centrale hydraulique employée pour mettre en marche le système table vibrante fournit un débit de pointe de 3600lpm à 210 barres. Pour augmenter la capacité d'écoulement du fluide de l'installation, douze accumulateurs pressurisés additionnels de capacité de 45 litres chacun sont utilisés.

Le contrôle numérique en temps réel de la table vibrante est assuré par le logiciel 469D, Réf [14]. Ce dernier fournit une base de

commande à trois variables (déplacement, vitesse et accélération) en boucle fermée et des techniques de contrôle adaptatif avancées. Il fournit aussi une interface graphique permettant l'introduction des signaux de commandes et des gains de régulation pour la mise au point du système table/spécimen. L'architecture du matériel de commande est basée sur la technologie du traitement numérique du signal. Le contrôleur numérique de la table vibrante du CGS MTS 469D fournit les dispositifs suivants : commande par degré de liberté ; commande avec trois variables (déplacement, vitesse et accélération) TVC ; commandes itératives et adaptatives ; stabilisation de la différence de pression et compensation de l'équilibre des forces. Les quatre techniques de commande itératives et adaptatives fournies par le contrôleur sont utilisées pour compenser les sources de non-linéarité du système et améliorer ainsi sa performance. Ces techniques sont : le contrôle de l'amplitude et de la phase (APC), annulation d'harmoniques (AHC), contrôle adaptatif inverse (AIC) et itération en temps réel (OLI), Réf. [11]. Deux de ces techniques adaptatives, notamment APC et AHC, seront utilisées dans l'évaluation des performances du système table vibrante du CGS.

3- Fonction de transfert en boucle ouverte du système servo-valve vérin-plateforme-spécimen

Dans ce paragraphe, on s'intéresse à l'étude de l'interaction table-spécimen par l'analyse de la réponse d'un système viscoélastique à deux degrés de liberté, montré dans la Fig. 2 où x_T et x_s sont les déplacements totaux de la plateforme et de la structure respectivement. Le modèle du système table vibrante-spécimen est caractérisé par la masse de la plateforme m_T , paramètres servo-hydrauliques : rigidité hydraulique K_T et amortissement hydraulique C_T . La structure d'essai est décrite par sa masse m_s , sa rigidité élastique k_s . L'équation de mouvement du système est écrite comme suit :

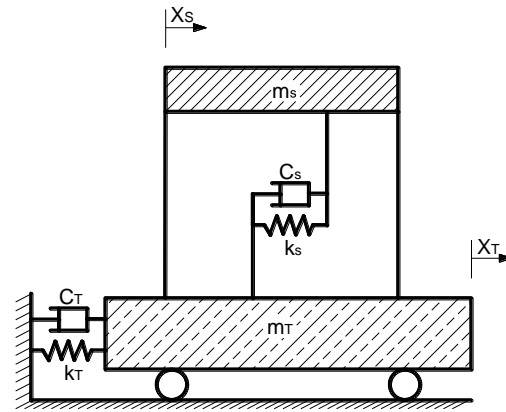
$$m_T \ddot{x}_T + C_s (\dot{x}_T - \dot{x}_s) + K_s (x_T - x_s) = F \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s - C_s (\dot{x}_T - \dot{x}_s) + K_s (x_T - x_s) = 0 \quad (2)$$

$$m_T \ddot{x}_T + C_s \dot{x}_T + K_s x_T = F + C_s \dot{x}_s + K_s x_s \quad (3)$$

$$m_s \ddot{x}_s + C_s \dot{x}_s + K_s x_s = C_s \dot{x}_T + K_s x_T \quad (4)$$

L'objectif est de trouver la fonction de transfert entre l'accélération de la plateforme et la force en utilisant la transformée de Laplace des équations d'équilibres Eq. (3) et Eq. (4).



K_s et son amortissement élastique C_s

Figure 2 : Système à deux degrés de liberté

Le développement des équations d'équilibres donne ce qui suit :

$$\frac{s^2 x_T(s)}{F} = \frac{s^2 + C_s/m_s s + K_s/m_s}{s^2 + (1 + \frac{m_s}{m_T}) \frac{C_s}{m_s} s + (1 + \frac{m_s}{m_T}) \frac{K_s}{m_s}} \cdot \frac{1}{m_T} \quad (5)$$

