

INFLUENCE DE L'INTERACTION SOL-STRUCTURE SUR LA REPONSE DYNAMIQUE DES STRUCTURES DES BATIMENTS

M. TAMAOULT* et T. BRANCI*

* *Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Université Hassiba Benbouali, Chlef*

Résumé:

La réponse sismique des structures des bâtiments dépend de la nature du mouvement du sol, des propriétés mécaniques et physiques de la structure et de celles du sol. Il y a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encastrée dans le sol ; cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure, par exemple dans le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux. L'objectif de la présente étude est la détermination de la période fondamentale des structures contreventées par des portiques autostables en tenant compte de l'interaction sol-structure. L'étude est réalisée en utilisant le code Sap2000 où la structure est modélisée par des éléments barres et le sol par des ressorts discrets. Plusieurs catégories de site proposées par le code algérien (RPA99) sont prises en compte. L'analyse statistique des résultats a abouti à la détermination d'une expression simplifiée de la rigidité du système sol-structure. A l'issue de cette analyse des courbes ont été tracées permettant la détermination directe des périodes fondamentales des structures autostables, en fonction de cette rigidité quand l'interaction du sol est prise en compte.

Mots clés : Dynamique, sismique, interaction, sol, structure, modélisation

1. Introduction :

L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol de la fondation. Les effets de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse sismique n'ont été sérieusement pris en considération qu'après le tremblement de terre de 1971 à San Fernando et au début de la construction nucléaire en Californie. Les conséquences catastrophiques de plusieurs récents tremblements de terre dans différentes régions du monde ont posé un problème sérieux aux ingénieurs pour mieux comprendre le comportement sismique des structures en tenant compte de l'effet de l'interaction sol-structure (ISS) [1]. L'analyse sismique d'une structure tenant compte des propriétés locales du site, diffère de celle considérée encastree à sa base. De ce fait, il est particulièrement important de considérer l'ISS dans les zones sismiques où la réponse dynamique des sols peut changer la réponse des structures soumises à l'excitation sismique.[2],[3] De plus, les sites meubles (sol mou) recevant des structures rigides et massives peuvent changer les caractéristiques dynamiques des ces dernières de manière significative.[4].

Certains codes parasismiques tels que le code américain FEMA 450 [5] suggèrent la considération de l'ISS pour la conception sismique des structures. Egalement le code parasismique ATC-3 [6] propose une simple formule pour l'estimation de la période fondamentale et du coefficient d'amortissement des structures fondées sur un demi-espace homogène.

Néanmoins, les règlements parasismiques en vigueur tel que le règlement RPA/version2003 [7] propose une classification des catégories de site au nombre de quatre, fonction des propriétés des sols qui les constituent. Chaque catégorie de site est associé à un spectre de réponse élastique calculé en fonction des caractéristiques du site considéré et de celles de la structure étudiée.

Certains auteurs ont proposé, pour chaque degré de liberté de la fondation, des modèles de sols constitués d'un nombre plus ou moins grand de masses, ressorts et amortisseurs à coefficients indépendants de la fréquence. La manière la plus simple de prendre en compte le sol est de le représenter par des ressorts reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide, à laquelle on impose un mouvement. Dans le cas d'un modèle plan, une semelle sous point d'appui isolé est représentée par deux ressorts agissant à la translation et un ressort à la rotation; sous un radier, le sol est modélisé par un ressort horizontal et un ressort vertical en chaque nœud [8].

Raine [9] expose une méthode simplifiée pour la détermination des propriétés dynamiques des structures à un seul étage fondées sur des fondations reposant sur un demi-espace élastique. Il applique ensuite à des expressions générales fournissant la fréquence propre, les résultats de cette étude paramétrique incluant l'influence du rapport de la rigidité structure-sol et la géométrie de la structure sur la fréquence propre du mode fondamental δ .

Actuellement, suite à la progression rapide de la performance des ordinateurs, les méthodes numériques de simulations sont largement utilisées dans l'étude du phénomène d'interaction sol-structure.

