

# CONTRÔLE ACTIF DES STRUCTURES PRENANT EN COMPTE L'EFFET D'INTERACTION SOL-STRUCTURE SOLLICITÉES PAR DES EXCITATIONS SISMIQUES

TERCHI BRAHIM & HADID MOHAMED

Laboratoire Travaux Publics, Ingénierie de Transport et Environnement  
Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

## RÉSUMÉ

L'objectif de ce travail est d'étudier la fiabilité de la technique du contrôle actif en faisant des investigations sur des structures prenant en compte l'effet de l'interaction sol-structure (SSI). Des câbles actifs sont utilisés comme un système de contrôle actif. Les lois du contrôle actif sont nombreuses et font partie de la théorie du contrôle optimal. Celle utilisant la boucle fermée (loi de Riccati) est appliquée dans cette étude. Chaque loi de contrôle doit achever l'objectif du contrôle en réduisant au maximum la réponse de la structure sans oublier la minimisation de la force de contrôle.

Un indice quadratique de performance est utilisé dans ce cas afin de trouver un compromis entre le besoin de réduire la réponse de la structure et le besoin de minimiser la force de contrôle.

Cette étude a montré, d'une part, que ce type de contrôle est une solution fiable pour protéger les structures devant les séismes. D'autre part, dans le cas où le sol, sous la base des structures, présente une grande déformabilité, il est très important d'introduire l'effet d'interaction SSI afin de le rapprocher au comportement réel des structures.

**MOTS-CLÉS :** Contrôle actif - Interaction sol-structure (SSI) - Lois de contrôle - Contrôle optimal - Boucle fermée - Loi de Riccati - Indice quadratique de performance.

## ABSTRACT

The objective of this work is to study the reliability of the technique of active control, making investigations on several structures taking into account the effect of soil-structure interaction (SSI). Active tendons are used as an active control system. Control laws are numerous and present part of the theory of optimal control, one of these using the closed loop (law of Riccati) is applied in this study. Each control law must satisfy the objective of control, by minimizing the response of the structure and minimizing the applied force.

A quadratic performance index is used here to find a compromise between the need to reduce the response of the structure and the need to minimize the power of control.

This study showed, firstly, that this type of control is a reliable solution to protect structures against earthquakes. Secondly, if the ground at the base of structures has a high deformability, it is very important to introduce the interaction effect (SSI) in order to get the real behavior of structures.

**KEYWORDS:** Active control - Soil-structure interaction (SSI) - Control law - Optimal control - Closed loop - Law of Riccati - Quadratic performance index.

**INTRODUCTION**

Depuis l'existence de l'humanité, l'être humain cherche à satisfaire son besoin d'être à l'abri des phénomènes naturels destructifs. Il a pensé à construire des bâtisses qui sont devenues un danger réel face aux facteurs influant sur nos constructions tel que le vent, le séisme. A ce niveau, l'être humain a cherché des solutions pour éliminer ces risques majeurs menaçant sa sécurité. Parmi lesquelles, il se trouve la technique de contrôle.

Le contrôle des bâtiments qui ont déjà été sujets à des vibrations est envisagé sur le terrain réel.

Plusieurs travaux ont été déjà dirigés dans ce sens depuis près de 20 ans particulièrement au Japon et un peu plus tard aux U.S.A. Les études faites ont poussé les industries ainsi que les chercheurs à enrichir les techniques de commandes et à concevoir des appareillages de pointe et de précision.

Un système de contrôle est dit actif si un ou plusieurs actionneurs appliquent des forces sur une structure selon une loi de contrôle et utilisent pour leur fonctionnement une source d'énergie externe. Ces forces peuvent être utilisées pour ajouter ou dissiper l'énergie de la structure à contrôler.

Dans cette étude, on va examiner la fiabilité de la technique du contrôle actif en faisant des investigations sur des structures prenant en compte l'effet de l'interaction sol-structure (SSI).

**ÉQUATION DE MOUVEMENT**

La figure 1 montre une structure à  $n$  ddl contrôlée par le système actif et prenant en compte l'effet de SSI. La différence entre les deux cas, avec et sans l'effet de SSI, est qu'il y a deux forces en plus apparaissant lorsqu'on prend en considération les mouvements de la fondation, qui sont le mouvement de translation et celui de rotation. Donc, l'équation du mouvement de la superstructure, dans le cas des structures avec l'effet de SSI, est obtenue par l'addition de ces forces d'inertie dans le cas des structures sans l'effet de SSI.