Nous définissons par :

$$\omega_s^2 = \frac{K_s}{m_s} \quad (6.a)$$

$$2\xi_s \omega_s = \frac{C_s}{m_s} \quad (6.b)$$

$$\omega_T^2 = (1 + \frac{m_s}{m_T}) \frac{K_s}{m_s} \quad (6.c)$$

$$2\xi_T \omega_T = (1 + \frac{m_s}{m_T}) \frac{C_s}{m_s} \quad (6.d)$$

De l'équation (6.c) on obtient la fréquence naturelle de vibration du système vérins - plateforme - spécimen d'essai :

$$\omega_T = \sqrt{\left(1 + \frac{m_s}{m_T}\right)} \omega_s \quad (7)$$

De l'Eq. (6.d), on obtient le coefficient d'amortissement du système vérins - plateforme - spécimen d'essai:

$$\xi_T = \sqrt{\left(1 + \frac{m_s}{m_T}\right)} \xi_s \quad (8)$$

La fonction de transfert $G_s(s)$ entre l'accélération de la plateforme $s^2 x_T$ et la force générée à la base du spécimen $f_s(s) = m_s (x_T + x_s) s^2$ est donnée par l'expression suivante :

$$G_s(s) = \frac{f_s(s)}{s^2 x_T} = m_s \left(1 - \frac{s^2 m_s}{s^2 m_s + s^2 C_s + K_s}\right) \quad (9)$$

Une simulation numérique a été faite en utilisant la fonction de transfert uniaxiale telle que définie par Eq. (9). Le spécimen est supposé avoir un mode de vibration dominant. L'évolution de la fonction de transfert en boucle ouverte G_{XF} entre l'accélération de la plateforme et la force générée par le vérin pour des spécimens ayant une masse de 20 tonnes, un taux d'amortissement $\xi = 5\%$ et des fréquences fondamentales égales à 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz et 20 Hz est représentée dans la Fig. 3.

La Fig. 3 montre des zones de comportement distinctes. Une zone de transition dans laquelle deux pics coexistent. Cette zone est comprise dans l'intervalle de fréquence entre 12 Hz et 17 Hz, ces dernières se rapprochent respectivement à la fréquence de la colonne d'huile obtenue dans les cas d'un spécimen rigide de même masse et à la fréquence de la colonne d'huile dans le cas de la table vide. Pour des spécimens ayant une fréquence fondamentale inférieure aux fréquences de la zone de transition, deux pics apparaissent : le premier pic est localisé autour de la fréquence fondamentale du spécimen alors que le deuxième pic est localisé autour de la fréquence de la colonne d'huile du système combiné. L'amplitude de ces deux pics augmente et diminue respectivement en fonction de l'augmentation de la valeur de la

fréquence de vibration du spécimen. Pour des spécimens ayant une fréquence fondamentale supérieure aux fréquences de la zone de transition, un pic apparaît autour d'une fréquence dont la valeur est inférieure à celle trouvée dans le cas de la table vide.

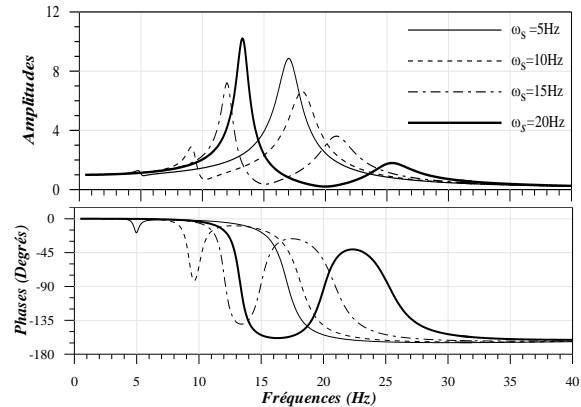


Figure 3 : Variation de la fonction de transfert du système combiné table-spécimen

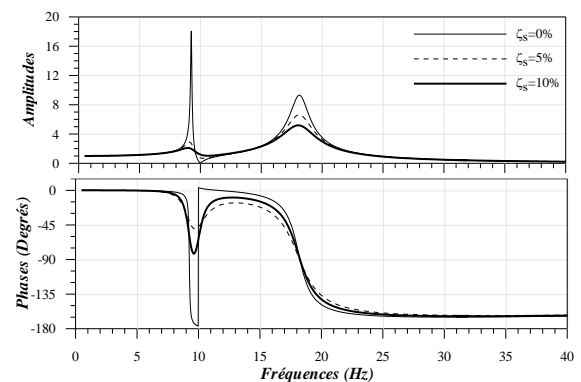


Figure 4 : Variation de la fonction de transfert du système combiné table-spécimen (10 Hz) en fonction du taux d'amortissement

La Fig. 4 représente l'évolution de la fonction de transfert du système combiné pour un spécimen de fréquence fondamentale de 10 Hz et des valeurs du coefficient d'amortissement de $\xi = 0\%$, $\xi = 5\%$ et $\xi = 10\%$. L'examen de cette figure montre l'apparition de deux pics : le premier pic est localisé autour de la fréquence fondamentale du spécimen 10 Hz, alors que le deuxième pic est localisé autour de la fréquence de la colonne d'huile du système combiné. Il ressort aussi de cette figure que la valeur des pics de la fonction de transfert est inversement proportionnelle à la valeur du coefficient d'amortissement du spécimen d'essai. Un coefficient d'amplification de dix (10) est observé entre la réponse non

amortie $\xi = 0\%$ et amortie à 10%. Ainsi la stabilité du système table spécimen est fortement influencée par l'amortissement du spécimen d'essai