Les méthodes de simulations numériques sont classées en trois types, entre autres de sous-structure, la méthode des éléments finis et la méthode hybride [10]

Dans une analyse de l'interaction sol-structure, les coefficients dynamiques de la rigidité du sol à l'origine dépendent de la fréquence. En cas d'états réguliers de sous-sol, les matrices de rigidité, la masse, et l'amortissement du système sol-fondation sont obtenus en employant les formules classiques qui sont indépendantes de la fréquence. On calcule les rigidités du sol indépendantes de la fréquence pour une première approximation par la méthode de Newmark-Rosenblueth [11], on

peut calculer les rigidités et l'amortissement géométrique d'une manière précise, dans le cas des fondations circulaires ou assimilées sur un milieu semi infini, selon la méthode de Deleuze [12]. Pour les autres types de fondations superficielles, on peut déterminer les rigidités d'après Sieffert et Cevaer[13].

2. Description du modèle de référence :

Cette partie du travail présente l'influence de l'interaction sol-structure sur la période fondamentale des structures. Dans un premier temps l'analyse dynamique des structures étudiées est évaluée en considérant l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base figure.1. Dans un deuxième temps, on considère le couplage sol-structure en modélisant le sol par des ressorts figure.2, moyennant une approche numérique par la méthode des éléments finis (sap2000).

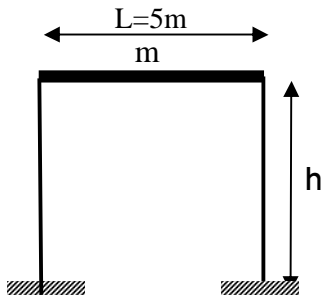


Figure.1. Modèle sans prise en compte de l'ISS

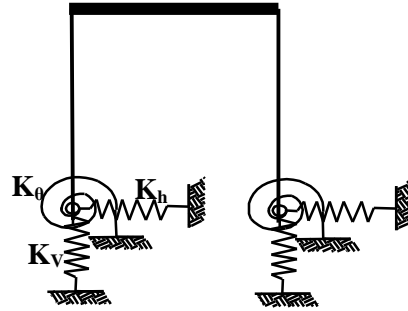


Figure .2. Modèle tenant en compte de l'ISS

2.1. Modèle de la structure :

Il s'agit d'un portique en béton armé comportant une travée de 5 m. Les poteaux de hauteur h, ont une section de (axb m²). Le plancher est constitué d'une dalle pleine de 0.3 m d'épaisseur et d'une surface de 5x5 m². La structure repose sur des semelles superficielles en béton de section carrée (AxB = 2x2 m²). Des éléments poutres élastiques ont été utilisés pour modéliser la superstructure. Les simulations ont été effectuées en faisant varier les paramètres illustrés dans le tableau .1.

2.2. Modèle du sol :

Le sol est supposé homogène avec un comportement élastique linéaire et modélisé par des ressorts et caractérisé par sa masse volumique ρ et les paramètres de comportement, le module de cisaillement G,

le coefficient de Poisson ν et la vitesse des ondes de cisaillement V_s ($V_s = \sqrt{G/\rho}$).

Tableau .1. Caractéristiques physiques propres du sol et de la structure.						
Sol			Structure			
Vitesse d'onde de cisaillement du sol V_s (m/s)	La densité de sol ρ (KN/m ³)	Coef. Poisson ν	Module élastique E_p (MPa)	h (m)	Moment d'inertie I_p (m ⁴)	Coef Poisson ν
100	18	0.45	25000	4	0.000326	0.2
200	18	0.4	32000	7	0.00125	
400	20	0.3	42000	10	0.00342	
800	22	0.3		13	0.0108	
Base fixe	-	-			0.0833	

I_p : inertie du poteau
 E_p : module d'élasticité du poteau

L'interaction de la structure avec le sol est modélisée par l'intermédiaire des ressorts élastiques discrets de translation (K_h horizontal et vertical K_v et de rotation K_θ).