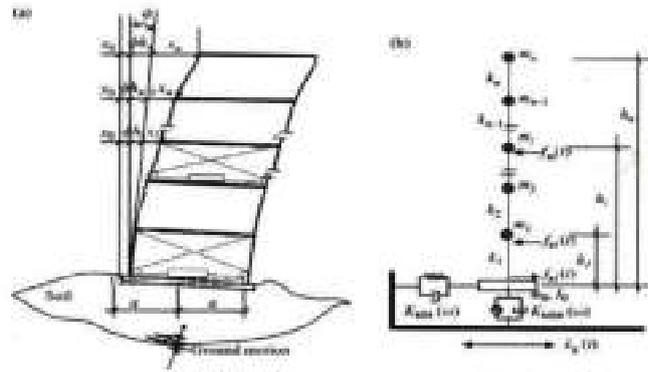


Figure 1 : Structure à  $n$  ddl contrôlée par des câbles actifs prenant en compte l'effet de SSI.

Les paramètres mentionnés sur la figure 1 sont :

- $m_i, k_i$  : masse et rigidité de l'étage  $i$  respectivement ;
- $m_b, I_b$  : masse et moment d'inertie massique de la fondation respectivement ;
- $h_i$  : hauteur de l'étage  $i$  ;
- $f_i^a$  : force fournie par le contrôle actif appliquée sur l'étage  $i$  ;
- $k_{hs}, k_{ts}$  : rigidité horizontale et torsionnelle du sol respectivement ;
- $x_s$  : déplacement du mouvement du sol à la base de la structure ;
- $x_i, \theta_i$  : déplacement et angle de rotation de l'étage  $i$  ;
- $\ddot{x}_g$  : composante horizontale du mouvement sismique.

L'équation d'une structure contrôlée activement par des câbles actifs, sans prendre en considération l'effet de SSI, est exprimée comme suit :

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = [r]\{u(t)\} + \{\delta\}\ddot{x}_g(t) \tag{1}$$



Les deux matrices  $K_s$  et  $C_s$  sont données par Richart et Lysmer comme suit :

La rigidité verticale est :

$$K_s = \frac{8c_s r_s}{(1-\nu)} \quad \text{d'où} \quad \tau_s = \sqrt{\frac{L_s B_s}{\pi}} \quad (3.a)$$

La rigidité horizontale est :

La rigidité vis-à-vis du balancement est :

$$K_{HM} = \frac{32(1-\nu)6r_s g}{(7-8\nu)} \quad \text{d'où} \quad \tau_M = \sqrt{\frac{L_s B_s}{\pi}} \quad (3.b)$$

L'amortissement vertical s'écrit :

$$K_{MM} = \frac{8c_s r_s^3}{3(1-\nu)} \quad \text{d'où} \quad \tau_M = \sqrt{\frac{L_s B_s^3}{3\pi}} \quad (3.c)$$

$$B_s = \frac{0.25m(1-\nu)g}{\rho_s r_s^3} \quad \text{d'où} : \begin{cases} \xi_s = \frac{0.425}{\sqrt{B_s}} \\ C_s = 2\xi_s \sqrt{K_s m} \end{cases} \quad (4.a)$$

L'amortissement horizontal est :

$$B_{HM} = \frac{(7-8\nu)m g}{32(1-\nu)\rho_s r_s^3} \quad \text{d'où} : \begin{cases} \xi_M = \frac{0.288}{\sqrt{B_s}} \\ C_s = 2\xi_M \sqrt{K_{HM} m} \end{cases} \quad (4.b)$$

L'amortissement vis-à-vis du balancement s'écrit : où :

$$B_{MM} = \frac{0.375(1-\nu)l_{HM} B_s}{\rho_s r_s^3} \quad \text{d'où} : \begin{cases} \xi_{MM} = \frac{0.15}{(1+B_{MM})\sqrt{B_{MM}}} \\ C_{MM} = 2\xi_{MM} \sqrt{K_{MM} l_{HM}} \end{cases} \quad (4.c)$$

$P_s$  : la masse volumique du sol ;

$r_s$  : le rayon équivalent

$\nu$  : coefficient de Poisson du sol.

**Equation d'état du système**

On construit le vecteur d'état comme suit :

D'où : la matrice d'état du système a les dimensions de

$$\{Z\} = \left[ \{x\}_n^T \quad \{\dot{x}\}_n^T \quad \{\ddot{x}\}_n^T \quad \{\dot{\theta}\}^T \right]^T$$

$(2n+4) \times (2n+4)$ .

