

Contribution à l'étude de l' influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur les réactions de bâtiments en zones sismiques (cas de la Syrie)

Dr. Bassam Hwajja *

(Déposé le 20 / 1 / 2010 . Accepté 18/5/2010)

□ Résumé □

La conception des bâtiments en zones sismiques est généralement menée avec l'hypothèse d'encastrement à la base. Cette hypothèse néglige la flexibilité du sol qui induit un changement de la période fondamentale de la structure, et par conséquent l'amplitude sismique.

Pour mettre en évidence l'influence significative de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réaction des structures en zones sismiques - cas de la Syrie, nous avons étudié les effets de ce phénomène sur des efforts tranchants aux bases des bâtiments construits en zones sismiques différentes en Syrie, suivant les règles du code parasismique de la Syrie (2004) et ses annexes surtout la deuxième annexe (Actions sismiques 2005).

Cette étude fait partie d'une recherche scientifique réalisée au sein du laboratoire de mécanique de Lille -LML- Université Lille1-Sciences et Technologies (France), au cours d'un séjour de 4 mois, à partir du 15 septembre 2009 jusqu'au 15 Janvier 2010.

Les résultats de notre travail montrent que les efforts tranchants à la base de la structure sont influencés par le phénomène ISS, et liés à la rigidité relative sol-structure. On peut remarquer que, pour les structures de types bâtiments (cas étudiés), La force sismique équivalente à la base d'une structure (V) est diminuée en tenant compte du phénomène de l'ISS, par rapport au cas d'encastrement à la base. Or, l'ISS est dans le sens de la sécurité; pour des cas étudiés; structures de types bâtiments, entre 4 et 12 étages.

Mots Clés: Interaction, Sol, Structure, Comportement, Dynamique, Période, Modélisation, Séisme.

*Professeur-Département des structures-Faculté du génie civil-Université Tichrine, Lattaquié , Syrie.

مساهمة في دراسة تأثير الفعل المتبادل بين التربة والمنشأ على استجابة الأبنية الواقعة في مناطق زلزالية (حالة دراسة المنطقة السورية)

الدكتور بسام حويجة*

(تاريخ الإيداع 20 / 1 / 2010. قُبِلَ للنشر في 18 / 5 / 2010)

□ ملخص □

عند تصميم وتقويم الأبنية الواقعة في مناطق زلزالية يقوم المهندس الإنشائي باعتماد نماذج إنشائية مبسطة مفترضاً أن هذه المباني موثوقة عند منسوب التأسيس (القاعدة) دون الأخذ بالحسبان مطاوعة تربة التأسيس وما تولده من تغيير في دور المنشأ وبالتالي في سعة الاهتزاز.

ولكي نأخذ بالحسبان تأثير هذه الظاهرة "الفعل المتبادل تربة-منشأ" على استجابة المباني عند حصول الزلزال، قمنا بدراسة مجموعة نماذج من الأبنية الشائعة المؤلفة من أربعة إلى اثني عشر طابقاً والواقعة في مناطق زلزالية مختلفة في سوريا، بحيث قمنا بتحديد قوى القص القاعدية الناجمة عن الزلازل وفق ما ورد في الكود السوري وملحقاته، خاصة (الملحق الثاني : أفعال زلزالية) مع الأخذ بالحسبان لتأثير هذه الظاهرة، ومن ثم تمت المقارنة مع حالة النماذج الموثوقة عند القاعدة.

يعود هذا العمل للبحث العلمي المنجز في مخبر ميكانيك ليل - جامعة ليل 1 للعلوم والتكنولوجيا في فرنسا الذي تم إعداده في الفترة الواقعة بين 15 أيلول 2009 و 15 كانون ثاني 2010. تبين نتائج الدراسة أن قوى القص القاعدية ترتبط بعامل مميز تحدده الصلابة النسبية للتربة والمنشأ، وأن الفعل المتبادل بين التربة والمنشأ يلعب دوراً إيجابياً لصالح الأمان ويعمل على زيادة قيمة دور الاهتزاز الذاتي وتخفيض قوى القص القاعدية الناجمة عن الزلازل مقارنة مع النماذج الموثوقة عند القاعدة.

الكلمات المفتاحية: الفعل المتبادل، تربة، منشأة، سلوك، ديناميك، دور، نمذجة، زلزال.

* أستاذ - قسم الهندسة الإنشائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Introduction:

Le génie parasismique, en tant que discipline des sciences de l'ingénieur, est d'origine relativement récente (années soixante). Les progrès ne peuvent s'effectuer que par confrontation des résultats théoriques, des idées élaborées dans les bureaux avec l'observation du comportement des constructions lors de séismes réels.

Les critères parasismiques interviennent à tous les stades de la construction et même après son achèvement. Parmi ces critères, nous citerons: Terrain d'implantation; Parti architectural; Parti constructif (système porteur); Choix des matériaux; Calcul de structure; Mise en œuvre; Entretien et la Modifications ultérieurs.

Lors d'un tremblement de terre, les ondes sismiques se propageant dans le sol mettent en mouvement les fondations des ouvrages en les secouant principalement horizontalement. Accélééré à sa base, chaque bâtiment est soumis à des forces d'inertie auxquelles sa structure doit résister. Pour maintenir son équilibre, l'ouvrage exerce sur le sol environnant des efforts importants. Si ce sol est très résistant, le mouvement initial de l'appui n'est pas modifié, et le concepteur peut restreindre son analyse à la seule structure. Si par contre le sol est de résistance plus faible, le support va se déformer et le mouvement de la fondation s'en trouve modifié, et nous avons affaire à un **phénomène d'interaction sol-structure (ISS)**, et le concepteur doit alors inclure le sol et parfois les ouvrages environnants dans son analyse.

