

PERFORMANCE D'UNE TABLE VIBRANTE MONO-AXIALE

Par

N. BOURAHLA

PhD, Enseignant à l'Institut de Génie Civil, Université de Blida

H. BOUHRAOUA et Y. BENGHALIA

Etudiants en Post-Graduation, Centre Universitaire de Chlef

Résumé

La table vibrante, ou simulateur de séismes, est l'un des moyens les plus utilisés dans les essais dynamiques en général et particulièrement dans la recherche expérimentale appliquée au génie sismique.

L'objectif de cet article est de présenter la procédure et le principe des tests sur tables vibrantes, à travers une récente opération de mise en marche de la table vibrante monoaxiale installée au laboratoire de dynamique des structures au Centre Universitaire de Chlef.

Les principales composantes du système de vibration sont décrites succinctement et la capacité de la table vibrante est exprimée en termes de ses paramètres spécifiques et la courbe caractéristique balayant la plage de fréquences utiles est déterminée expérimentalement.

Le système de vibration à son état initial présente des restrictions diverses surtout pour le contrôle et la simulation des signaux aléatoires et sismiques.

Pour surmonter ces problèmes, des projets de recherches visant l'amélioration et le développement de la table vibrante sont brièvement exposés à la fin de cet article.

Mots clés : séisme - génie sismique - essai dynamique - table vibrante.

1 INTRODUCTION

La recherche expérimentale conduisant à l'observation et la mesure de la performance des structures sujettes à des excitations sismiques, est une nécessité fondamentale pour le progrès de la conception parasismique.

Généralement les méthodes et les procédures analytiques peuvent être adoptées plus ou moins facilement, les résultats expérimentaux par contre doivent être employés avec précaution, car généralement ils simulent des conditions spécifiques qui ne sont pas nécessairement les mêmes partout.

Parmi les différentes méthodes d'essai dans ce domaine, les tables vibrantes ou simulateurs de séismes constituent un axe principal des tests dynamiques des structures. Un nombre important de tables vibrantes servo-hydrauliques ont été construites un peu partout dans le monde durant ces deux dernières décennies. Ces tables vibrantes ayant des capacités variées allant du simple système de vibration 1 m x 1 m jusqu'aux tables de 15m x 15m pouvant supporter des spécimens de plusieurs centaines de tonnes et capables de reproduire des excitations selon plusieurs degrés de liberté. Leur champ d'application est vaste mais limité par des contraintes technologiques caractérisant la capacité de la table vibrante. La majorité de ces tables vibrantes est destinée aux tests des modèles à échelle réduite et peu ont la capacité de tester des petites structures à échelle réelle. Les objectifs des tests sur tables vibrantes sont nombreux, généralement les résultats expérimentaux issus des essais sur tables vibrantes servent à :

- ✓ vérifier et valider les modèles analytiques et les méthodes de conception,
- ✓ étudier le comportement non linéaire des structures,
- ✓ examiner la réponse dynamique des systèmes complexes présentant des difficultés d'analyse,
- ✓ effectuer des tests de qualification des équipements et des composantes.

Cet article décrit sommairement les principales composantes du système de vibration du laboratoire de

