

Étude du comportement dynamique d'un barrage poids-voûte face au mouvement sismique différentiel

Mustapha Djafour ; Nassima Meddane ; Rachid Derbal ; Djawed Zendagui ; Abdelmalek Bekkouche

Département de Génie Civil
Université Aboubekr Belkaid
Tlemcen, Algérie
BP 230, Tlemcen, Algérie
E-mail : derbal_genie@yahoo.fr

Résumé :

Le travail présenté a pour objectif d'étudier le comportement dynamique du barrage Brézina (type poids-voûte) sous un chargement sismique différentiel. Un modèle stochastique de variabilité spatio-temporelle du mouvement sismique a été retenu. Il se base sur la méthode de représentation spectrale développée par Shinuzoka & al. L'analyse dynamique de la structure étudiée est menée par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul CAST3M. L'approche déterministe est retenue pour cette étude en définissant pour chaque nœud chargé l'évolution du chargement sismique en fonction du temps. Une étude paramétrique de la sensibilité de la réponse dynamique aux différents modèles de fonction de cohérence est présentée. La réponse dynamique totale de la structure rigide sous un chargement différentiel est gouvernée par la composante pseudo-statique en particulier à la base. La réponse dynamique du barrage est très influencée par le modèle de cohérence du mouvement sismique différentiel.

Abstract :

The presented work has for objective to study the dynamic behavior of the Brézina dam (weigh-arch) under a differential seismic loading. A stochastic model of spatial and temporal variability of the seismic movement is used. It is based at the spectral representation method developed by Shinuzoka & al. The dynamic analysis of the studied structure is led by finite element method using the CAST3M code. A deterministic approach is used for this study while defining for every loaded joint the evolution of the seismic loading according to the time. A parametric study of the sensitivity of the dynamic response to different coherency models is presented. The total dynamic response of the rigid structure under a differential loading is governed by the pseudo-static component to the base. The dynamic response of the dam is influenced by coherency model of the differential seismic movement.

Mots-clefs :

Variabilité spatiale ; méthode de représentation spectrale ; analyse dynamique

1 Introduction

La prédiction du comportement dynamique des barrages sous sollicitations sismiques est un enjeu très important dans l'évaluation de leurs sécurités en zones sismiques. Ceci exige essentiellement une connaissance rationnelle de l'action sismique agissante sur tous les points de liaison de la structure avec le sol de fondation. Les procédures d'analyse sismique des structures sont souvent approchées par des hypothèses simplificatrices. Parmi les plus importantes est celle qui suppose que le signal sismique est uniforme.

Pour les structures étendues tel que les barrages, cette simplification ne peut plus être retenue. Il y a en effet l'influence d'un facteur supplémentaire, c'est de la variabilité spatio-temporelle du mouvement sismique. Cette variabilité peut se traduire par des forces additionnelles en plus des forces d'inertie qui agissent sur ce type de structures. Les différents phénomènes contribuant à la variabilité spatio-temporelle du signal sismique ont été regroupés dans les quatre effets distincts suivants (Der Kuirghian 1996): (1) L'effet de l'incohérence, (2) l'effet de passage d'ondes, (3) l'effet de site et (4) l'effet d'atténuation. Ce dernier est négligé car son impact ne prend effet que pour des distances importantes.

L'objectif principal de ce travail est de mener une étude dynamique semi-stochastique du barrage Brézina de type poids-voûte sous un chargement sismique différentiel et de comparer sa réponse dynamique en considérant différents modèles de cohérence.

L'ouvrage étudié est modélisé en 3D par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul CAST3M. Les excitations sismiques spatialement variables appliquées au barrage sont générées artificiellement par la méthode stochastique de représentation spectrale (Shinozuka & al 1987 – Déodatis & al 1996).

2 Description et modélisation du barrage

Le barrage étudié est celui de Brézina qui se situe à El Beyadh (Algérie), de type poids-voûte. Sa hauteur est de 60 m. Le maillage généré comprend 459 nœuds et 272 éléments cubiques à 8 nœuds (FIG.1). Le comportement du barrage est supposé isotrope linéaire non amorti. Les propriétés mécaniques et physiques de la structure sont les suivantes : le module de Young $E = 28,5$ GPa ; le coefficient de poisson $\nu = 0,2$; la masse volumique $M_v = 2,5$ t/m³.