Plusieurs travaux de recherche sur l'ISS [1,2,3,4] ont montré que l'augmentation de la période fondamentale de la structure, due à l'effet de l'ISS, ne conduit pas toujours à une atténuation de l'amplitude sismique. En conséquence, l'interaction sol-structure (ISS) peut être dans le sens de la non sécurité, et avoir un effet défavorable sur la réponse de structure.

La construction parasismique est un art qui peut s'articuler autour de trois pôles principaux: conception, calcul, et réalisation. L'interaction sol-structure (ISS) est souvent négligée par les Ingénieurs lors de la conception et calcul d'un bâtiment.

Importance de la recherche et ses objectifs:

Pour diminuer le risque sismique, outre l'aspect sociologique, l'aspect technique et la bonne connaissance du comportement des structures sous sollicitations sismiques est très importante. La réduction de la vulnérabilité d'une structure d'un point de vue technique n'est pas simple. Elle nécessite une bonne connaissance des matériaux, de leur réactions face à des sollicitations dynamiques, mais aussi et surtout une bonne connaissance des conditions aux limites de la structure, c'est à dire l'interface entre le lieu où ces sollicitations prennent naissance et la structure elle même. Le terme générique désignant l'étude de ces phénomènes porte le nom **d'Interaction Sol-Structure (ISS)**. Le terme interaction est très important puisqu'il met bien en évidence le fait que non seulement la nature du sol a une influence sur le comportement de la structure, mais aussi la structure a une influence sur le comportement du sol qui peut modifier ainsi les composantes de la sollicitation.

Si l'interaction tend à augmenter la période fondamentale de l'ouvrage, sa réponse ne s'en trouve réduite que si le mouvement sismique est plus faible à cette nouvelle période ou si l'amortissement du système est augmenté. Des observations post-sismiques montrent que l'interaction sol-structure peut être nuisible.

Prendre en compte de l'Interaction Sol Structure (ISS) est nécessaire car l'augmentation des niveaux de sollicitations sismiques, utilisés lors du dimensionnement

ou de la réévaluation au séisme de structures importantes, demande de déterminer plus précisément les marges de sécurité.

Nous allons traiter ce phénomène (ISS) qui a beaucoup d'influence sur le comportement des structures, et par conséquent d'influence de la sécurité et des coûts. Or, les butes de ce travail sont à définir la notion de l'ISS, et proposer une formule empirique de la période fondamentale, qui tient compte de ce phénomène, facile à utiliser par l'ingénieur confronté aux problèmes du dimensionnement ou de la vérification de la tenue d'une structure type bâtiment vis-à-vis des sollicitations sismiques.

Par conséquent, cette étude pourrait faire un excellent outil d'aide pour les ingénieurs, à la décision et au choix de la méthode de conception et calcul des constructions la plus efficace et économique contre les tremblements de terre d'intensité modérée.

Méthodologie de la recherche:

Nous allons présenter une vue générale sur la notion de ce phénomène, et les différentes méthodes de calculs, existantes dans la bibliographie, afin de traiter l'influence de l'ISS sur la période fondamentale des structures qui constitue un paramètre majeur dans la conception et le calcul des structures en zone sismique. Ce paramètre est généralement calculé en utilisant des formules empiriques fournies par les règlements sismiques et développées à partir de données statistiques. Ces formules négligent généralement l'interaction entre le sol et la structure. Or, cette interaction peut avoir une influence significative sur la période fondamentale de la structure, et conduire ainsi à un mauvais dimensionnement de la structure, et nous allons proposer une formule empirique pour le calcul de la période fondamentale des structures posées sur différents types de sols. Cette formule sera utilisée pour étudier l'influence de l'ISS sur les efforts tranchants à la base de la structure (efforts de rappel (V)).

Les résultats de cette recherche vont sensibiliser l'ingénieur civil aux effets d'interaction sol-structure, et faire montrer qu'il est important de considérer cette interaction dans la conception et l'évaluation des structures en zones sismiques.

Définition de la notion "interaction sol-structure ISS ":

L'interaction sol-structure est caractérisée par la modification de l'accélération à la surface du sol induite par la présence des fondations et de la superstructure. En l'absence de superstructure, l'interaction sol-fondations, appelée **interaction cinématique**, provient de différence de rigidité entre le sol et les fondations. Cette différence induit une modification de la réponse du sol dans le champ proche de la fondation. La présence de la superstructure génère des forces d'inertie qui sont à l'origine de l'**interaction inertielle**.

Pour prendre en compte l'ISS, nous allons présenter, brièvement, les différentes méthodes existantes. Ces méthodes sont bien décrites et détaillées dans plusieurs références scientifiques [5,6,7], ou encore dans les thèses [8,9,10].

- Les méthodes directes

Les méthodes directes consistent à résoudre directement l'équation de la dynamique régissant le comportement du système {sol+fondation+structure}:

$$M.\ddot{U} + C.\dot{U} + K.U = -M.Ia$$

Où U représente le vecteur de déplacement du système par rapport au repère de référence soumis à l'accélération a par rapport à un repère galiléen, I un vecteur contenant des 1 pour les directions soumises à l'accélération a, et M, C, et K les matrices de masse,

amortissement et raideur du système. Le symbole $\dot{\cdot}$ représente les dérivées par rapport au temps.