4- Conception et dimensionnement des spécimens d'essais

4.1- Spécimen rigide 60 tonnes

C'est une masse de 60 tonnes en béton armé, composée de 12 blocs de dimensions 2.5m x 2.5m x 0.3m de 5 tonnes de masse chacun. Ces dimensions ont été optimisées pour faciliter leurs manutentions et leurs réutilisations dans les spécimens élastiques. Ces masses sont attachées entre eux pour former une seule masse rigide de 60 tonnes de masse et de dimensions 5m x 5m x 0.9m. Ces blocs sont munis de crochets pour les soulever et de trous d'ancrages pour les fixer sur le caisson de la table. Dans le plan horizontal, ces blocs sont attachés entre eux pour former une seule masse par le biais de douze (12) tiges en acier de haute résistance de diamètre M20 et de 6m de longueur. L'encastrement de cette masse au niveau de la plateforme de la table vibrante est réalisé par trente deux (32) tiges de haute résistance de diamètre M30. La valeur de la masse de l'ensemble : spécimen, plateforme et vérins est autour de 110 tonnes, Fig. 5.

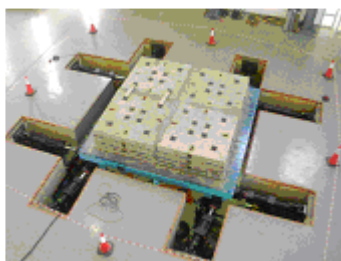


Figure 5 : Spécimen rigide de 60 tonnes

4.2 Spécimens élastiques

Deux spécimens élastiques ont été conçus et réalisés dans le but de procéder à l'évaluation des performances de la table vibrante du CGS. Ces deux spécimens ont été conçus en prenant en considération les amplitudes et les fréquences cibles des excitations des essais de performances et le moment de renversement de la table qui est égale à 180tm. Les deux spécimens élastiques sont des systèmes à un seul degré de liberté réalisés en charpente métallique comme montré

dans les Fig. 6a et la Fig. 6b. Les éléments constituant ces spécimens ont été sélectionnés pour atteindre une fréquence fondamentale de 5Hz (SP-20t-5Hz) pour le premier spécimen et 10Hz pour le deuxième spécimen (SP-20t-10Hz). Ces deux spécimens sont contreventés dans la direction d'excitation par des diagonales sur lesquels des amortisseurs ont été installés et dans la direction perpendiculaire par des diagonales en X pour augmenter leurs rigidités latérales et améliorer leur rigidité à la torsion. En plan, les dimensions de ces spécimens sont 2m x 2.5m avec une hauteur de 2m et 3.5m pour le spécimen dont la fréquence fondamentale est égale à 10Hz et 5Hz respectivement. Les poteaux sont réalisés en profilés HEA280 et les poutres sont en IPE270. Les sections des éléments de contreventement disposés sur les deux côtés des spécimens dans la direction d'excitation sont des UPN160 alors que ceux installés dans la direction latérale en forme de X sont des profilés en UPN 80. Une masse de 20 tonnes composées de quatre (04) blocs de béton armé a été fixée sur les poutres pour former un plancher rigide. Le moment de renversement généré durant les essais ne doit pas dépasser le moment de renversement de la table vibrante. En général le taux d'amortissement pour les structures en charpente métallique est relativement faible. A cet effet, il était nécessaire d'augmenter la valeur de l'amortissement par l'introduction des amortisseurs visqueux linéaires de type ALGA FD100/100 disposés au niveau des deux diagonales pour chaque spécimen.

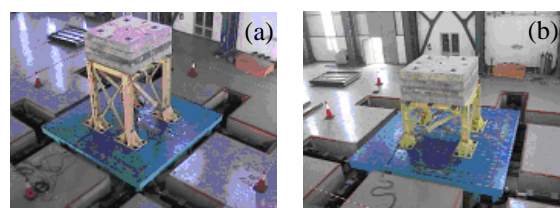


Figure 6 : Spécimens élastiques 5Hz et (b) 10Hz

Le coefficient d'amortissement effectif du spécimen élastique est donné par l'équation suivante :

$$\xi_{eff} = \xi_0 + \frac{TC \cos^2 \theta}{4\pi m} \quad (10)$$

Avec ξ_0 coefficient d'amortissement intrinsèque, T période du spécimen, C constante d'amortissement, m masse du spécimen et θ est l'angle d'inclinaison de l'amortisseur. Les valeurs des taux d'amortissement des deux spécimens élastiques sont de 5.10% et 7.23% pour le spécimen 5Hz et 10Hz respectivement.

5- Critères de performances

Dans le but d'évaluer les performances de la table vibrante du CGS, des critères de performances ont été sélectionnés. Ces critères incluent l'erreur quadratique moyenne (RMS), l'erreur relative quadratique moyenne et la distorsion harmonique (THD).