Les coefficients de rigidité de ces ressorts sont donnés par les expressions (1) de Newmark et Resenblueth [11] pour les fondations rectangulaires.

Le tableau.2 suivant présente les valeurs des rigidités des ressorts pour les différentes directions et en fonction de la vitesse d'onde de cisaillement du sol associée aux différentes catégories du site pour une fondation de section $2 \times 2 \text{ m}^2$.

$$\left. \begin{aligned} k_h &= 2(1+n)b_x \sqrt{BL} \\ k_v &= \frac{G}{1-n} b_n \sqrt{BL} \\ k_q &= \frac{G}{1-n} b_j BL^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Avec:

$$L/B = 1 \quad \text{et} \quad (b_x = 1, b_v = 2.16, b_y = 0.5)$$

$$L/B = 2 \quad \text{et} \quad (b_x = 0.94, b_v = 2.2, b_y = 0.6)$$

$$L/B = 4 \quad \text{et} \quad (b_x = 1, b_v = 2.4, b_y = 0.79)$$

Où : L et B sont respectivement la longueur et la largeur de la fondation.

b_x , b_v et b_y : paramètres dépendant de la géométrie de la fondation

Type du sol	Très meuble (1)	Meuble (2)	Ferme (3)	Très ferme (4)
Vitesse d'onde de cisaillement, V_s (m/s)	100	200	400	800
Masse volumique, ρ (kN/m ³)	18	20	22	22
Coefficient de poisson, ν	0.45	0.4	0.3	0.3
K_h (10 ⁶ kN/m)	1.04	4.48	18.30	73.20
K_v (10 ⁶ kN/m)	1.43	5.84	22.00	88.10
K_θ (10 ⁶ kNm/rd)	1.31	5.33	20.10	80.50

3. Analyse paramétrique et résultats :

Les simulations numériques effectuées au moyen du logiciel Sap2000 en tenant compte de la variation des paramètres de base relatifs au sol et à la structure en vue de déterminer le rapport entre la période propre du mode fondamentale, T_{fix} , du modèle (considéré fixe à la base), et celle du même modèle (avec cette fois-ci prise en compte de l'ISS, T). Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence l'influence de l'interaction sol-structure sur la période propre fondamentale des structures de bâtiments.

3.1. Variation des paramètres du sol:

L'étude numérique a été conduite en considérant différentes vitesses des ondes dans le sol; cela a permis d'analyser l'effet de l'ISS sur la fréquence fondamentale de la réponse de la structure. Le premier effet d'ISS constaté est l'allongement de la période fondamentale de la structure par rapport à la valeur obtenue dans le cas de la structure à base encastree, cet effet est exprimé par l'augmentation du rapport T_{fix}/T lorsqu'on fait augmenter la vitesse d'onde de cisaillement de sol. Les figures.3 (a, b et c) montrent les valeurs du rapport T_{fix}/T obtenues en fonction de la vitesse d'onde de cisaillement associés aux différentes catégories du site.

