

SEISMIC STUDY OF HTGR CORE

P. BULAND

METRAVIB, F- 69130 Ecully, France

C. BERRIAUD, E. CEBE, M. LIVOLANT

*Service des Études Mécaniques et Thermiques,
CEA-Centre d'Études Nucléaires de Saclay, F-91190 Gif-sur-Yvette, France*

SUMMARY

This paper presents the experimental results obtained at Saclay on a HTGR core model and comparisons with analytical results. Two series of horizontal tests have been performed on the shaking table VESUVE: sinusoidal test and time history response.

Acceleration of graphite blocks, forces on the boundaries, relative displacement of the core and PCRV model, impact velocity of the blocks on the boundaries were recorded.

Sinusoidal tests consisted of frequency sweeps at constant displacement level and sine dwells at constant g-level.

These tests have shown the strongly non-linear dynamic behaviour of the core. The resonant frequency of the core is dependent on the level of the excitation. These phenomena have been explained by a computer code, which is a lumped mass non-linear model.

Good correlation between experimental and analytical results was obtained for impact velocities and forces on the boundaries. This comparison has shown that the damping of the core is a critical parameter for the estimation of forces and velocities.

El Centro time history displacement at the level of PCRV was reproduced on the shaking table. The analytical model was applied to this excitation and good comparison was obtained for forces and velocities.

1- Introduction

L'implantation des réacteurs à haute température (HTGR) dans des régions sujettes à des tremblements de terre, conduit pour des raisons de sûreté à s'intéresser à la réponse du coeur en cas de séisme.

Celui-ci est formé d'un empilement de briques de section hexagonale, entouré par une structure en béton précontraint appelée PCRIV.

Le dynamique de cet empilement est un phénomène complexe qui résulte du choc des briques entre elles et du choc des briques périphériques contre les butées placées sur le PCRIV. Afin d'étudier la réponse de cet empilement, un programme expérimental a été mené à bien au SEMT (CEA-Saclay) sur une maquette représentative d'un coeur HTGR. Cette maquette a été placée sur la table vibrante VESUVE où elle a été soumise à des excitations sinusoïdales et à des reproductions de séismes.

Les résultats expérimentaux obtenus ont été interprétés à l'aide d'un modèle de calcul non linéaire. Les bonnes corrélations obtenues prouvent la validité du modèle pour la maquette analysée au SEMT et sont encourageantes pour une transposition de ce modèle au réacteur en vraie grandeur.

2- Description de la maquette

La maquette utilisée à Saclay n'est pas réellement représentative d'un coeur de réacteur HTGR.

L'empilement de graphite est constitué de 85 colonnes comprenant chacune 10 briques (fig.1). Ces blocs de graphite sont approximativement à l'échelle 1/4 en ce qui concerne leurs dimensions extérieures, mais la géométrie et le nombre des trous intérieurs ne sont pas respectés.

Pour empêcher les mouvements latéraux des blocs l'un sur l'autre, trois pions de centrage sont placés sur la face supérieure des briques. La cohésion de l'empilement est également assurée par le clavetage total du premier lit et celui partiel, par groupes de sept briques, du lit supérieur. Les colonnes périphériques sont liées entre elles par des plaques métalliques et par groupes de cinq pour simuler les blocs réflecteurs. L'ensemble de l'empilement est placé sur une plaque, elle-même posée sur un lit de billes. Cette disposition simule la raideur latérale très faible des poteaux support de coeur. La masse totale de l'empilement est de 2200 kg.

L'empilement est entouré par un chassis métallique rigide appelé corset, représentant le PCRIV (fig.2). Des butées souples ont été placées aux dix niveaux de l'empilement sur chacune des six faces du corset pour atténuer le choc des briques contre celui-ci. Des rondelles Belleville ont été utilisées pour obtenir une raideur de $2,5 \cdot 10^5$ N/m pour chaque butée.

3- Instrumentation

Huit butées sont équipées de capteurs piézoélectriques afin de mesurer les forces exercées sur le corset. Les accélérations de vingt briques peuvent être enregistrées de manière à déterminer les valeurs pics et à observer la propagation des chocs dans l'empilement.

Des capteurs de vitesse et de déplacement permettent d'obtenir le mouvement relatif entre le corset et l'empilement.

4- Réponse à une excitation sinusoïdale

4-1 Résultats expérimentaux

Deux types d'essais horizontaux et unidirectionnels ont été effectués: des points fixes en fréquence à accélération constante, des balayages à déplacement constant .