5.1- Erreur quadratique moyenne (RMS Erreur)

L'accélération temporelle de rétroaction obtenue durant les essais de performances a été comparée à l'accélération des signaux de référence. L'erreur en pourcentage entre ces deux termes est exprimée par l'équation suivante:

$$RMS\ Error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{fbk}(i) - x_{ref}(i))^2} \times 100 \quad (11)$$

Où N dénote le nombre d'échantillons de données sélectionné dans la fenêtre de temps choisie pour calculer l'erreur entre l'accélération de commande x_{ref} et l'accélération de rétroaction x_{fbk} . Pour les signaux sismiques, l'intervalle de temps est défini entre 5 % et 95 % des contributions à l'intégrale du carré de l'accélération de référence dénommée l'intensité d'accélérogramme, Réf [15].

5.2- Erreur quadratique moyenne relative (RRMS Erreur)

L'erreur relative quadratique moyenne est utilisée pour mesurer le cumul d'erreur dans la reproduction des signaux sismiques par table vibrante. Cette erreur est définie comme suit, Réf [15] :

$$RRMS\ Error = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ddot{x}_{fbk}(i) - \ddot{x}_{ref}(i))^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\ddot{x}_{fbk}(i))^2}} \times 100 \quad (12)$$

5.3- Distorsion harmonique totale

Pour des essais sinusoïdaux sur table vibrante, le critère de distorsion harmonique est employé pour mesurer le niveau de distorsion de la réponse du système table vibrante pour des signaux de commandes harmoniques. La distorsion harmonique totale est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$THD = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 + \dots}}{A_1} \times 100 \quad (13)$$

Où A_1 est l'amplitude fondamentale, A_2 est l'amplitude de la deuxième harmonique, A_3 est l'amplitude de la troisième harmonique, etc.

6-Test protocole

Une investigation expérimentale de la performance du système table vibrante du CGS a été effectuée afin de valider, en première étape, les limites de performances uniaxiales dans les trois directions d'excitations : longitudinale, transversale et verticale obtenues sous l'effet des excitations sinusoïdales. Des signaux sinusoïdaux avec plusieurs fréquences variant de 0.1Hz à 50 Hz et différentes valeurs d'amplitudes maximales en termes de déplacement, de vitesse et d'accélération ont été utilisés pour deux cas de chargement : table vide et table avec spécimen 60 tonnes. Les dispositifs de contrôle adaptatifs APC (contrôle de l'amplitude et de la phase) et AHC (élimination des harmoniques) du contrôleur 469D ont été utilisés.

Par ailleurs, une évaluation a été faite concernant le degré de précision dans la reproduction des signaux sismiques et par conséquent la capacité du contrôleur de la table à compenser les distorsions générées par les non linéarités du système table vibrante ainsi que les caractéristiques dynamiques des

spécimens à tester. Quatre (04) cas de chargement ont été utilisés : table vide, table avec spécimen rigide 60 tonnes, table avec spécimen élastique SP-20t-5Hz et table avec spécimen élastique SP-20t-10Hz. Onze (11) capteurs d'accélération (de type Setra 141A de capacité ±8g) ont été utilisés pour collecter la réponse du système combiné table - spécimens à travers la chaîne d'acquisition de données appelée STEX, Réf. [16].

6- Essais sinusoïdaux (limites de performances uniaxiales)

Les courbes de performances uniaxiales sinusoïdales obtenues expérimentalement dans les trois directions d'excitations et pour les deux cas de chargement (table vide et table avec masse de 60 tonnes) ont été comparées aux courbes de performances uniaxiales théoriques et présentées sur la Fig. 4. Il ressort de cette figure une parfaite corrélation entre les courbes de performances théoriques et expérimentales sur toute la bande de fréquence comprise entre 0.1Hz et 50.0Hz dans les trois directions d'excitations et pour les deux cas de chargement : table vide et table avec spécimen 60 tonnes.

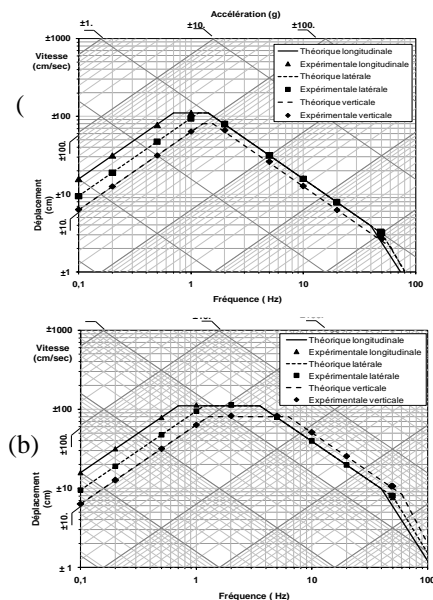


Figure 4 : Performance uniaxiale du système table vibrante (a) table vide, (b) table avec spécimen 60 tonnes