Une analyse modale du barrage Brézina a été réalisée. Les dix premières fréquences propres varient entre 13,07 Hz et 49,65 Hz ce qui informe sur la grande rigidité du barrage.

3 Modélisation du signal sismique

Le chargement sismique appliqué au barrage est modélisé par la méthode de représentation spectrale, laquelle prend en charge la variabilité spatiale du signal sismique (SVGEM) en incorporant un modèle de cohérence.

Dans ce travail, on considère que le barrage Brézina s'appuie sur un sol rocheux où la vitesse apparente de propagation des ondes sismiques est de 1000 m/s et l'accélération maximale du sol au niveau du premier signal simulé est de 0,28g.

En se basant sur ce modèle de SVGEM, le mouvement sismique est simulé en considérant les quatre modèles de cohérence suivants :

Modèle de La CSDA (1999)

Le modèle de la CSDA (Complete Stochastic Deamplification Model) a été développé récemment (Zendagui & al). Son but est de générer une fonction de cohérence en profondeur en utilisant la fonction obtenue en surface. En acceptant des hypothèses une simple écriture du modèle de la CSDA est utilisée dans ce travail.

$$|C(f, \lambda)| = \sqrt{\left(\int_0^{\pi/2} \cos\left(2\pi f \frac{\sin \theta}{C_s} \lambda\right) d\theta \right)^2 + \left(\int_0^{\pi/2} \sin\left(2\pi f \frac{\sin \theta}{C_s} \lambda\right) d\theta \right)^2} \quad (1)$$

Modèle de Harichandran & Vanmarcke (1986)

$$|C(f, \lambda)| = A \exp\left(\frac{-2B\lambda}{a\beta(f)}\right) + (1-A) \exp\left(\frac{-2B\lambda}{a\beta(f)}\right) \quad (2)$$

Modèle de Luco & Wong (1986)

$$C(f, \lambda) = \exp \left[- \left(\frac{\eta \cdot f \cdot \lambda}{2\pi \cdot V} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Modèle de Hindy & Novak (1980)

$$|C(f, \lambda)| = \exp(-\alpha(2\pi f \lambda)^\beta) \quad (4)$$

Pour chacun des modèles de cohérence décrit ci-dessous on représente l'évolution du déplacement généré en fonction du pas de temps et des nœuds chargés au niveau de la base du barrage (FIG-2).

4 Analyse et interprétation

Les signaux générés sont appliqués au modèle de la structure sous forme de déplacements imposés aux différents nœuds situés à la base. Cinq séries de calculs sont effectuées à l'aide du logiciel éléments finis CAST3M : Une pour chaque modèle de fonction de cohérence retenu, plus une, correspondant au cas classique où tous les points de la fondation subissent le même déplacement ; c'est le cas de chargement uniforme ou identique.

La différence entre les résultats de ces différents calculs était très grande et il était difficile de tirer des remarques et conclusions générales. La réponse dynamique du barrage u_t (contraintes, déformations ...), qui est dite totale, est décomposée en deux parties : la composante pseudo-statique u_s et la composante dynamique "pure" u_d . La première est celle qui est obtenue en appliquant le chargement sismique "statiquement". Il faut noter que cette composante, lorsqu'il s'agit de contrainte ou de déformation, est totalement nulle dans le cas d'un calcul sous chargement uniforme. Il s'agit d'un mode de déplacement en corps rigide.

La composante dynamique pure u_d traduit l'effet dynamique incluant l'inertie et l'amortissement de la structure suite à l'application d'un chargement sismique différentiel. On peut également la voir comme la partie de la réponse qui justifie la résolution de l'équation de la dynamique (sous chargement différentiel).

Pour analyser la réponse très complexe du barrage, on a choisi de représenter les contraintes maximales obtenues dans deux parties essentielles du parement amont du barrage: la zone centrale avec son effet console et la crête avec son effet arc.