La résolution directe de ce système d'équation utilise les algorithmes classiques de la méthode des éléments finis (méthode de Newton-Raphson et algorithme d'intégration temporelle de Newmark).

- La méthode des sous-structures

Elle vise à décomposer le problème en la somme de sous problèmes plus simples à résoudre. Dans le cas de fondations rigides cette méthode consiste à utiliser le principe de superposition.

D'un point de vue pratique, cette méthode consiste à décomposer la résolution du problème en trois étapes successives:

(1) Considérer le milieu {sol+fondation rigide sans masse}. En appliquant la sollicitation sismique à la base de ce milieu nous déterminons l'accélération à laquelle sera soumise la fondation. C'est le calcul de l'interaction cinématique.

(2) Calculer la matrice d'impédance dynamique de la fondation permettant d'obtenir les raideurs ainsi que les termes d'amortissement dans les différentes directions.

(3) Calculer la réponse dynamique de la structure supportée par les ressorts d'impédances trouvés en (2) et soumise à la sollicitation calculée en (1).

- Méthodes hybrides: concept de macro-élément

Les méthodes hybrides consistent à utiliser une combinaison des deux autres méthodes vues plus haut en profitant des avantages de chacune. Ainsi les méthodes hybrides visent à décomposer le système en deux sous-domaines. Le premier sous domaine: le champ lointain est suffisamment loin de la fondation pour être considéré élastique. Son comportement peut alors être régi par les impédances dynamiques. Le deuxième sous-domaine: le champ proche est quant à lui considéré comme ayant un comportement non-linéaire. Nous allons même jusqu'à considérer qu'il englobe toutes les non-linéarités et hétérogénéités du problème. Ce domaine fini peut être traité par exemple avec la méthode des éléments finis.

Formule proposée pour le coefficient de majoration de la période fondamentale:

Les résultats des travaux de recherches concernant le sujet "interaction sol-structure" [7,8,9,10,11,12,13] montrent que les fréquences de structures soumise aux chargements sismiques sont clairement influencées par ce phénomène. La majorité de ces travaux sont effectuée à l'aide d'une modélisation numérique simplifiée : la structure a été modélisée par des éléments poutres ; l'ensemble sol-fondation a été modélisé à l'aide de 6 ressorts (3 en translation et 3 en rotation) dont les rigidités ont été déterminées à l'aide des expressions proposées dans la littérature [8,11,12,13,14].

On a montré que les formules et les abaques empiriques proposées par différents travaux de recherche concernant le phénomène de l'interaction sol-structure ou celle trouvées dans quelques codes parasismiques internationaux, sont insuffisantes pour déterminer la période de structures tenant compte de l'effet de l'ISS. En plus, dans certains cas, l'écart entre les formules et les mesures atteint 60% [12,13,14,15,16,17,18,19].

Nous allons présenter un panorama rapide des travaux de la thèse de Khalil [8], dont j'étais un membre du jury de la soutenance de cette thèse à l'université de Lille 1 en France au mois de Novembre 2009, surtout son abaque comparé avec d'autre travaux. Le chercheur Khalil a montré que pour certaines configurations (structures rigides sur sol mou), l'influence de l'interaction sol-structure sur la 1ère fréquence de bâtiments peut être

très importante et conduire à une réduction de l'ordre de 70% de la fréquence de bâtiment calculée en assumant un encastrement à la base. Il a effectué des analyses pour différentes configurations de structure en faisant varier les paramètres affectant la fréquence. L'analyse statistique des résultats obtenus a permis la détermination d'un paramètre adimensionnel, appelé "rigidité relative sol-structure K_{ss} ". Un abaque a été construit par Monsieur Khalil [8], cette abaque présente la variation du rapport F/F_{en} en fonction de K_{ss} et en prenant en compte de l'interaction sol-structure, ou F : fréquence de la structure avec ISS ; F_{en} : fréquence de la structure encastree à sa base.

Le paramètre adimensionnel K_{ss} peut être exprimé sous la forme:

$$K_{ss} = \frac{N_o \cdot N_b \cdot \rho \cdot v_s^2 \cdot h^3 \cdot \sqrt{\frac{A}{A_0}}}{N_e \cdot E_p \cdot (I_p)^{3/4}}$$

avec:

- v_s (m / sec): vitesse des ondes de cisaillement dans le sol,
- E_p (N / m²): module d'élasticité du béton,
- I_p (m⁴): moment d'inertie du modèle équivalent (somme des inerties des éléments verticaux d'un seul étage),
- h (m): hauteur d'étage (niveau),
- ρ (kg / m³): masse volumique du sol,
- A (m²): aire de la fondation (moyenne),
- $A_0 = 1$ (m²): aire de référence,
- N_e, N_o et N_b : nombre d'étages, et d'ouvertures du bâtiment dans les directions longitudinale et transversale.

La figure (1) donne une comparaison entre les différentes méthodes: travaux de Khalil [8] (abaque proposé et retenu pour notre travail) avec ceux des Veletsos et Meek [11] et du règlement BSSC [19]. L'abaque proposé par Khalil traite l'influence de l'ISS avec un aspect très facile et aisé, à notre avis, par rapport aux autres expressions proposées dans la littérature [11,19,20].

Nous proposons à présenter la précédente comparaison en terme de la période pour étudier l'influence de l'ISS sur Les spectres de pseudo accélération utilisés dans le dimensionnement et de la vérification des structures. La figure (2) donne cette comparaison et montre la variation du rapport T/T_{en} en fonction de K_{ss} et en prenant en compte de l'interaction sol-structure, ou T : période de la structure avec ISS ; T_{en} : période de la structure encastree à sa base.