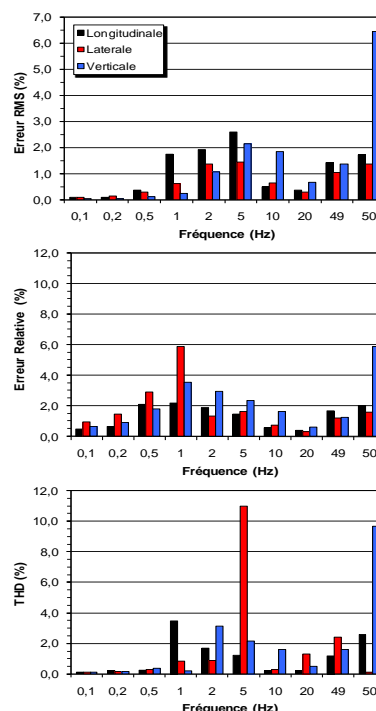


Figure 5 : Comparaison des signaux sinusoïdaux référence-rétroaction dans les trois directions, table vide

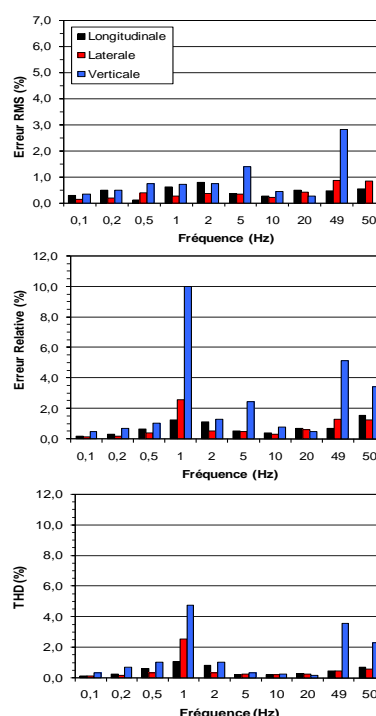


Figure 6 : Comparaison des signaux sinusoïdaux référence-rétroaction dans les trois directions, table avec masse 60 tonnes

Les données obtenues durant les essais de performances ont été utilisées pour calculer les différents critères d'évaluation de performances sélectionnés à savoir : erreur quadratique moyenne (RMS Erreur), erreur relative quadratique moyenne (RRMS Erreur) et la distorsion harmonique totale (THD). Les valeurs de ces critères obtenus pour l'ensemble des fréquences choisies dans les trois directions d'excitations et pour les deux cas de chargement sont présentées dans les Fig. 5 et Fig. 6.

Indépendamment de la fréquence et de l'amplitude d'excitation, l'analyse des résultats présentés dans les figures, montre que les valeurs de la distorsion harmonique THD des signaux de rétroaction obtenues durant ces essais pour les deux cas de chargement sont au maximum égales à 11%. Ces résultats montrent la capacité des deux techniques de compensation utilisées à savoir APC et AHC à améliorer la réponse du système table vibrante.

Lorsque la table est contrôlée en mode accélération, les résultats de l'erreur quadratique moyenne et de l'erreur relative quadratique moyenne (RMS Erreur et RRMS Erreur) obtenus dans la reproduction des signaux harmoniques sont satisfaisants et le plus mauvais résultat est égal à 6.44%. Cette valeur est limitée à 2.9% lorsque la table est contrôlée en mode déplacement.

8- Essais de simulation sismique

Afin d'évaluer la capacité de la table vibrante et estimer le degré de fidélité dans la reproduction des signaux sismique, des essais de simulation sismiques ont été également effectués pour les conditions de charges suivantes : table vide, table avec une masse 60 tonnes, table avec deux spécimens élastiques (SP-20t-5Hz et SP-20t-10Hz). La technique de compensation itérative du signal de référence est utilisée. A cet effet, un modèle de mesure représentant la matrice des fonctions de transfert du système table spécimen qui représente l'interaction entre les degrés de liberté actifs a été estimé. Les termes de la diagonale de cette matrice représentent l'interaction principale entre les degrés de liberté actifs et les termes extra-diagonaux

représentent le cross couplage entre ces mêmes degrés de liberté. Dans le but d'éliminer la dynamique du système, la matrice de transfert est inversée mathématiquement et multipliée par les signaux de références. Les signaux obtenus sont conduits par la table vibrante et les réponses obtenues sont comparées aux signaux de références. Des pourcentages d'erreurs entre les signaux de rétroaction et de références sont calculés pour les degrés de libertés actifs. Une fraction des pourcentages d'erreurs est additionnée aux signaux conduits pour être appliquée dans l'itération qui suit. Ce processus est répété jusqu'à ce que le niveau d'exigence entre les signaux de références et de rétroactions soit atteint.