A partir des Figures 3.a et 4.a, on constate que la différence entre les résultats des différentes approches est considérable. Le modèle de Hindy & Novak donne une contrainte totale maximum de 32,1 MPa alors celui de Luco & Wong donne 3,2 MPa, soit un rapport de 10. Si on s'intéresse maintenant à la composante pseudo-statique (voir FIG 3.b et 4.b), on remarque d'abord qu'elle a tendance à croître lorsqu'on s'approche de la base du barrage. D'un autre côté, on constate la grande influence du modèle de cohérence. On a notamment remarqué que les modèles de Hindy & Novak et celui de Harichandran & Vanmarcke étaient les plus pénalisants. Leurs fonctions de cohérence se caractérisent par rapport à celles des autres par une grande variabilité dans les petites fréquences.

Ces résultats sont tout à fait logiques. En effet, la composante pseudo-statique est obtenue en appliquant "statiquement" les déplacements simulés à la base. Elle est donc due à la déformation induite par déplacement relatif d'un point de la base par rapport à ses voisins. Or, le rôle des modèles de fonction de cohérence, ou plutôt d'incohérence, est justement de modéliser cette perte d'uniformité entre les déplacements de points voisins d'où, la grande sensibilité de cette composante au modèle de fonction de cohérence. D'autre part, les modèles de Hindy & Novak et de Harichandran & Vanmarcke, c'est-à-dire ceux présentant la plus grande variabilité pour les faibles fréquences, ont été les plus pénalisants car un chargement "statique" peut également être vu comme la limite du chargement dynamique lorsque la fréquence tend vers 0.

Concernant maintenant la composante dynamique pure (voir FIG. 3.c et 4.c), on remarque que son maximum se trouve loin de la base. Il se situe au niveau de la jonction entre la partie voûte et la partie poids du barrage où, il y a évidemment une grande concentration des contraintes. On observe aussi que, contrairement à la réponse pseudo-statique, la réponse sous chargement uniforme et celles des différents modèles sont du même ordre de grandeur. De plus, et dans toutes les parties du barrage, la réponse sous chargement uniforme est restée supérieure aux autres. Elle représente, dans ce cas, une borne supérieure de la réponse dynamique pure.

En analysant les résultats des différents modèles de cohérence, on remarque que le modèle de Luco & Wong a donné la plus faible composante dynamique pure. Celui de Zendagui & al a fournit la plus grande sur une bonne partie de la hauteur du barrage. Il est alors tentant de penser que plus le mouvement est cohérent, plus la composante dynamique est grande, la borne supérieure étant donnée par le cas uniforme c'est-à-dire le mouvement totalement cohérent. Il faut cependant faire attention aux cas des structures qui peuvent mobiliser sous SVGEM des modes de vibration qui ne sont pas excités par le chargement uniforme.