4-1-1 Accélération constante

4-1-1-1 Forces

La courbe de réponse de force pour un niveau d'excitation de 0,2 g , présente un aspect non linéaire avec un phénomène de saut caractéristique(fig.3) La fréquence de résonance de l'empilement qui est de 4 Hz pour 0,2 g croît avec le niveau d'excitation, ce qui est typique d'un ressort à raideur croissante.

Les forces sur les butées atteignent 2000 N (0,2 g) en haut de l'empilement et sont nettement plus faibles dans la partie basse de celui-ci.

Les signaux de force sont en forme de demi-sinus, ce qui est à rapprocher du schéma classique d'une masse tombant sur un ressort.

4-1-1-2 Déplacements et vitesses

La fréquence de résonance et le phénomène de saut sont aussi détectés à l'aide des capteurs de déplacement. Ceux-ci permettent par ailleurs d'évaluer la compression des butées au cours des chocs.

Les vitesses atteintes par les blocs périphériques sont relativement faibles: 0,3 m/s pour 0,2 g à la résonance et ne semblent pas être dangereuses pour la bonne tenue des briques.

4.1.1.3 Temps de contact de l'empilement sur le corset

Ce temps de contact est décroissant avec la période de l'excitation et est inférieur à la demi période (fig. 5). Ceci met donc en évidence un temps de transfert de l'empilement d'une butée à la butée opposée.

	Période de l'excitation	Temps de contact	Temps de transfert
3 Hz	332 ms	121 ms	45 ms
3,5 Hz	285 ms	113 ms	29 ms
4 Hz	252 ms	96 ms	29 ms

Ce temps de contact est d'autre part croissant avec le niveau de l'excitation.

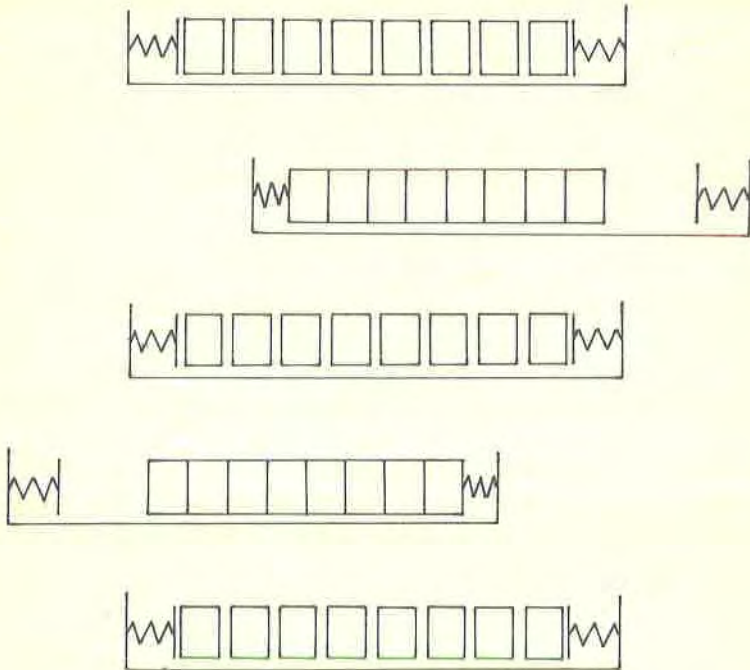
On ne constate pas de décalage dans le temps des signaux de force à différents niveaux. Ceci prouve que l'effet de raideur de colonne est faible.

4-1-1-4 Accélération

Les accéléromètres mettent clairement en évidence un temps de propagation des chocs dans le sens de l'excitation. Ceci prouve donc qu'il y a un

effet d'empilement" des blocs l'un sur l'autre lorsqu'il y a choc sur une butée, le phénomène de "lumping" est donc particulièrement important.

Le schéma ci-dessous résume le comportement de l'empilement pour les fréquences inférieures à la fréquence de résonance. Au delà de cette fréquence, seuls les blocs périphériques viennent heurter les butées.



4-1-2 Déplacement constant

Les courbes de réponse de force ont une allure différente des courbes à accélération constante. On ne constate plus de phénomène de saut bien que l'allure reste dissymétrique (fig. 4).

D'autre part, la fréquence de résonance croît avec l'excitation comme dans les essais à accélération constante .