L'estimation du modèle du système table vibrante a été faite pour les quatre cas de chargement. Un signal de type bruit blanc défini sur une bande fréquentielle comprise entre 0Hz et 50Hz avec un pic d'accélération de 0.5g et une durée de 300 secondes a été appliqué indépendamment dans les degrés de liberté actifs de translations et de rotations. Le niveau d'accélération du signal d'excitation doit être assez faible pour empêcher la création de dommages au niveau du spécimen d'essai mais suffisamment grand pour produire une réaction acceptable du système. Le modèle de mesure ainsi obtenu dépend du niveau de bruit, du niveau d'amplitude du signal d'excitation et de la non-linéarité du système.

Pour évaluer le degré de fidélité du système table vibrante du CGS à reproduire les signaux sismiques, une comparaison entre les accélérations temporelles de références et de rétroactions a été effectuée. Cette évaluation a été faite en utilisant les signaux accélérométriques de la station d'El Centro enregistrés lors du séisme d'Imperial Valley de 1940. Ces enregistrements ont été simultanément utilisés dans le cas de la table vide. Pour le cas du spécimen 60 tonnes, un facteur de réduction de 50% sur les amplitudes des signaux a été introduit. Suite aux excitations sismiques, les réponses du système table vibrante obtenues à la première et à la dernière itération sont présentées dans les Fig. 7a et Fig. 7b pour deux cas de chargement, dans la direction longitudinale. La Fig. 7a correspond au cas de la table vide, alors que la Fig. 7b présente le cas du spécimen 60 tonnes. L'évolution temporelle des signaux de

références et de réponses illustrées dans ces figures montre une très bonne corrélation entre ces signaux.

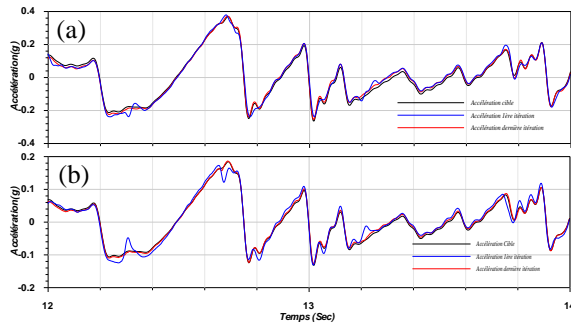


Figure 7 : Accélération temporelle du système table vibrante, (a) table vide, (b) table avec spécimen de 60tonnes

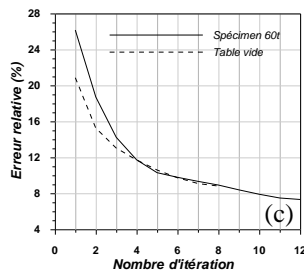
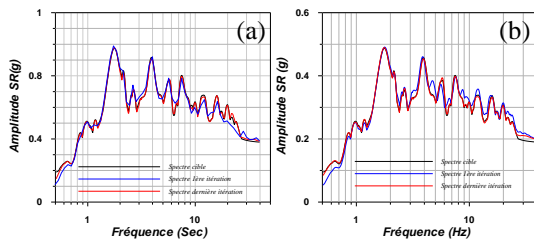


Figure 8 : Essai sismique de la table avec spécimens, spectre de réponse $\xi = 5\%$ (a) Sp-20t-5Hz, (b) Sp-20t-10Hz, (c) erreur relative en fonction du nombre d'itération.

Une autre mesure d'évaluation de la performance du système table vibrante consiste à comparer les spectres de réponses à partir des signaux de références et de rétroactions. Ces spectres sont calculés dans la direction longitudinale pour un coefficient d'amortissement de 5%. La Fig. 8a et Fig. 8b présentent les spectres de réponses de références et de rétroactions (première et dernière itération) obtenues pour deux cas de chargement : table vide et table avec spécimen 60 tonnes. L'examen de ces figures, montre une corrélation acceptable entre ces spectres, ce qui démontre la capacité du système de contrôle de

la table vibrante du CGS à reproduire des signaux sismiques en multiaxes.

L'évolution de l'erreur relative en fonction du nombre d'itération dans la direction longitudinale pour les deux cas de chargement (table vide et table avec spécimen 60 tonnes) est présentée sur la Fig. 8c sur laquelle on voit que la valeur d'erreur entre la référence et la réponse du système diminue en fonction du nombre d'itération.