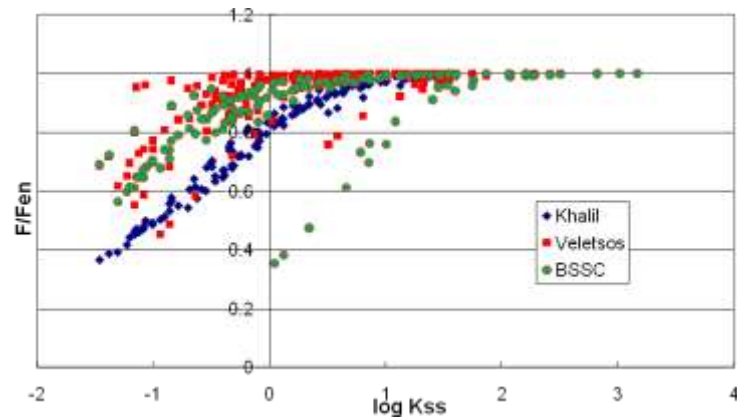


Figure (1): Comparaison de la méthode proposée par Khalil avec la méthode de Veletsos-Meek et le règlement BSSC
Valeurs du rapport F/F_{en} pour différentes configurations

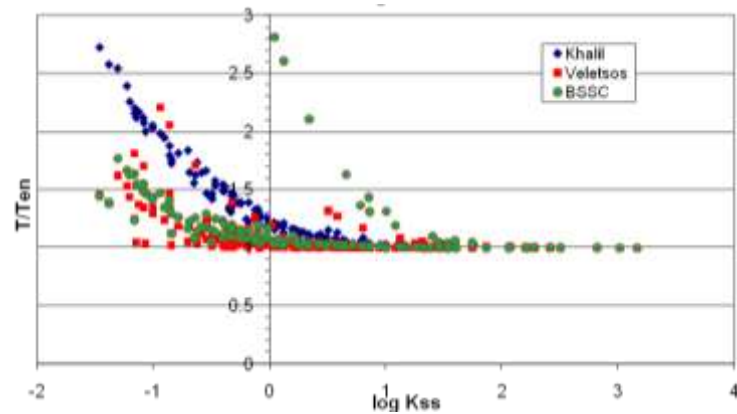


Figure (2): Comparaison de la méthode proposée par Khalil avec la méthode de Veletsos-Meek et le règlement BSSC
Valeurs du rapport T/T_{en} pour différentes configurations

Nous avons étudié les travaux existants dans les littératures [8,9,10,12,13,14,15,16,17,18,19], qui traitent les cas courants et pratiques des structures types bâtiments (limites de variation des valeurs de la période propre) avec l'influence de l'ISS, et à la fin de cette analyse nous sommes réussis à trouver et proposer une formule donnant d'une façon simple la variation de la valeur du coefficient de majoration $\alpha = T/T_{en}$ de la période fondamentale d'une structure soumise à des sollicitations sismiques, en fonction de la notion "rigidité relative sol-structure K_{ss} ", proposée par Khalil [8].

Pour tenir compte des structures courantes exploitables types bâtiments administratifs ou de logements, nous avons limité la variation de la rigidité relative sol-structure K_{ss} , comme le montre la figure (3). La formule proposée est donnée par l'expression suivante:

$$\alpha = \frac{T}{T_{en}} = -0.055(\log K_{ss})^3 + 0.273(\log K_{ss})^2 - 0.430(\log K_{ss}) + 1.235$$

Avec

$$-1.4 \leq \log K_{ss} \leq 1.30$$

$$\alpha = 1 \Leftrightarrow \log K_{ss} > 1.3$$

$$\alpha = 2.4 \Leftrightarrow \log K_{ss} < -1.3$$

Une forte variation du coefficient de majoration pour des valeurs de $\log K_{ss}$ comprises entre -1,3 et +1,3, il varie entre 1.6% et 237% .

On note que pour les structures ayant $\log K_{ss} > 1$, ce coefficient de majoration est proche de 1 (2.3% pour $\log K_{ss}=1$), ce qui signifie que l'influence de l'ISS peut être négligée.

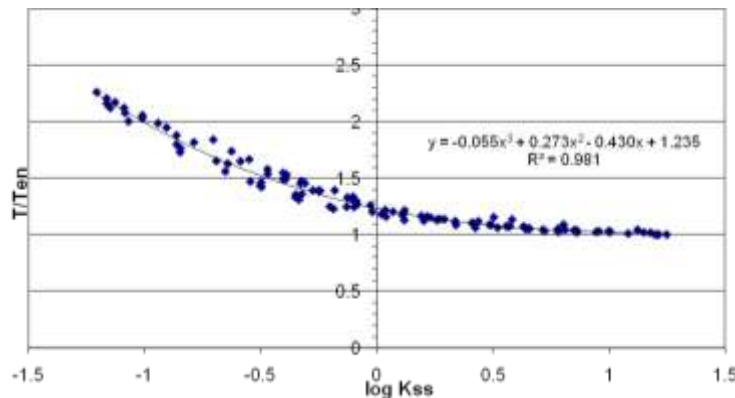


Figure (3): Variation du coefficient de majoration de la période propre en fonction de rigidité relative sol-structure

Influence de l'ISS sur les réponses de bâtiments en zones sismiques:

• Cas d'étude – Caractérisation des bâtiments étudiés

Pour mettre en évidence l'influence significative de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse des structures en zones sismiques - cas de la Syrie, nous allons étudier et analyser les effets de ce phénomène sur les spectres de réponses de quelques types de bâtiments construits en zones sismiques différents, suivant les règles du code parasismique de la Syrie (2004) et ses annexes surtout le deuxième (Actions sismiques 2005). A partir de la détermination des valeurs des périodes fondamentales de ces bâtiments sous l'influence de l'ISS, nous allons construire des spectres de réponses, et déterminer le changement des efforts tranchants aux base des structures type bâtiments (Efforts de rappel ou inertiels à la base), et enfin donner quelques conseils sur ce problème tenant compte des provisions et des recommandations trouvées dans les codes internationaux et dans les littératures scientifiques.