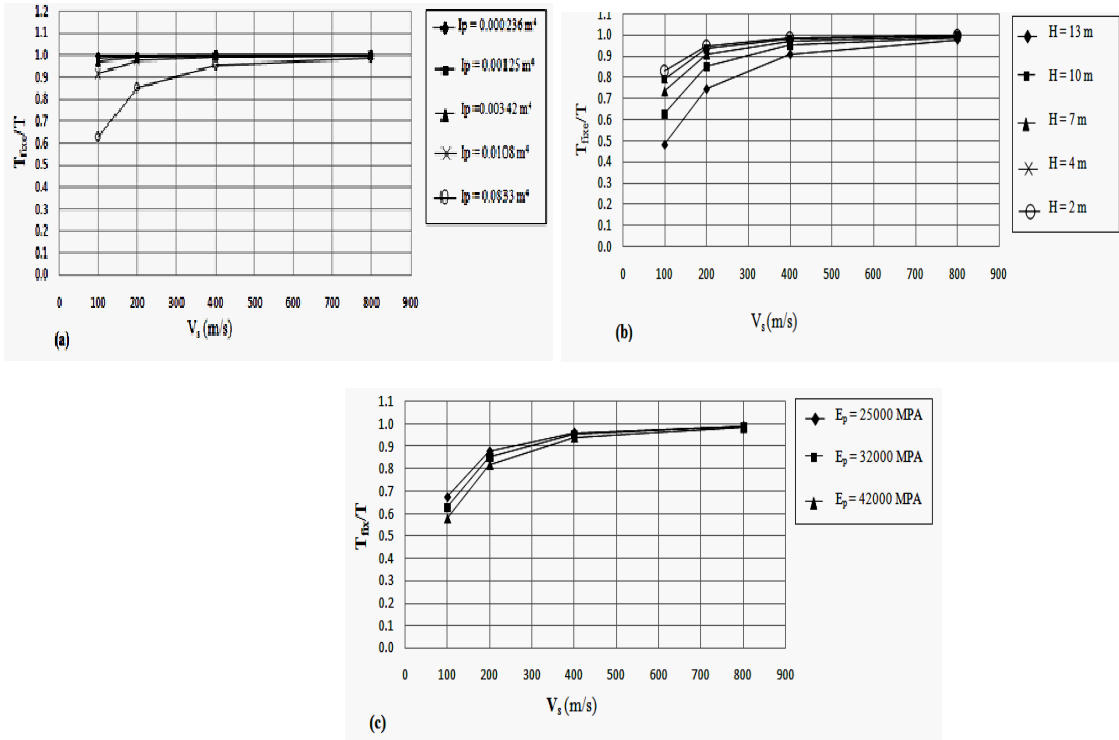


Figure 3. (a, b et c) Influence de la vitesse d'onde de cisaillement sur la période fondamentale.

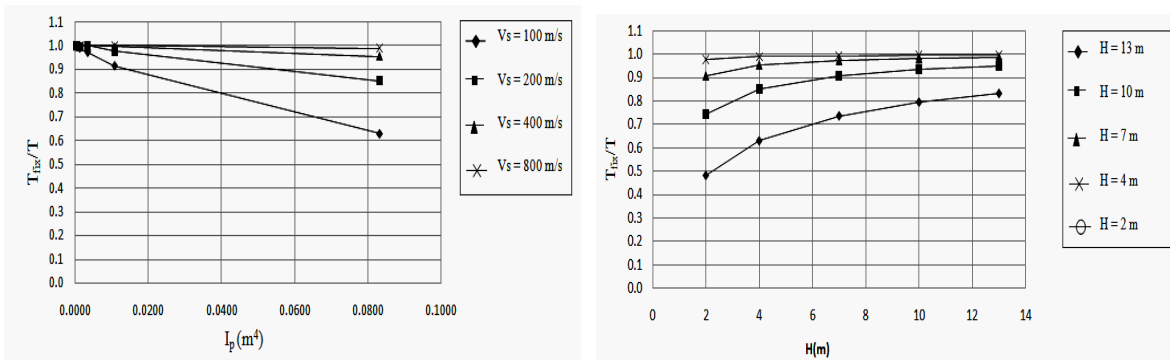


Figure 4. Influence de l'inertie du portique sur la période fondamentale.

Figure 5. Influence de la hauteur d'étage sur la période fondamentale.

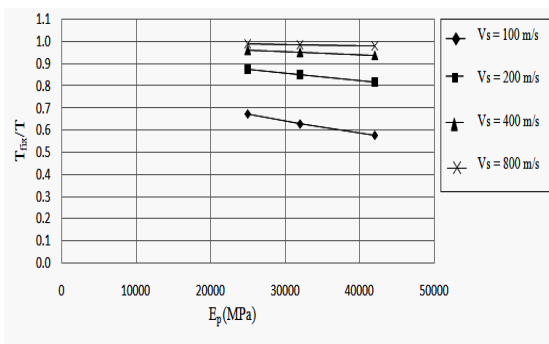


Figure 6. Influence du module d'élasticité du portique sur la période fondamentale.