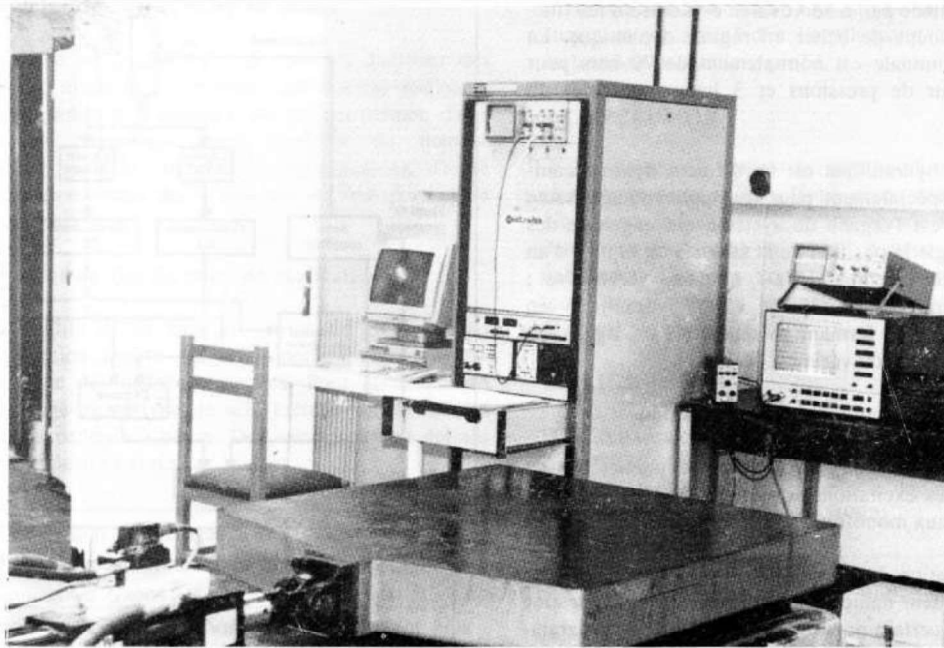


Figure 1 : Vue globale du système de vibration.

dynamique des structures situé au centre universitaire de Chlef et présente la courbe caractéristique représentative de la performance réelle de la table vibrante résultant des premiers essais préliminaires.

2 CARACTERISTIQUES GENERALES DE LA TABLE VIBRANTE

La photo de la figure 1 montre la plate-forme, le système de contrôle et d'acquisition de la table vibrante.

L'ensemble du système de vibration est schématisé sur la figure 2 et ses différentes composantes sont décrites ci-après.

2.1 Le Système mécanique

La partie mécanique de la table vibrante est constituée essentiellement des deux supports suivants :

- ♦ **La plate-forme** : Le format de la plate-forme est de 1 m x 1 m, construite en une masse d'acier de près d'une tonne, très rigide. Pour faciliter le montage du spécimen, elle est trouée régulièrement sur toute sa surface. Elle est liée à la masse de réaction par un vérin hydraulique et un système de guidage qui facilite le glissement de la plate-forme dans la seule direction horizontale.
- ♦ **Le bloc sismique (masse de réaction)** : C'est un bloc en acier de masse très supérieure à celle de la plate-forme, il est positionné sur quatre isolateurs pneumatiques de vibrations.

2.2 Le système hydraulique

Il est constitué d'une centrale hydraulique qui débite le fluide hydraulique sous pression pour le système. La pression de refoulement est généralement réglée à 210 bars et le débit de sortie maximal est de 19.6 l/mn.

Deux accumulateurs de charge sont installés entre la centrale hydraulique et le vérin. Ils fournissent l'énergie

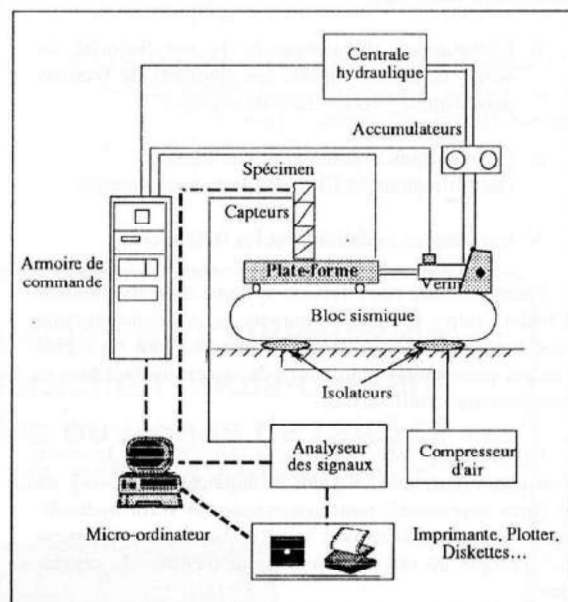


Figure 2 : Schéma descriptif du système de vibration.

crête consommée par la servovalve et réduisent les fluctuations et coups de bélier en régime dynamique. La précharge nominale est normalement de 70 bars pour l'accumulateur de pressions et 3 bars pour celui du retour.