4.1 Sous-rubrique

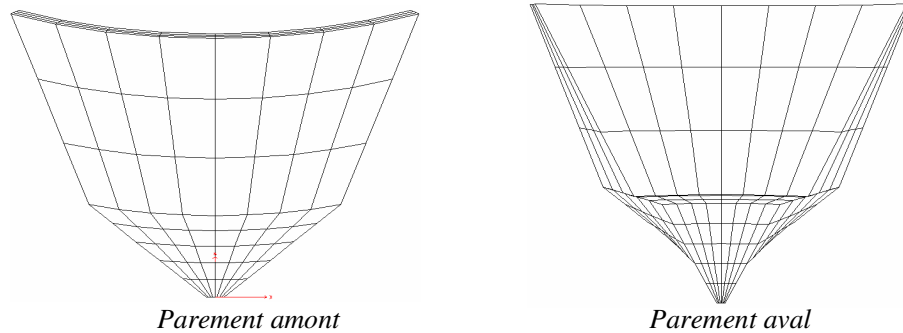


FIG. 1 – Maillage du barrage Brézina

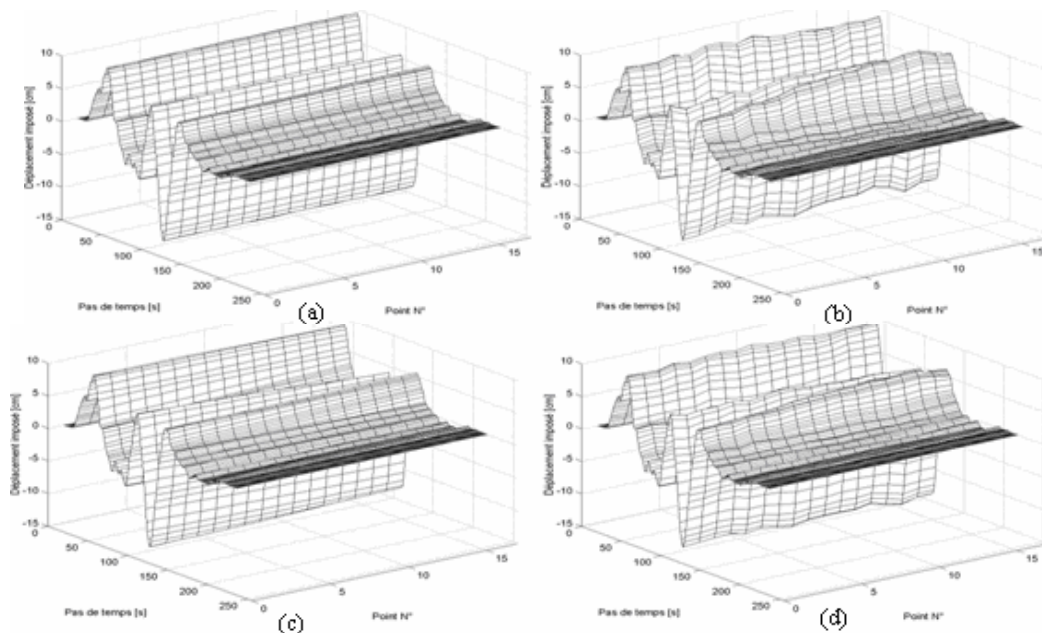


FIG. 2 – Déplacements simulés en considérant différents modèles de cohérence.
(a) Zendagui & al (b) Harichandran & Vanmarck (c) Luco & Wong (d) Hindy & Novak

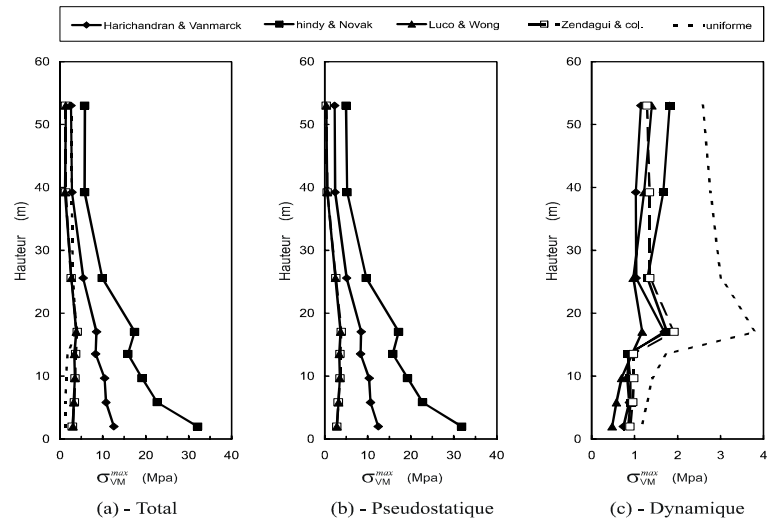


FIG. 3 – Variation de la contrainte de Von Mises maximal en fonction de la hauteur du barrage dans la partie centrale.