Cela va nous permettre d'écrire l'équation d'état suivante :

avec:

$$\{\dot{Z}(t)\} = [A_s]\{Z(t)\} + [B_u]\{u(t)\} + [B_r]\left\{ \begin{matrix} \xi_s(t) \\ 0 \end{matrix} \right\} \quad (5)$$

$$[A_s] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M_{SS}]^{-1}[K_{SS}] & -[M_{SS}]^{-1}[C_{SS}] \end{bmatrix}$$

$$[B_u] = \begin{bmatrix} [0] \\ [M_{SS}]^{-1}[\delta_s^s] \end{bmatrix}$$

$$[B_r] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[r] \\ [I_s] \end{bmatrix}$$

**4. APPLICATION DU CONTRÔLE ACTIF SUR UNE STRUCTURE À 8 NIVEAUX PRENANT EN COMPTE L'EFFET D'INTERACTION SOL-STRUCTURE (SSI)**

**4.1. HYPOTHÈSES DE CALCUL**

La structure étudiée (montrée en figure 2) a les caractéristiques suivantes :

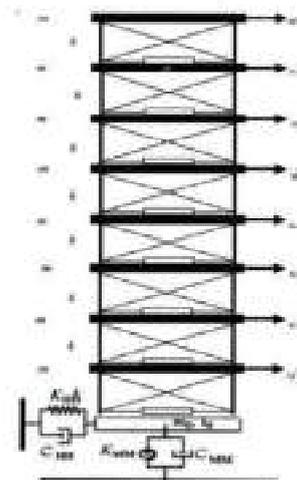


Figure 2 : Structure à 8 dtl contrôlée par des câbles actifs prenant en compte l'effet de SSI.

La superstructure :

nombre des niveaux :  $n = 8$

masse de chaque niveau :  $m = 345.6 \times 10^3 \text{ Kg}$ .

rigidité de chaque niveau :  $k = 3.404 \times 10^4 \text{ KN/m}$ .

amortissement de chaque niveau :

$c = 2937 \times 10^3 \text{ KN.s/m}$ .

hauteur de chaque étage :  $h = 3\text{m}$ .

La fondation :

dimensions en plan :  $40 \times 40 \text{ m}^2$ .

masse :  $m_0 = 4 \times 10^7 \text{ Kg}$

moment d'inertie :  $I_0 = 1.1 \times 10^9 \text{ Kg m}^2$ .

Le sol :

masse volumique :  $1500 \text{ Kg/m}^3$ .

coefficient de Poisson :  $1/3$ .

vitesse du sol :  $150 \text{ m/s}$ .

$K_{HH} = 3.7 \times 10^9 \text{ KN/m}$ ,  $C_{HH} = 10^9 \text{ KN.s/m}$

$K_{MM} = 1.6 \times 10^{12} \text{ KN}$ ,  $C_{MM} = 1.3 \times 10^9 \text{ KN.s}$

Le mouvement sismique appliqué est la composante nord-sud de celui d'EL CENTRO 18 MAI 1940 mentionné dans la figure suivante :

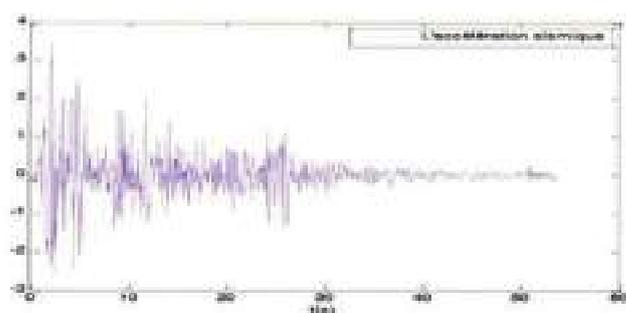


Figure 3 : Composante nord-sud du séisme EL CENTRO 18 MAI 1940.

La structure est contrôlée par des câbles actifs placés dans chaque étage.

Les matrices de pondération  $Q$  et  $R$  sont choisies comme suit :

$$[Q] = 10^4 \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad R = 0.05$$

**4.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS**

Les résultats présentés sont ceux du dernier niveau.