Le vérin hydraulique est un élément hydromécanique, conçu spécialement pour les applications à haute fréquence, c'est l'organe du système qui engendre des efforts ou règle la position de la table. Il est équipé d'un capteur de déplacement LVDT et d'une servovalve ; cette dernière commande le vérin hydraulique en s'ouvrant ou en se fermant en réponse à un signal. La capacité maximale du vérin est de 25 kN.

2.3 Le système de contrôle et d'acquisition

Le système de contrôle de base ne permet pas de reproduire des excitations sismiques, il ne peut fournir que des signaux monofréquentiels.

La génération des fonctions est principalement faite par le générateur numérique des fonctions, il est destiné à fournir un certain nombre de possibilités de programmation dynamique des systèmes. Les tensions de sortie commutables comportent le sinus normal, le sinus polarisé (haversine), le carré polarisé et les rampes simples. La fréquence des tensions sinus et carré est réglable de 0 à 990 Hz. Les rampes sont réglables de 10 à 990 secondes. Il faut noter cependant que la fourchette de fréquences utiles de la table vibrante varie de 0.1 à 100 Hz.

L'entrée de référence au système de contrôle représente la force d'excitation désirée qui va être appliquée, par la suite, à l'objet testé. En l'absence d'un minimum de contrôle, la force atteignant l'objet testé peut être modifiée, à cause de :

- 1/ L'interaction dynamique et la non-linéarité du vérin, la table vibrante, les éléments de fixation plate-forme - vérin - bloc de réaction.
- 2/ L'erreur dans le générateur des signaux, l'amplificateur, le filtre et autres équipements.
- 3/ Les charges extérieures et les frottements.

Pour diminuer ces effets un système d'asservissement (Closed Loop - Figure 3) compare le signal de réaction avec le signal de commande, en développant un signal d'erreur provoquant l'ouverture de la servovalve dans la direction qui réduit l'erreur.

Un sélecteur d'asservissement sert à choisir la sortie d'un convertisseur du signal de déplacement LVDT ou de force (optionnel) pour commander le vérin hydraulique. Le signal choisi avec le sélecteur d'asservissement est appliqué au circuit comparateur d'entrée du régulateur.

Un système Interlock est associé à des détecteurs des conditions anormales, il stoppe l'application de la pres-

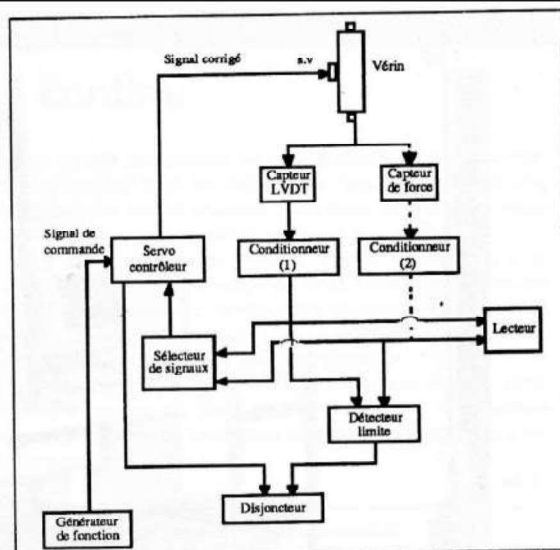


Figure 3 : Diagramme de l'unité de contrôle de base.

sion hydraulique à la servovalve quand une condition anormale est détectée, avec indication lumineuse au niveau de l'unité de contrôle de la pression.

Quand le système est mis en marche, la centrale applique une pression de 3 000 psi (210 bars), la pression aux accumulateurs pouvant être haute ou basse suivant le choix de l'opérateur.

Le système d'acquisition

Le système d'acquisition et de traitement des signaux est considéré comme l'indice de performance d'un laboratoire, car il se développe en fonction de travaux de recherches effectués. La chaîne de mesure de vibrations de base est du type Bruel & Kjaer et est constituée de :

- deux accéléromètres piézo-électriques type 4371,
- deux préamplificateurs de charges 2635 équipés d'un réseau de conditionnement et de précision, d'un réseau d'intégration et de filtres passe-haut et passe-bas,
- deux câbles de branchement,
- un analyseur de signaux mono-voie type 2033 fonctionnant en algorithme de FFT (transformation de Fourier rapide). Il est doté d'une mémoire de 10 K (K=1 024 échantillons) pouvant être utilisée suivant plusieurs modes de fonctionnement.