On constate clairement que plus la raideur du sol augmente, plus que le rapport T_{fix}/T augmente.

3.2. Variation des paramètres de la structure:

Les principales constatations concernant la variation de paramètres de base de la structure sont :

- 1- La réduction du rapport T_{fix}/T de 0.913 à 0.628 (plus de 30%) quand le moment d'inertie des éléments verticaux de la structure augmente de $I_p = 0.0108$ à 0.0833 m^4 et pour une vitesse du cisaillement du sol basse ($V_s=100 \text{ m/s}$), cependant que cette réduction du rapport T_{fix}/T est moins significative pour les vitesses d'onde de cisaillement élevée ($V_s=800 \text{ m/s}$) également comme illustre sur la figure .4.
- 2- La réduction du rapport T_{fix}/T lorsque le module d'élasticité de la structure augmente également comme illustre sur les figures.5, cette différence est moins significative pour le sol très rigide ($V_s = 800\text{m/s}$).
- 3- l'autre paramètre de la structure h , est aussi affecté sur le rapport T_{fix}/T , la variation de la hauteur h de 2 à 13m augmente le rapport T_{fix}/T de 0.480 à 0.830 comme montre la figure.6.
- 4- les courbes de tendance de la variation du rapport T_{fix}/T en fonction de paramètres de la structure sont approximativement linéaires.

4. Discussion des résultats :

D'après l'analyse des résultats récapitulés sur les figures ci-dessus, la variation du rapport T_{fix}/T est approximativement linéaire ou logarithmique en fonction de paramètres sol-structure, par conséquent le rapport T_{fix}/T peut être exprimé par une équation f en fonctions des paramètres suivantes:

$$T_{fix}/T = f (V_s, h, E_p, I_p, A)$$

Cette équation démontre que la période fondamentale du système de structure -fondation- sol dépend de cinq paramètres qui caractérisent le sol (V_s), et l'autre de la fondation (A) et la structure (h, E_p, I_p). La fonction f peut être déterminée en utilisant la méthode de la régression multilinéaire [14] qui est formulée dans ce cas par l'expression mathématique (2) suivante :

$$T_{fix} / T = A_1 \text{Log}(V_s) + A_2 \text{Log}(h) + A_3 \text{Log}(E_p) + A_4 \text{Log}(I_p) \quad (2)$$

4.1 Résultats statistiques de la régression multilinéaire:

Les résultats statistiques de la régression intervenant dans l'équation (2) associe approximativement les paramètres sol-structure sont donnés par le tableau.3 suivant:

Tableau .3. Statistiques de la régression multilinéaire				
Coefficients statistiques de la régression				
R^2	A_1	A_2	A_3	A_4
0.67	0.22	0.17	-0.12	-0.10

R^2 : Coefficient de détermination (corrélation).

En fonction de ces résultats, l'influence de l'ISS sur la période fondamentale T sera exprimée en fonction de paramètres sol-structures par l'équation (3) comme suit :

$$\exp\left(\frac{T_{fix}}{T}\right) = \frac{V_s^{A_1} \times h^{A_2}}{E_p^{A_3} \times I_p^{A_4}} \times \exp(b) \quad (3)$$

La normalisation des coefficients de la régression en divisant les coefficients de régressions par le coefficient A_3 donne : $\frac{A_1}{A_3} \approx 2$ $\frac{A_2}{A_3} \approx 1.5$ $\frac{A_4}{A_3} \approx 1$