Les figures suivantes montrent quelques exemples représentant bien les structures type bâtiments en Syrie (5 bâtiments courants en Syrie). Ces figures montrent leurs systèmes et éléments porteurs (portiques, murs porteurs ou les deux systèmes). Les Caractéristiques géométriques des éléments structuraux et les caractéristiques mécaniques retenues des matériaux (bétons et sols), les sites et les zones sismiques; pour chaque type, sont classées dans les tableaux ci-joints.

• Influence de l'ISS sur les efforts tranchants à la base

1) Le premier exemple, Figure (4): Bâtiment administratif à 4 étages :

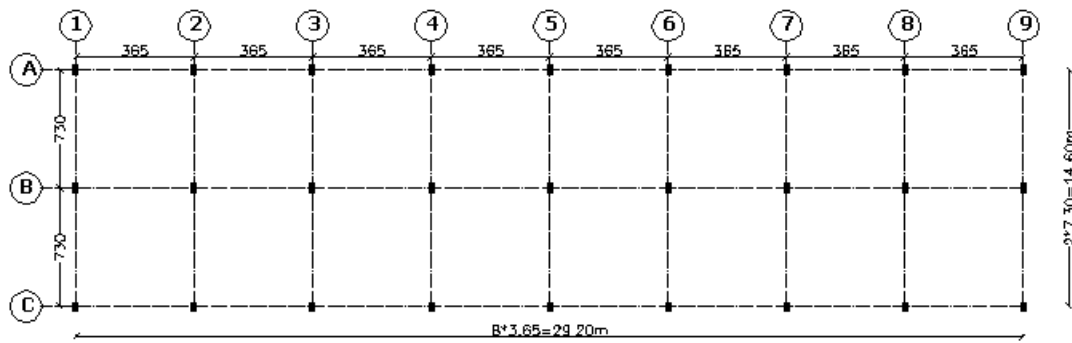


Figure (4): Bâtiment administratif à 4 étages

Caractéristiques générales:

- Bâtiment en béton armé, se trouve en zone sismique (2C).
- Son rôle en cas de séisme, est essentiel, $I = 1.25$
- Système porteur: Portiques en deux direction, $R = 8$.
- $g = 9.81m/sec^2$.

Caractéristiques géométriques:

- Dimensions du bâtiment en sens longitudinal: $A = 8 \times 3.65 = 29.20m$
- Dimensions du bâtiment en sens transversal: $B = 2 \times 7.30 = 14.60m$
- Hauteur du bâtiment: $H = h_n = nh = 4 \times 3.65 = 14.60m$
- Dimensions des poteaux:
 - Poteaux: Axe A & C: $a \times b = 30 \times 60cm$; étages 1 & 2
 - Poteaux: Axe A & C: $a \times b = 30 \times 40cm$; étages 3 & 4
 - poteaux Axe B: $a \times b = 30 \times 60cm$; étages 1 & 2
 - poteaux Axe B: $a \times b = 30 \times 50cm$; étages 3 & 4

• Rigidité du poteau: $k_p = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12Eab^3}{12L^3} = \frac{Eab^3}{L^3} (kN/m)$

• Moment d'inertie: $I_p = \frac{ab^3}{12}, \frac{ba^3}{12} (m^4)$

Propriétés des sites:

- Ressource sismique type C: $\Rightarrow N_a = N_v = 1$; ($2C \Rightarrow Z = 0.25$)

Propriétés des sols d'assise, Tableau (1):

Tableau (1): Propriétés des sols d'assise

Type du sol	v_s (m/sec)	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	C_v	C_a
S_A	1500	4	0.2	0.2
S_B	760	3	0.25	0.25
S_C	360	2.5	0.38	0.29
S_D	180	2	0.47	0.32
S_E	100	1	0.74	0.35

Propriétés du béton:

- $f'_c = 20 \text{ MPa}$
- $E_c = 20000 \text{ MPa}$

Charges:

- $G = DL = 6.70 \text{ kN/m}^2$ (charges permanentes)
- $P = LL = 5.75 \text{ kN/m}^2$ (charges d'exploitation)
- $w_i = 14.6 \times 29.2(G) \Rightarrow w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = 14.6 \times 29.2(6.70) = 2856 \text{ kN}$
- Le poids créant un effort sismique: $W = \sum_{i=1}^4 w_i = 4 \times 2856 = 11424 \text{ kN}$

Période fondamentale du bâtiment en cas de la base encadrée (modèle courant):

- $T_{en} = C_i (h_n)^{3/4} = 0.0731(14.60)^{3/4} = 0.55 \text{ sec}$

Fondation, Tableau (2):**Tableau (2): Propriétés des fondations**

Type du sol	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	Surfac e (m^2)	Hauteu r (cm)
S_A	4	3.75	65
S_B	3	5	65
S_C	2.5	6	65
S_D	2	7.5	70
S_E	1	15	75