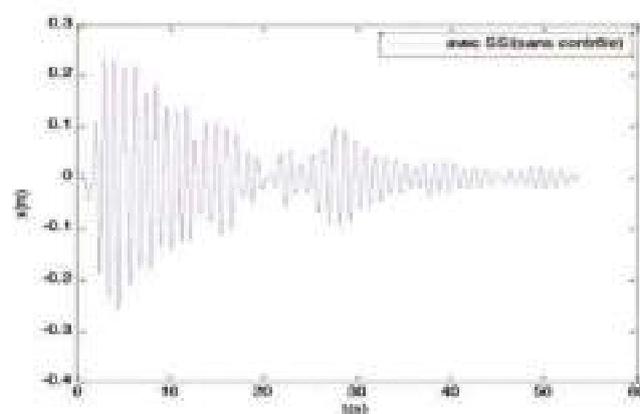
**4.2.1. AVEC SSI****4.2.2. SANS CONTRÔLE**

Figure 4 : Réponses en déplacement du dernier niveau de la structure non contrôlée prenant en compte l'effet de SSI.

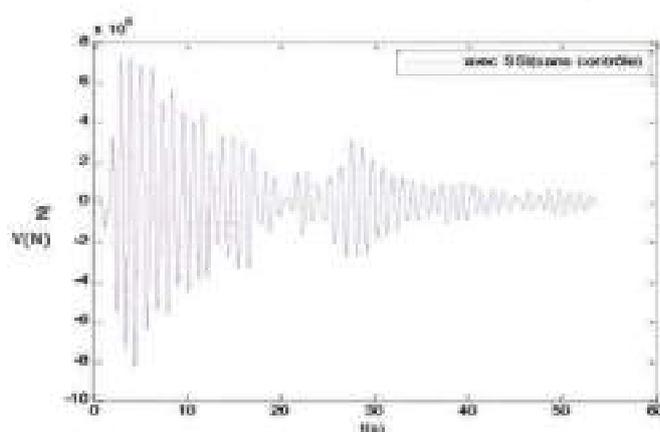


Figure 5 : Réponses à l'effort tranchant à la base de la structure non contrôlée prenant en compte l'effet de SSI.

4.2.3. AVEC CONTRÔLE

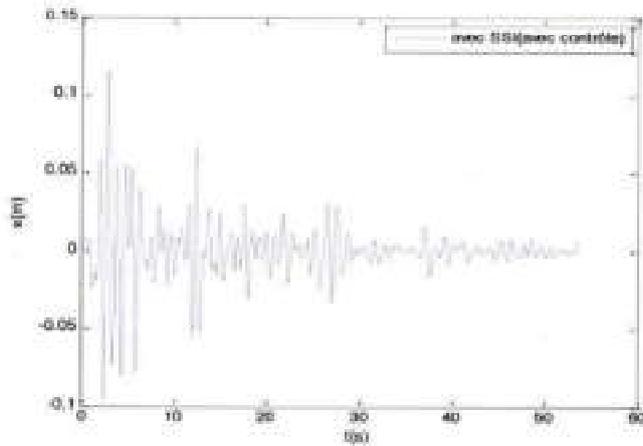


Figure 6 : Réponses en déplacement du dernier niveau de la structure contrôlée prenant en compte l'effet de SSI.



Figure 7 : Réponses à l'effort tranchant à la base de la structure contrôlée prenant en compte l'effet de SSI.

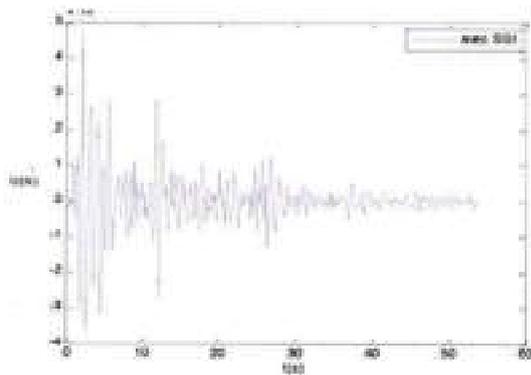


Figure 8 : Forces de contrôle appliquées à la structure prenant en compte l'effet de SSI.

4.3. COMPARAISON DES RÉSULTATS

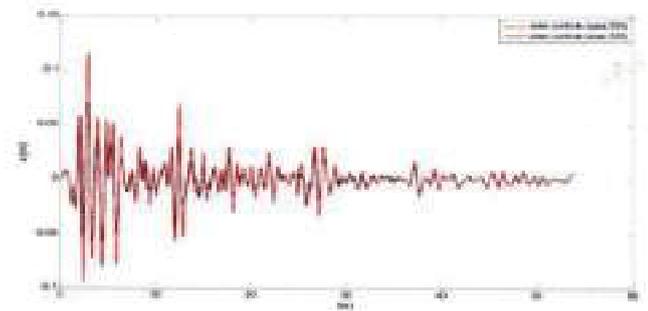


Figure 9 : Réponses en déplacement de la structure contrôlée sans et avec l'effet de SSI.