Par conséquent, nous proposons le paramètre adimensionnel K_{SS} (4) représentant la rigidité relative sol-structure:

$$K_{SS} = \frac{V_s^2 \times h^{\frac{3}{2}}}{E_p \times I_p} \quad (4)$$

Dans les expressions (1) discrètes de ressorts K_v , K_h , K_θ , on remarque que la rigidité de sol dépend de la géométrie de la fondation et l'influence de la vitesse d'onde de cisaillement carrée V_s^2 est équivalente à la racine carrée de l'aire de la fondation \sqrt{A} ; par conséquent, l'expression (4) de la rigidité relative sol-structure adoptée pour l'expression de K_{SS} devient:

$$K_{SS} = \frac{\rho \times V_s^2 \times h^{\frac{3}{2}} \times \sqrt{A}}{E_p \times I_p}$$

La figure .7 suivante illustre la variation du rapport T_{fix}/T en fonction de la rigidité relative (K_{SS}), cette variation peut être rapprochée pour avoir l'allure d'une courbe simple bien précise en fonction de $\log(K_{SS})$. Pour $\log(K_{SS}) > 1.5$, le rapport atteint l'asymptote $T_{fix}/T=1$. Dans ce cas, la période fondamentale du système sol-structure est proche de celui d'une structure à base fixe. Pour le $\log(K_{SS}) < 1.5$, on observe une variation importante du rapport T_{fix}/T en fonction de K_{SS} . Dans ce cas, la non prise en compte de l'ISS peut entrainée une sous-estimation significative de la période fondamentale du système sol-structure et une prédiction erronée de la réponse dynamique globale de la structure. Pour les structures raides sur les sols mous ($\log(K_{SS}) < 0$), la période du système sol-structure est égale à deux fois ou plus la période du système fixe à la base T_{fix} .

De plus et d'après les investigations récentes, le système équivalent à un degré-de-liberté (1DDL) est un moyen pour une étude fiable d'un bâtiment à un seul étage ou plusieurs étages avec une distribution de la rigidité et de la masse sur la hauteur. La masse de la structure est supposée concentrée à la hauteur h . Généralement, h est égale à la hauteur de la structure pour les bâtiments à un seul niveau, tandis que pour les bâtiments à plusieurs étages cette hauteur doit être prise approximativement égale à 0.7 fois la hauteur totale du bâtiment ($0.7h_T$) [15]. Par conséquent, la rigidité sol-structure peut être exprimée comme suit :

$$K_{SS} = \frac{\rho \times V_s^2 \times 0.7h_T^{\frac{3}{2}} \times \sqrt{A}}{E_p \times I_p}$$

La figure 8 montre que la courbe proposée dans le cas d'une structure à plusieurs étages reproduit d'une façon très satisfaisante la tendance obtenue pour les structures à plusieurs 1DDL.

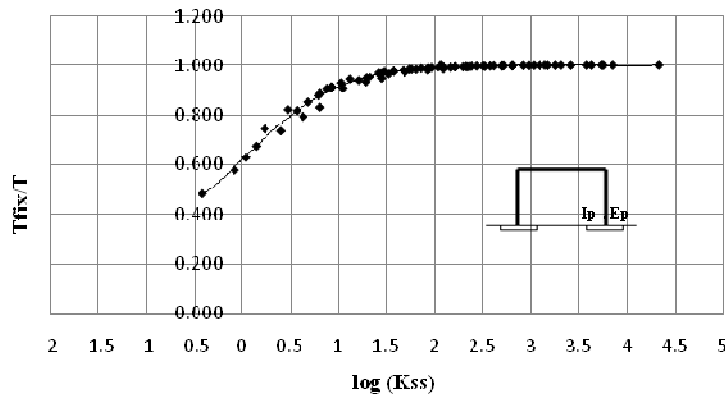


Figure. 7. Influence de la rigidité relative K_{SS} sur la période fondamentale des structures à 1DDL.