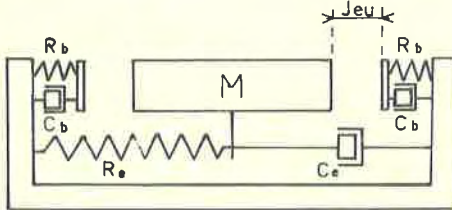
Déplacement pic	Fréquence de résonance
2 mm	3,3 Hz
3 mm	4,1 Hz
4 mm	4,3 Hz

4-2 Comparaison avec un oscillateur non linéaire

Les observations expérimentales en excitation sinusoïdale tendent à prouver que l'empilement se comporte comme une masse unique oscillant entre les butées. Un modèle non linéaire a donc été bâti à partir de ces observations.

4-2-1 Description du modèle

Le modèle est un oscillateur linéaire avec jeu



La raideur R_e et l'amortissement C_e schématisent l'effet de colonne de l'empilement. R_B est la raideur des butées et C_B est un amortissement qui représente l'amortissement intrinsèque des butées et la perte d'énergie cinétique de l'empilement au cours d'un choc sur une butée. M est la masse d'un lit de briques

4-2-2 Valeur des paramètres

L'expérience permettant de penser que la raideur de colonne ne joue qu'un faible rôle dans la dynamique de l'empilement, R_e et C_e ont été choisis nuls. Le mouvement de l'empilement est donc traité comme un phénomène plan. M est la masse d'un lit de l'empilement: $M=240\text{kg}$. R_B est la raideur d'une butée ; l'influence des butées latérales n'est pas prise en compte : $R_B = 2,5 \cdot 10^5 \text{ N/m}$

Il est impossible de connaître l'amortissement à priori; deux valeurs ont été essayées : 10% et 20% , soit :

$$C_B = 1550 \text{ M/ms}^{-1}$$

$$C_B = 3100 \text{ M/ms}^{-1}$$

Le jeu total est égal à 6 mm.

4-2-3 Comparaison : Accélération constante

La courbe de réponse de la force exercée sur les butées est tout à fait semblable à l'expérience (fig.3) . Au delà de 4 Hz (0,2 g) le modèle ne tend pas vers une solution stable, ce qui explique le phénomène de saut des courbes expérimentales. L'amortissement de 20% donne les meilleurs résultats pour les niveaux de force. Le temps de contact de l'empilement sur les butées est bien retrouvé par le calcul (fig. 5)

4-2-4 Comparaison : Déplacement constant

La comparaison expérience calcul a été effectuée pour un déplacement de 4 mm (pic). La fréquence de résonance est très bien retrouvée (4,25 Hz) et l'allure de la courbe de réponse des forces présente le même aspect dissymétrique

que par l'expérience (fig.4). Le niveau des forces est bien respecté pour un amortissement de 20%.

5- Tests et calculs sismiques

Le séisme reproduit sur la table vibrante VESUVE est celui d'El Centro N.S. (0,3482 g au niveau du sol) transposé au niveau du PCRV (fig.6). Compte tenu des possibilités de la table vibrante, ce séisme a été transposé à l'échelle 1/2 dans une similitude de vitesse. La comparaison expérience calcul a porté essentiellement sur les forces en conservant les mêmes valeurs des paramètres que pour le calcul sinusoïdal sauf pour l'amortissement des butées qui est de 13% (fig. 7 et 8) .

Les forces exercées sur le corset sont bien retrouvées par le calcul aussi bien en amplitude que dans le temps . On constate que celles-ci sont maximum au début du séisme et atteignent 4000 N sur une butée.

Le calcul permet aussi de retrouver la vitesse maximum d'impact de l'empilement atteinte , 1,23s après le début du séisme. Celle ci est de 760mm/s par le calcul et 745 mm/s par l'expérience.

6- Conclusion

L'étude effectuée au SEMT a montré qu'un modèle simple pouvait par - faitement rendre compte du comportement dynamique d'un empilement HTGR.Ce modèle étant valable aussi bien pour une excitation sinusoïdale que pour une excitation sismique.

Il a permis d'expliquer les phénomènes non linéaires rencontrés au cours des essais et de prouver que le mouvement de l'empilement pouvait être traité uniquement dans le plan.

Les bonnes corrélations entre l'expérience et le calcul obtenues pour les forces appliquées sur le PCRV et les vitesses de choc des blocs périphériques sur les butées prouvent la validité du modèle.