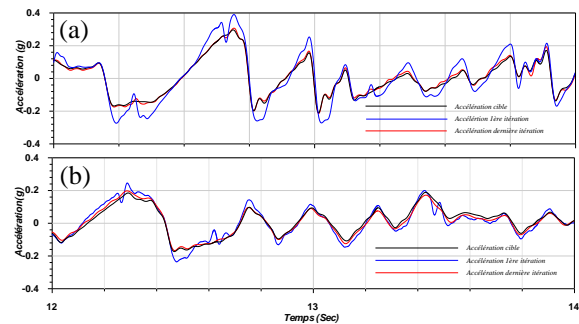


Figure 9 : Accélération temporelle, (a) Spécimen sp-20t-5Hz, (b) Spécimen sp-20t-10Hz

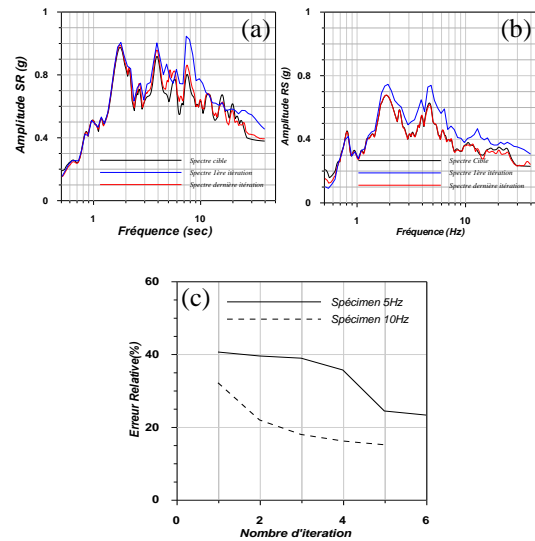


Figure 10 : Essai sismique de la table avec spécimens, spectre de réponse (a) Sp-20t-5Hz, (b) Sp-20t-10Hz, (c) erreur relative en fonction du nombre d'itération

Dans le cas de la table vide, l'erreur relative au début de la procédure itérative était de 21% et 8% à la huitième itération. La même tendance de variation que celle de la table vide a été constatée pour le cas de la table avec spécimen de 60 tonnes. La valeur de l'erreur

relative était de 26% à la première itération et 8% à la douzième itération. Ainsi, le risque d'endommagement du spécimen d'essai durant ce processus itératif est également élevé.

Pour les deux spécimens élastiques sp-20t-5Hz et sp-20t-10Hz, une comparaison entre le signal de référence et celui de la réponse du système table spécimen sous l'effet du séisme d'El-Centro, obtenus durant la première et la dernière itération, est présentée sur une fenêtre temporelle de deux secondes dans les Fig. 9a et Fig. 9b respectivement. La Fig. 9a est relative au cas du spécimen sp-20t-10Hz, dans laquelle la composante E-W de la station d'El-Centro a été utilisée. La Fig. 9b correspond au cas du spécimen sp-20t-5Hz sous l'effet de la composante N-S de la station d'El-Centro. Les Fig. 10a et Fig. 10b présentent les spectres de réponses de références et de rétroactions (intervalle de fréquence entre 0-50Hz et coefficient d'amortissement 5%) obtenus dans le cas des deux spécimens sp-20t-10Hz et sp-20t-5Hz en utilisant respectivement les mêmes composantes accélérométriques citées plus haut. L'examen de ces figures montre une corrélation acceptable obtenue entre les variables de références et de rétroactions.

Pour les deux spécimens élastiques, l'erreur en pourcentage entre les signaux de références et de rétroactions en termes d'erreur relative en fonction du nombre d'itération est présentée respectivement pour les deux spécimens sur la Fig. 10c. Il peut être vu, à partir de la figure 10c, que pour le cas du spécimen sp-20t-10Hz que l'erreur relative à la première itération était de 31%. Cette valeur est diminuée pour atteindre 16% à la cinquième itération. La même tendance de variation a été constatée pour le spécimen sp-20t-5Hz où l'erreur relative était de 40% à la première itération pour passer à 22% à la sixième itération.

A l'issue des ces résultats, on constate que la précision dans la reproduction des mouvements sismiques par table vibrante est due principalement aux méthodes de compensation permettant de surmonter les effets de l'interaction dynamique entre la table et le spécimen. En fait, quand aucune technique de compensation et de correction n'est employée, l'erreur relative entre le signal de référence et de rétroaction est très élevée, ceci

malgré l'opération d'ajustement des différents paramètres de contrôle. Ainsi, des corrections additionnelles sont exigées pour mieux contrôler le système table-spécimen. Il est à noter que les erreurs relatives obtenues pour les deux spécimens élastiques (sp-20t-10Hz et sp-20t-5Hz) sont plus grandes que celles obtenues pour la table vide et la table avec spécimen rigide de 60 tonnes. Ceci donne une indication très claire concernant l'effet de l'interaction dynamique entre la table et le spécimen.

9- Conclusions

Une investigation expérimentale de la performance du système table vibrante du CGS a été effectuée afin de valider, d'une part les limites de performances du système table vibrante du CGS dans les trois directions de translations sous l'effet des excitations sinusoïdales. D'autre part, une évaluation a été faite concernant le degré de précision dans la reproduction des signaux sismiques et par conséquent la capacité du contrôleur de la table à compenser les distorsions générées par les non linéarités du système table vibrante ainsi que les effets de l'interaction table-spécimen.