Effort tranchant à la base $V(\text{kN})$ avec et sans ISS, Tableau (3) :

$$V = \frac{C_v I}{RT} W ; R = 8 ; I = 1.25 ; W = 11424 \text{ kN}$$

$$V_{\max} = \frac{2.5 C_a I}{R} W$$

$$V_{\min} = 0.11 C_a I W$$

Tableau (3): Efforts tranchants à la base

Type du sol	v_s (m/sec)	T_{en} (sec)	$\log K_{ss}$	$\alpha = \frac{T}{T_{en}}$	T (sec)	V_{en} (kN)	V_{ISS} (kN)	V_{\max} (kN)	V_{\min} (kN)	V_{ISS}/V_{EN}
S_A	1500	0.55	2.35	1	0.55	649	649	893	314	1.00
S_B	760	0.55	2.00	1	0.55	811	811	1116	393	1.00
S_C	360	0.55	1.40	1.00	0.55	1233	1233	1294	456	1.00
S_D	180	0.55	0.84	1.04	0.57	1525	1472	1428	503	0.96
S_E	100	0.55	0.48	1.09	0.60	2402	2202	1562	550	0.92

2) Le deuxième exemple, Figure (5): Bâtiment d'habitation à 10 étages:**Caractéristiques générales:**

- Bâtiment en béton armé, se trouve en zone sismique (3).

- Son rôle: Logement, $I = 1$
- Système porteur: Portiques en deux direction, $R = 8$.
- $g = 9.81m/sec^2$.

Caractéristiques géométriques:

- Hauteur du bâtiment: $H = h_n = nh = 10 \times 3 = 30m$
- Dimensions des poteaux:
 - Poteaux: Axe II & III: $a \times 2a = 50 \times 100cm$
 - Poteaux: Axe I: $a \times a = 50 \times 50cm$
- Rigidité du poteau: $k_p = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12Eab^3}{12L^3} = \frac{Eab^3}{L^3} (kN/m)$
- Moment d'inertie: $I_p = \frac{ab^3}{12}, \frac{ba^3}{12} (m^4)$

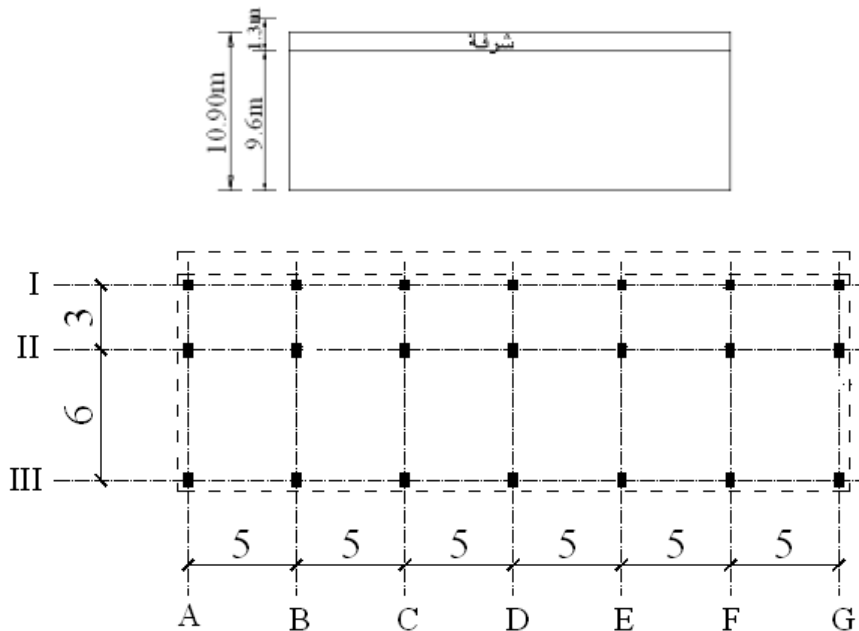


Figure (5): Bâtiment d'habitation à 10 étages

Propriétés des sites:

- Ressource sismique type C: $\Rightarrow N_a = N_v = 1; (3 \Rightarrow Z = 0.30)$

Propriétés des sols d'assise, Tableau (4):

Tableau (4): Propriétés des sols d'assise

Type du sol	v_s (m/sec)	Capacité portante $\bar{\sigma}_{Sall} (kg/cm^2)$	C_v	C_a
S_A	1500	4	0.24	0.24
S_B	760	3	0.30	0.30
S_C	360	2.5	0.45	0.33
S_D	180	2	0.54	0.36
S_E	100	1	0.84	0.36

Propriétés du béton:

- $f'_c = 20MPa$
- $E_c = 21000MPa$

Charges:

- Le poids créant un effort sismique: $W = \sum_{i=1}^{10} w_i = 10 \times 2660 = 26600 kN$

Période fondamentale du bâtiment en cas de la base encastrée (modèle courant):

- $T = C_i (h_n)^{3/4} = 0.0731(30)^{3/4} = 0.94 sec$

Fondation, Tableau (5):

Tableau (5): Propriétés des fondations

Type du sol	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	Surfac e (m^2)	Hauteu r (cm)
S_A	4	7	90
S_B	3	9.33	90
S_C	2.5	11.20	90
S_D	2	14	90
S_E	1	28	100

Effort tranchant à la base $V(kN)$ avec et sans ISS, Tableau (6):