3 PERFORMANCE DU SYSTEME DE VIBRATION

La performance de la table vibrante est déterminée par mesure de la limite de ses caractéristiques (l'accélération max, la vitesse max, le déplacement max) dans la gamme de fréquences utiles. La relation entre l'accélération, la vitesse et le déplacement peut être dérivée en employant l'équation du mouvement harmonique du système à un seul degré de liberté :

$$X(t) = D \sin 2\pi f t \quad (1)$$

$$V(t) = 2\pi f D \cos 2\pi f t \quad (2)$$

$$A(t) = -4\pi^2 f^2 D \sin 2\pi f t \quad (3)$$

avec

$X(t)$: équation temporelle du déplacement

$V(t)$: équation temporelle de la vitesse

$A(t)$: équation temporelle de l'accélération

f : fréquence de vibration

D : amplitude de vibration

En terme de valeurs maximales :

$$V_{\max} = 2\pi f D_{\max} \quad (4)$$

$$A_{\max} = 4\pi^2 f^2 D_{\max} \quad (5)$$

L'accélération maximale $A_{\max}$, la vitesse maximale $V_{\max}$ et le déplacement maximal $D_{\max}$ ne peuvent pas être atteints sur toute la gamme de fréquences utiles. En utilisant les équations (4) et (5), on peut déterminer les régions de déplacement max, de vitesse max et d'accélération max, sur la gamme de fréquences allant de 0 à $f_{\max}$ dans l'ordre indiqué.

La première limite f_1 est définie par :

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \times \frac{V_{\max}}{D_{\max}} \quad (6)$$

Dans cette gamme :

$$D = D_{\max} = \text{constante}$$

$$V = 2\pi f D_{\max} \quad (7)$$

(variation linéaire en fonction de la fréquence)

$$A = 4\pi^2 f^2 D_{\max} \quad (8)$$

(variation quadratique en fonction de la fréquence)

La gamme intermédiaire limitée par f_1 et f_2 est définie par :

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \times \frac{A_{\max}}{V_{\max}} \quad (9)$$

Ainsi $V = V_{\max}$

$$D = \frac{V_{\max}}{2\pi f} \quad (10)$$

$$A = 2\pi f V_{\max} \quad (11)$$

Pour des fréquences supérieures à f_2 , l'accélération atteint son maximum $A = A_{\max}$ pour les valeurs de vitesse et déplacement suivantes :

$$V = \frac{A_{\max}}{2\pi f} \quad (12)$$

$$D = \frac{A_{\max}}{4\pi^2 f^2} \quad (13)$$

Une première tentative pour déterminer la courbe de performance de la table vibrante a été faite avec beaucoup de soins, sachant que la procédure nécessite une très forte sollicitation du système de vibration pour atteindre effectivement ses limites. Ainsi dans cette phase les repères sur la fourchette de fréquences utiles de manière à localiser approximativement les trois gammes de fréquences avec un minimum de points.

Le déplacement maximal de la plate-forme égal à la course dynamique du vérin (± 75 mm) a été atteint expérimentalement dans les fréquences basses de 0.1 Hz jusqu'à 0.5 Hz approximativement. En augmentant la fréquence, l'amplitude maximale de vibration commence à diminuer alors que la vitesse atteint sa moyenne maximale de 250 mm/s sur une plage de fréquences allant de 0.5 à 35 Hz. Pour des fréquences supérieures à 35 Hz on remarque que l'accélération atteint un certain seuil stable de 7.5 g et dépasse cette valeur pour atteindre 10.2 g au voisinage de 50 Hz. L'accélération commence à diminuer sensiblement pour des fréquences supérieures à 70 Hz. Il est à rappeler que ces limites sont approximatives car on a limité le gain d'entrée par simple déclenchement de bruits singuliers ou une baisse de pression importante sans qu'il y est d'arrêt d'interlock.

La courbe de performance de la table vibrante est alors idéalisée par les équations (8) et (11) en injectant les valeurs des limites déterminées expérimentalement. La variation de l'accélération en fonction de la fréquence à échelle logarithmique est représentée sur la figure 4 où on identifie les intervalles de déplacement, de vitesse et d'accélération constante, pour des fréquences basses, intermédiaires et hautes, respectivement.