Afin de procéder à l'évaluation expérimentale des performances de la table vibrante du CGS, des critères d'évaluation de l'erreur entre le signal de référence et de rétroaction ont été sélectionnés et utilisés ainsi que le dimensionnement et la réalisation de trois spécimens d'essais pour simuler les conditions de charges de la table vibrante. Un spécimen rigide de 60 tonnes de masse et deux spécimens élastiques de 20 tonnes de masse et de fréquences fondamentales égales à 5Hz et 10 Hz. Vu le niveau d'excitation important auquel ces spécimens seront soumis, il était nécessaire d'augmenter la valeur de l'amortissement par l'introduction des amortisseurs visqueux linéaires disposés au niveau de la diagonal des deux faces des spécimens élastiques. Les essais sinusoïdaux effectués pour les deux cas de chargement table vide et table avec spécimen 60 tonnes, nous ont permis d'observer une parfaite corrélation entre les courbes de performances théoriques et expérimentales sur toute la bande fréquentielle d'intérêt dans les trois directions de translation. Les données obtenues durant les essais de performances ont été utilisées pour calculer les différents critères d'évaluation des performances sélectionnées.

Les essais sismiques effectués pour les quatre cas de chargement nous ont permis de constater que la précision dans la reproduction des mouvements sismiques par table vibrante est due principalement aux méthodes de compensation permettant de surmonter les effets de l'interaction dynamique entre la table et le spécimen. En fait, malgré l'opération d'ajustement des paramètres de contrôle durant l'opération de mise au point, l'erreur relative entre le signal de référence et de rétroaction était très élevée. Ces résultats montrent clairement que pour atteindre un taux de fidélité élevé dans la reproduction des signaux sismiques par table vibrante, un nombre important d'itération est nécessaire. A cet effet, le risque d'endommagement du spécimen d'essai durant ce processus itératif est très élevé.

Références bibliographiques

- [1] Adam, C., *Standardisation of shaking tables*, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lisboa-Portugal, 1997.
- [2] Ozelik, O., Luco J., Conte, J., Trombetti, T., and Restepo, L., *Experimental Characterization, Modeling and Identification of the NEES-UCSD Shake Table and Mechanical System*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2008a, 37(2), 243-264.
- [3] Rinawi, A. M. and Clough R.W., *Shaking Table-Structure Interaction*, Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, CA, 1991, EERC Report No. 91/13.
- [4] Clark, A., *Dynamic Characteristics of Large Multiple Degree of Freedom Shaking Tables*, Proceedings of 10th World Conf. on Earthquake Engineering, Madrid, July 1992, Spain,
- [5] Matthew, J. M., *Analysis Design and Construction of a Shaking Table Facility*, Ph.D. Thesis, Rice University, Huston, Texas, 1997.
- [6] Conte, J. P., and Trombetti, T. L., *Linear Dynamic Modelling of a Uni-Axial Servo-Hydraulic Shaking Table System*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2000, 29, 1375-1404.
- [7] Thoen, B. K. and Laplace P. N., *Offline Tuning of Shaking Tables*, Proceedings of 13th World Conf on Earthquake Engineering, 2004, Vancouver, B.C., Canada, August.
- [8] Ozelik, O., Luco, J. E. and Conte, J. P., *Identification of the mechanical subsystem of the NEES-UCSD shake table by a least-squares approach*, J. Eng. Mech., ASCE, 2008b, 134(1), 23-34.
- [9] Gu, Q. and Ozelik, O., *Integrating Openses with Other Software - With Application to Coupling Problems in Civil Engineering*, Structural Engineering Mechanics, 2011, 40(1), 85-103. 2011.
- [10] Ceresa, P., Brezzi, F., Calvi, G. M., and Pinho, R., *Analytical Modelling of a Large-Scale Dynamic Testing Facility*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41(2), 255-277.
- [11] Pei-Ching, C., Chin-Ta, L., Keh-Chyuan, T., *A control framework for uniaxial shaking tables considering tracking performance and system robustness*, Structural Control Health M
- [12] Ryu, K. P. and Reinhorn, A. M., *Real-time control of shake tables for nonlinear hysteretic systems*, Structural Control and Health Monitoring, Vol. 24, Issue 11, 2017.
- [13] Wei, G., Zhipeng, Z., Zhiwu, Y., and Yan, L. *Facility Performance Indexes and Rapid Test Feasibility Evaluation Method of Shaking Tables*, KSCE Journal of Civil Engineering (2019) 23(7):3097-3112.
- [14] Thoen, B. K., *469D Seismic Digital Control Software*, MTS Systems Corporation, 2004.
- [15] Luco, J. E., Ozelik, O. and Conte, J. P., *Acceleration Tracking Performance of the UCSD-NEES Shake Table*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 2010, 136(5), 481-490.
- [16] MTS Systems Corporation, *STEX- Seismic Test Execution Software*, 1991.