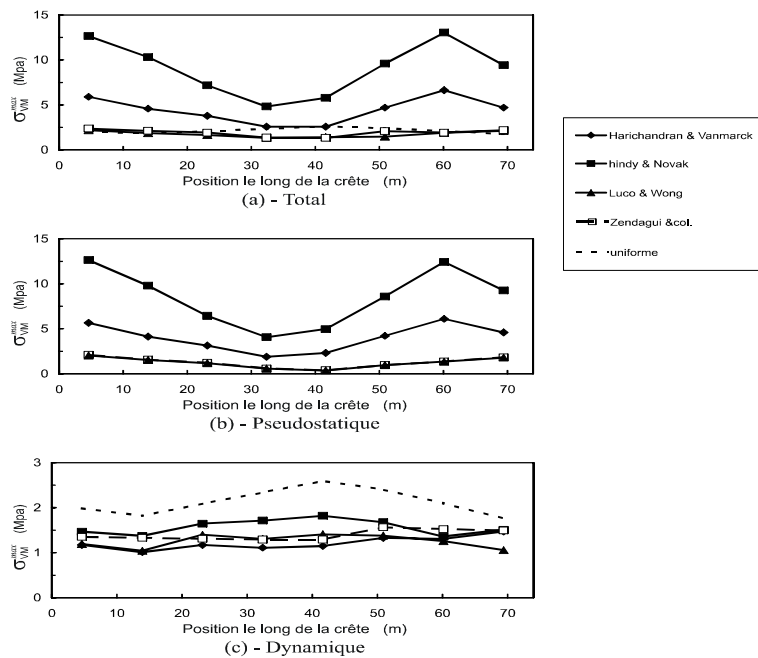


FIG. 4 – Variation de la contrainte de Von Mises maximal le long de la crête du barrage.

4 Conclusions

Dans cet article une analyse dynamique tridimensionnelle du barrage Brézina face aux mouvements sismiques uniforme et différentiels a été effectuée en utilisant le code de calcul en éléments finis CASTEM et plusieurs modèles de fonctions de cohérence. La décomposition de la réponse en composantes dynamique et pseudo-statique a permis de tirer les conclusions suivantes. Les contraintes pseudo-statiques sont très importantes au voisinage de la base, lieu d’application des déplacements imposés, et diminuent lorsqu’on s’en éloigne. Ces composantes

sont très sensibles à la variation des modèles de fonctions de cohérence dans la zone des petites fréquences. La différence peut alors être très grande. Concernant les composantes dynamiques pures, la réponse sous chargement uniforme et les réponses tenant compte de la SVGEM sont du même ordre de grandeur. Le modèle présentant la plus faible cohérence dans la gamme de fréquences de la structure, celui de Luco & Wong, a donné lieu aux plus faibles composantes dynamiques. Le chargement uniforme, c'est-à-dire le mouvement totalement cohérent, a provoqué les plus grandes composantes dynamiques pures. Suite à ces remarques, on peut conclure que, pour cette structure étudiée en élasticité linéaire, il est possible d'éviter le calcul dynamique différentiel. Il peut alors être remplacé par une analyse simplifiée en deux étapes. On effectue d'abord un calcul statique différentiel pour estimer les contraintes pseudo-statiques maximum qui sont loin d'être négligeables. A ces contraintes, on doit ajouter celles dues aux aspects dynamiques purs. On peut en obtenir des valeurs conservatrices en effectuant un calcul dynamique classique. Ce calcul dynamique classique peut prendre n'importe quelle forme : temporelle, spectrale.

Références

- Benmansour, N. 2004 Étude du Comportement Dynamique des Barrages Voûtes Face au Mouvement Sismique Différentiel. *Thèse de Magister*, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Chen, M.T. & Harichandran, R. S. 2001 Response on an Earth Dam to Spatially Varying Earthquake Ground Motion. *Journal of Engineering Mechanics*. **127 (9)**, 931-939.
- Deodatis, G. 1997 Simulation of Stochastic Processes and Fields to Model Loading and Material Uncertainties. Chapter in book "*Probabilistic methods for Structural Design*" Klumer Academic Pub, Europe.
- Derbal, R. 2005 Analyse Dynamique de Barrages Poids - Voûtes sous Chargement Sismique Différentiel. *Thèse de Magister*, Université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen, Algérie.
- Der Kiureghian, A. 1996 A coherency model for spatially varying ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. **25 (1)**, 99-111.
- Harichandran, R. S. & Vanmarcke, E. H. 1986 Stochastic variation of earthquake ground motion in space and time. *Journal of Engineering Mechanics*. **112 (2)**, 154-174.
- Hindy, A. & Novak, M. 1980 Pipeline response to random ground motion. *Journal of Engineering Mechanics*. **106 (2)**, 339-360.
- Luco, J. E. & Wong, H. L. 1986 Response of a rigid foundation to a spatially random ground motion. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. **14 (6)**, 891-908.
- Shinozuka, M., Deodatis G. & Harada, T. 1987 Digital Simulation of Seismic Ground Motion. *Technical Report NCEER-87-0017*, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering, University at Buffalo, State University of New York, Buffalo, New York
- Zendagui, D., M. K. Berrah & E. Kausel. 1999. Stochastic Deamplification of Spatially Varying Seismic Motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. **18 (6)**, 409-422.