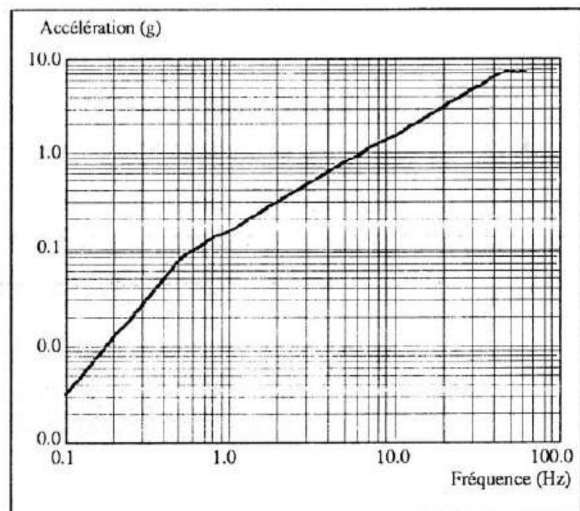


Figure 4 : Courbe de performance de la table vibrante.

4 PROJETS DE DEVELOPPEMENT DU SYSTEME DE VIBRATION

Deux axes de travaux de recherches sont en cours dans cette phase de démarrage, le premier se fixe comme objectifs :

- 1- L'étude expérimentale et analytique du système de vibration dans le but de déterminer les caractéristiques réelles et la capacité de la table vibrante.
- 2- Le développement d'un système de contrôle qui permet la simulation des signaux sismiques.
- 3- L'établissement des liens de communication entre les différentes composantes du système d'acquisition pour le transfert des données.
- 4- La mise en place d'un outil de traitement des résultats expérimentaux.

Le deuxième axe s'intéresse à l'établissement d'une procédure pour les tests de qualification et au développement d'une méthode pouvant permettre d'étendre le champ d'application de ces tests au-delà de la capacité nominale de la table vibrante, par introduction d'intermédiaire physique jouant le rôle d'amplificateur pour pouvoir couvrir le spectre de réponse demandé quand ce dernier dépasse les limites de performance de la table vibrante.

5 CONCLUSION

La table vibrante est considérée comme un des moyens les plus efficaces pour l'investigation dynamique et sismique des structures et systèmes. En équipement de base le système de vibration du laboratoire des essais dynamiques du centre universitaire de Chlef per-

met d'effectuer des excitations horizontales monofréquentielles sur une plage de fréquences utiles couvrant un champ d'application assez large. La courbe de performance préliminaire caractérisée par les limites de vitesse et d'accélération déterminées expérimentalement est approximative ; elle sera examinée plus profondément au cours des essais d'identification futurs. Finalement, l'utilisation, le développement et la maintenance nécessitent une compétence pluridisciplinaire et une activité de recherche continue qui perfectionne le système d'acquisition et de traitement des résultats et accroît avec le temps le cumul des capteurs et des appareils associés aux différents types de mesures des paramètres structurels ①

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Aristizabal-Ochoa, A.J Clark : "Large scale earthquake simulation tables". Proc. of the 7 WCEE. Turkey Istanbul 1980, vol 5 p157-164.
- [2] N. Bourahla : "Experimental research in earthquake engineering". Rapport CGS, Fév. 1993.
- [3] N. Bourahla, A. Blakeborough : "Shaking table testing of torsionally coupled knee braced frames". To be published in the 5 US National Conference on Earthquake Engineering, Chicago, July 1994.
- [4] J.M Brownjohn "The SERC six axis earthquake simulator". Technical Instruction, EERC-BU 90, Bristol, UK.
- [5] C.Molinoero, AL : "Multi-channel control and acquisition system : general problems and presentation".
- [6] User's manual : control unit model 436.11c.
- [7] User's manual : controller model 406.11.



**Organisateurs de rencontres scientifiques et techniques
intéressant les domaines de la construction**

**ANNONCEZ DIRECTEMENT VOS MANIFESTATIONS
À VOTRE PUBLIC EN CHOISSANT**



Algérie EQUIPEMENT

"La Revue" Algérienne de Génie Civil et des TP