La transposition éventuelle du modèle au réacteur en vraie grandeur pose toutefois le problème de l'évaluation correcte de l'amortissement. En effet une estimation erronée de celui-ci pourrait conduire à des erreurs importantes sur les forces et les vitesses . Ce n'est qu'après la détermination certaine de ce paramètre que la sûreté sismique du coeur des réacteurs HTGR pourra être assurée.

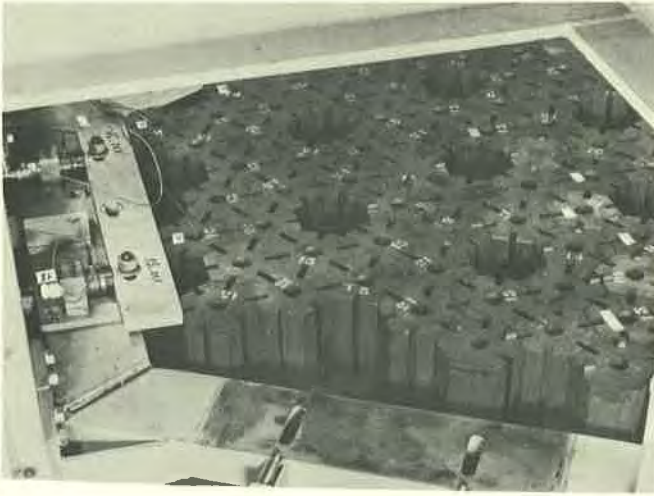


FIG 1

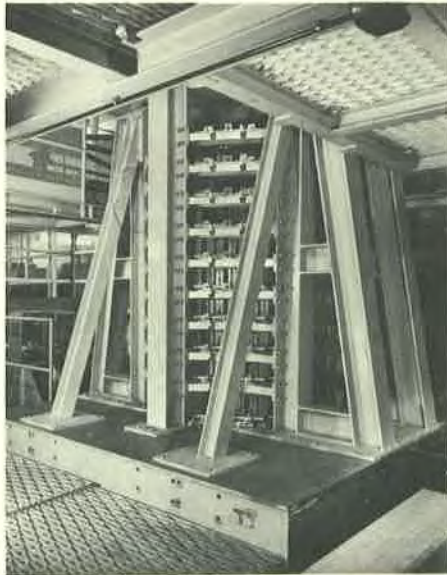
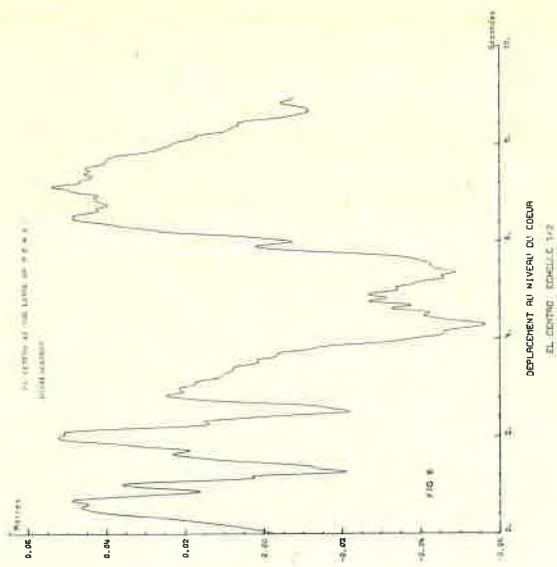
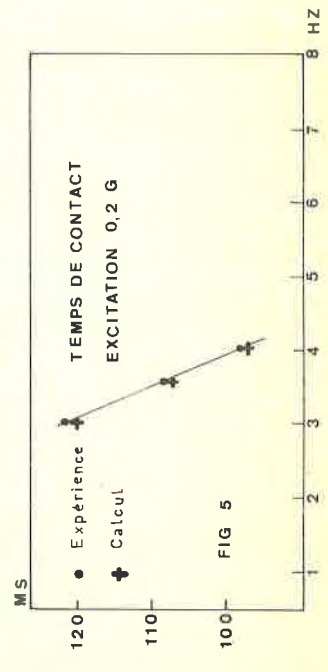
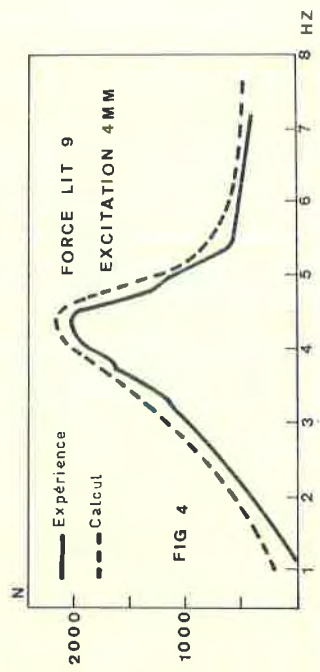
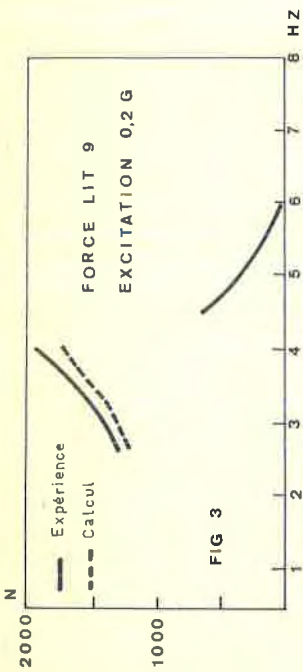
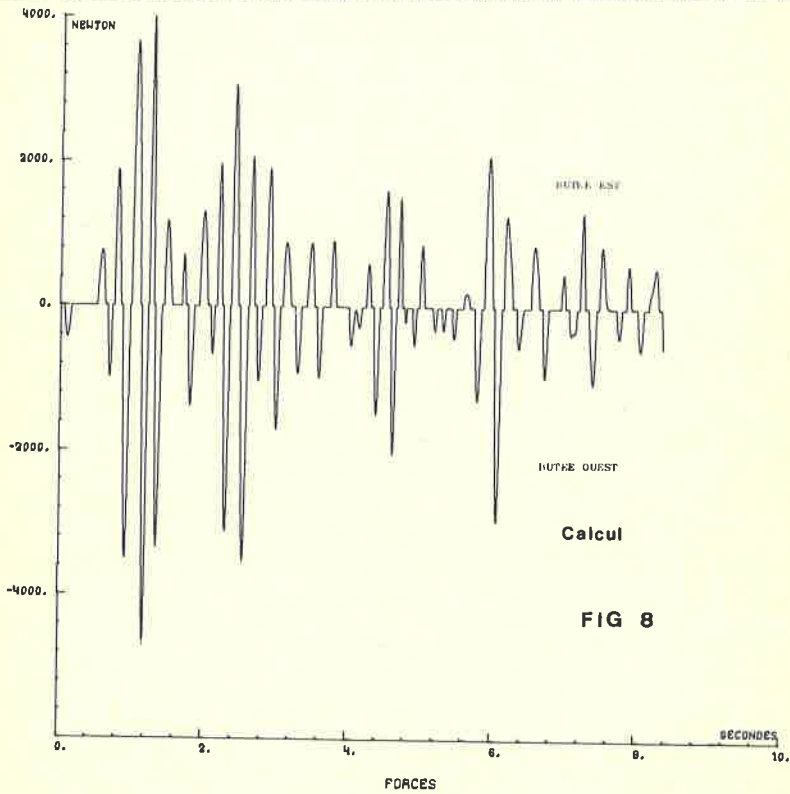
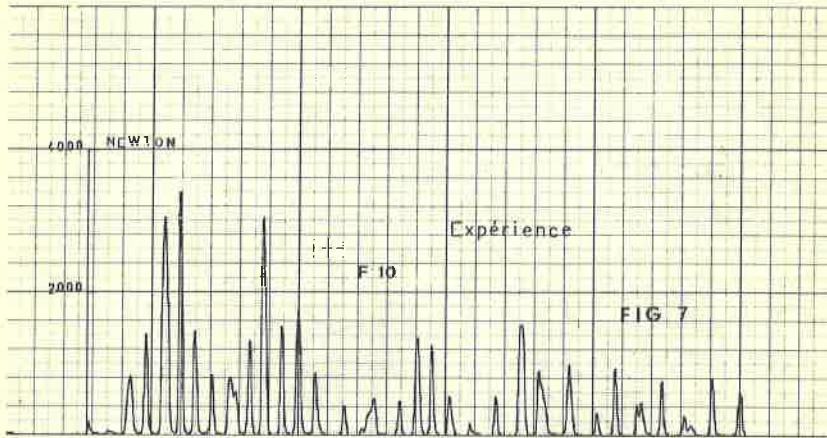


FIG 2





EL. CENTRO ECHELLE 1/2
AMORTISSEMENT BUTEE 13◊