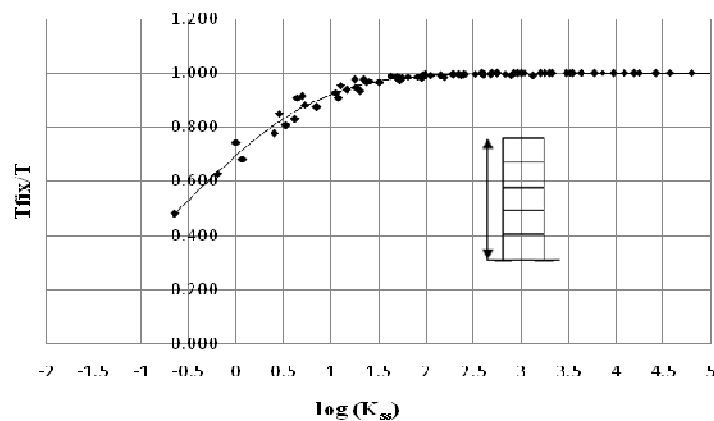


Figure. 8. Influence de la rigidité relative K_{ss} sur la période fondamentale des structures à plusieurs étages.

5. Conclusion:

L'analyse de l'influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la période fondamentale des bâtiments, exécutée pour différentes conditions de sol et de structure, a prouvé que cette influence dépend principalement de la rigidité relative sol-structure, cette rigidité put être exprimée en termes de vitesse d'onde cisaillement de sol (V_s), surface de fondation (A), la rigidité de flexion des poteaux de bâtiment (I_p , E_p), la hauteur totale du bâtiment (h_T).

L'analyse statistique des résultats a abouti à la détermination d'une expression simplifiée de la rigidité du système sol-structure. A l'issu de cette analyse des courbes ont été tracées permettant la détermination directe des périodes fondamentales des structures autostables, en fonction de cette rigidité quand l'interaction du sol est prise en compte.

Bibliographies

- [1] **Wong HL, Luco JE.** "Dynamic response of rigid foundations of arbitrary shape". Earthquake Eng Struct Dyn 1976;4:587–97.
- [2] **Smith HA, Wu WH, Borja RI** Structural control considering soil-structure interaction effects. Earthq Eng Struct Dyn 1994; 23:609–626
- [3] **Mihailo DT, Maria IT, Tzong-Ying H.** "Full-scale experimental studies of soil structure interaction". In: Proceedings of the 2nd US–Japan workshop on soil structure interaction, Tsukuba City, Japan, March 6–8, 2001.
- [4] **John PW, Chongmin S.** "Some cornerstones of dynamic soil–structure interaction". Eng Struct 2002;24:13–28.
- [5] **Building Seismic Safety Council (BSSC).** NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures. FEMA450. Washington (DC): Federal Emergency Management Agency; 2003.
- [6] **ATC-3,** Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings, ch6, 1978.
- [7] **Regles Parasismiques Algeriennes RPA 99 /version 2003**
- [8] **Alain Capra, Victor Davidovici** "Calcul Dynamique Des Structure En Zone Sismique " 1982
- [9] **Rainer J. H.,** "Simplified Analysis of Dynamic Structure-Ground Interaction" Canadian journal of civil engineering VOL. 2, No.3, September 1975 p.345
- [10] **Xilin Lu, Bo Chen, Piezhen Li and Yuequing Chen,** " Numerical analysis of tall buildings considering Dynamic Soil-Structure Interaction" Journal of Asian Architecture and Building Engineering /May 2003/8
- [11] **Newmark NM, Rosenblueth E** Fundamentals of earthquake engineering. Prentice-Hall : Englewood Cliffs, Nj, 1971

- [12] **G. Deleuze**, “ Réponse à un mouvement sismique d’un edifice pose sur un sol élastique “
Annale de l’ITBTP n° 234, Paris. 1967.
- [13] **J-G Sieffert , F.Cevaer**, “ Manuel des fonction d’impédance- Fondations superficielles,
Ouest “ , Paris. 1967.
- [14] **K. Louay, S. Marwan & S Isam**,“ Influence de l’interaction sol-structure (ISS) sur la
fréquence fondamentale des bâtiments” (*USTL*),*Polytech-Lille 2006*.
- [15] **Priestley MJN**. Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited. The Mallet
Milne lecture. Pavia: Rose School; 2003.