$R = 8 ; I = 1 ; W = 26600 kN$

Tableau (6): Efforts tranchants à la base

Type du sol	$v_s (m/sec)$	$T_{en} (sec)$	$\log K_{ss}$	$\alpha = \frac{T}{T_{en}}$	$T (sec)$	$V_{en} (kN)$	$V_{ISS} (kN)$	$V_{max} (kN)$	$V_{min} (kN)$	V_{ISS} / V_{EN}
S_A	1500	0.94	1.40	1	0.94	849	849	1995	702	1.00
S_B	760	0.94	0.87	1.031359	0.97	849	823	2494	878	0.97
S_C	360	0.94	0.26	1.1406555	1.07	1592	1398	2743	966	0.88
S_D	180	0.94	-0.29	1.3861099	1.3	1910	1381	2993	1053	0.72
S_E	100	0.94	-0.65	1.6479649	1.55	2971	1802	2993	1053	0.61

3) Le troisième exemple, Figure (5): Bâtiment administratif à 9 étages:

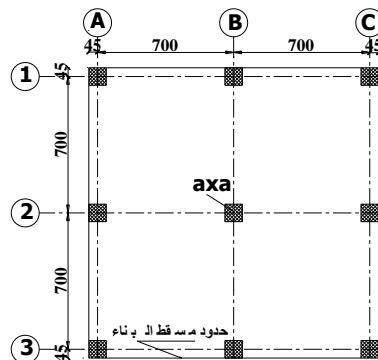


Figure (5): Bâtiment

administratif à 9 étages

Caractéristiques générales:

- Bâtiment en béton armé, se trouve en zone sismique (2B).
- Son rôle en cas de séisme, est essentiel, $I = 1.25$
- Système porteur: Portiques en deux direction, $R = 8$.
- $g = 9.81m/sec^2$.

Caractéristiques géométriques:

- Hauteur du bâtiment: $H = h_n = nh = 9 \times 4.5 = 40.5m$
- Dimensions des poteaux:
- Poteaux: $a \times a = 85 \times 85cm$

• Rigidité du poteau: $k_p = \frac{12EI}{L^3} = \frac{12Eab^3}{12L^3} = \frac{Eab^3}{L^3} (kN/m)$

• Moment d'inertie: $I_p = \frac{ab^3}{12}, \frac{ba^3}{12} (m^4)$

Propriétés des sites:

- Ressource sismique type C: $\Rightarrow N_a = N_v = 1; (2B \Rightarrow Z = 0.20)$

Propriétés des sols d'assise, Tableau (7):

Tableau (7): Propriétés des sols d'assise

Type du sol	v_s (m/sec)	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	C_v	C_a
S_A	1500	4	0.16	0.16
S_B	760	3	0.20	0.20
S_C	360	2.5	0.32	0.24
S_D	180	2	0.40	0.28
S_E	100	1	0.64	0.34

Propriétés du béton:

- $f'_c = 25MPa$
- $E_c = 25000MPa$

Charges:

- Le poids créant un effort sismique: $W = \sum_{i=1}^9 w_i = 9 \times 2000 = 18000kN$

Période fondamentale du bâtiment en cas de la base encastrée (modèle courant):

• $T = C_t (h_n)^{3/4} = 0.0731(9 \times 4.5)^{3/4} = 1.17 sec$

Fondation, Tableau (8):

Tableau (8): Propriétés des fondations

Type du sol	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	Surface (m^2)	Hauteur (cm)
S_A	4	8	90
S_B	3	10.3	90

S_C	2.5	12.8	90
S_D	2	16	90
S_E	1	32	100

Effort tranchant à la base $V(kN)$ avec et sans ISS, Tableau (9):

$R = 8 ; I = 1.25 ; W = 18000kN$

Tableau (9): Efforts tranchants à la base

Type du sol	v_s (m/sec)	T_{en} (sec)	$\log K_{ss}$	$\alpha = \frac{T}{T_{en}}$	T (sec)	V_{en} (kN)	V_{ISS} (kN)	V_{max} (kN)	V_{min} (kN)	V_{ISS}/V_{EN}
S_A	1500	1.17	1.60	1	1.17	385	385	1125	396	1.00
S_B	760	1.17	1.07	1.0200791	1.19349	481	473	1406	495	0.98
S_C	360	1.17	0.46	1.0896292	1.27487	769	709	1688	594	0.92
S_D	180	1.17	-0.09	1.277723	1.49494	962	750	1969	693	0.78
S_E	100	1.17	-0.45	1.4914293	1.74497	1538	1034	2391	842	0.67

4) **Le quatrième exemple, Figure (6): Bâtiment d'habitation à 5 étages:**

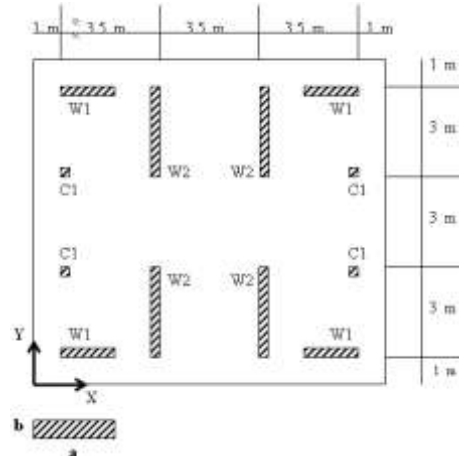


Figure (6) : Bâtiment d'habitation à 5 étages:

Caractéristiques générales:

- Bâtiment en béton armé, se trouve en zone sismique (3).
- Facteur d'importance: $I = 1$
- Système porteur: poteaux et murs porteurs: $R = 4.5$.
- $g = 9.81m/sec^2$.