On constate que le déplacement absolu (par rapport au sol) de la structure en considérant l'ISS est plus grand que celui résultant du cas sans ISS. En revanche, le déplacement inter-étages de la structure en considérant l'ISS est plus petit que celui résultant du cas sans ISS.

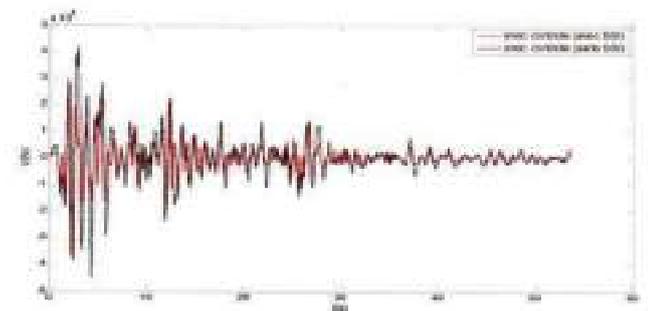


Figure 10 : Réponses en effort tranchant à la base de la structure contrôlée sans et avec l'effet de SSI.

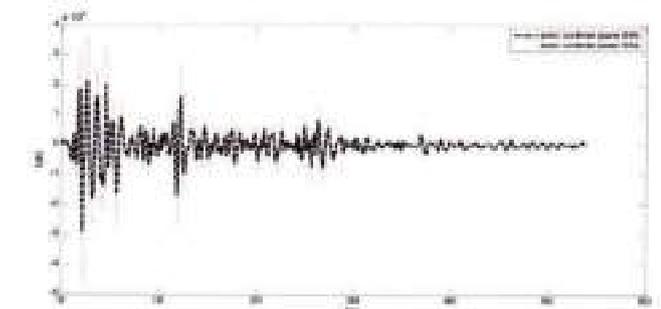


Figure 11 : Forces de contrôle appliquées à la structure sans et avec l'effet de SSI.

## 5. CONCLUSION

Cette application nous a permis de conclure ce qui suit :

- avec l'effet de SSI, les déplacements de la structure augmentent à cause des déplacements de la fondation qui s'ajoutent aux déplacements de la superstructure.
- avec l'effet de SSI, les déplacements inter-étages et l'effort tranchant à la base diminuent à cause de la souplesse de la base qui joue un rôle d'isolateur parasismique.
- avec l'effet de SSI, les forces de contrôle de la structure sont importantes par rapport à celles de la structure sans l'effet de SSI à cause de l'importance des déplacements de la fondation qui nécessitent une force supplémentaire pour les réduire.

D'après ces résultats, l'approche qui consiste à supposer les fondations des structures encastrées à la base est une hypothèse loin de la réalité physique notamment lorsque les sols présentent une grande déformabilité.

Par conséquent, il est nécessaire d'introduire l'effet d'interaction sol-structure (SSI) dans le calcul de la réponse sismique des structures afin de se rapprocher au mieux du comportement réel des structures.

## 7. RÉFÉRENCES

- Banerjee, P.K. and Butterfield, R., *Dynamic Behavior of Foundation and Buried Structures*, Elsevier Applied Science, 1987.
- Bielak, J., *Dynamic response of non-linear building foundation systems*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 6, 17-30, 1978.
- Franklin Y.Cheng, Hongping Jiang and Kangyu Lou « *Smart structures innovative systems for seismic response controls* », CRC Press, 2008
- Indrajit Chowdhury and Shambhu P. Dasgupta « *Dynamics of Structure and Foundation – A Unified Approach* Part 1, CRC Press/Balkema, 2009.
- MATLAB®: *The Language of Technical Computing*, TI Math Works, Inc., 1994-2007.
- Hadid, M., Afra, H., and Guenfaf, L., *Active Control Techniques for Buildings under Ground Motion*, *Première Colloque National de Génie Parasismique*, Alger 4, 5 et 6 Juin 1996, Vol. 1, pp. 157-166.
- Takahashi, Y., Kiureghian, A.D., and Ang, A.H., *Life-cycle cost analysis based on a renewal model of earthquake occurrences*, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33, 859-880, 2004.
- Wolf, J.P., *Dynamic Soil-Structure Interaction*, Prentice Hall, New Jersey, 1985.