Caractéristiques géométriques:

- Hauteur du bâtiment: $H = h_n = nh = 5 \times 3 = 15m$
- Dimensions des poteaux:
 - Poteaux: $a \times a = 40 \times 40cm$
 - Mur W1: $t \times h = 20 \times 200cm$

▪ Mur W2: $h \times t = 300 \times 20 \text{ cm}$

• Moment d'inertie: $I_p = \frac{ab^3}{12} (m^4)$

Propriétés des sites:

• Ressource sismique type C: $\Rightarrow N_a = N_v = 1; (3 \Rightarrow Z = 0.30)$

Propriétés des sols d'assise, Tableau (10):

Tableau (10): Propriétés des sols d'assise

Type du sol	v_s (m/sec)	Capacité portante $\bar{\sigma}_{Sall} (kg/cm^2)$	C_v	C_a
S_A	1500	4	0.24	0.24
S_B	760	3	0.30	0.30
S_C	360	2.5	0.45	0.33
S_D	180	2	0.54	0.36
S_E	100	1	0.84	0.36

Propriétés du béton:

• $f'_c = 28 \text{ MPa}$

• $E_c = 32000 \text{ MPa}$

Charges:

• Le poids créant un effort sismique: $W = \sum_{i=1}^9 w_i = 5 \times 1100 = 5500 \text{ kN}$

Période fondamentale du bâtiment en cas de la base encastree (modèle courant):

• $T = C_t (h_n)^{3/4} = 0.0488 (15)^{3/4} = 0.37 \text{ sec}$

Fondation, Tableau (11):

Tableau (11): Propriétés des fondations

Type du sol	Capacité portante $\bar{\sigma}_{Sall} (kg/cm^2)$	Surface (m^2)	Hauteur (cm)
S_A	4	1.9	50
S_B	3	2.5	50
S_C	2.5	3	50
S_D	2	3.75	50
S_E	1	7.5	60

Effort tranchant à la base $V(kN)$ avec et sans ISS, Tableau (12):

$R = 4.5; I = 1; W = 5500 \text{ kN}$

Tableau (12): Efforts tranchants à la base

Type du sol	v_s (m/sec)	T_{en} (sec)	$\log K_{ss}$	$\alpha = \frac{T}{T_{en}}$	T (sec)	V_{en} (kN)	V_{ISS} (kN)	V_{max} (kN)	V_{min} (kN)	V_{ISS}/V_{EN}
S_A	1500	0.37	1.27	1.0165568	0.38	793	772	733	145	0.97
S_B	760	0.37	0.74	1.0439489	0.39	991	940	917	182	0.95
S_C	360	0.37	0.13	1.1832052	0.44	1486	1250	1008	200	0.84

S_D	180	0.37	-0.42	1.4695778	0.54	1784	1222	1100	218	0.69
S_E	100	0.37	-0.78	1.7650469	0.65	2775	1579	1100	218	0.57

5) Le cinquième exemple, Figure (7): Bâtiment d'habitation à 10 étages:

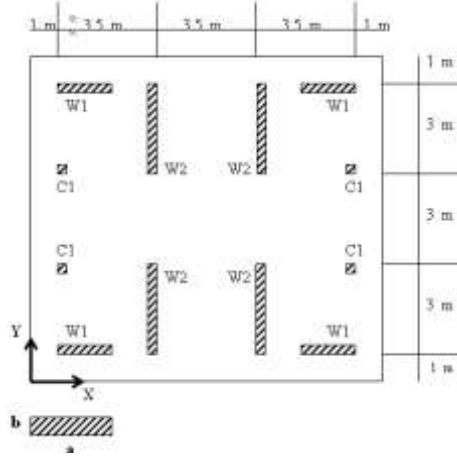


Figure (7): Bâtiment d'habitation à 10 étages:

Caractéristiques générales:

- Bâtiment en béton armé, se trouve en zone sismique (3).
- Facteur d'importance: $I = 1$
- Système porteur: poteaux et murs porteurs: $R = 4.5$.
- $g = 9.81m/sec^2$.

Caractéristiques géométriques:

- Hauteur du bâtiment: $H = h_n = nh = 10 \times 3 = 30m$
- Dimensions des poteaux:
 - Poteaux: $a \times a = 60 \times 60cm$
 - Mur W1: $t \times h = 20 \times 200cm$
 - Mur W2: $h \times t = 300 \times 20cm$

- Moment d'inertie: $I_p = \frac{ab^3}{12} (m^4)$

Propriétés des sites:

- Ressource sismique type C: $\Rightarrow N_a = N_v = 1$; ($3 \Rightarrow Z = 0.30$)

Propriétés des sols d'assise, Tableau (13):

Tableau (13): Propriétés des sols d'assise

Type du sol	v_s (m/sec)	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	C_v	C_a
S_A	1500	4	0.24	0.24
S_B	760	3	0.30	0.30
S_C	360	2.5	0.45	0.33
S_D	180	2	0.54	0.36
S_E	100	1	0.84	0.36

Propriétés du béton:

- $f'_c = 28 MPa$
- $E_c = 32000 MPa$

Charges:

- Le poids créant un effort sismique: $W = \sum_{i=1}^9 w_i = 10 \times 1100 = 11000 kN$

Période fondamentale du bâtiment en cas de la base encastrée (modèle courant):

- $T = C_t (h_n)^{3/4} = 0.0488(30)^{3/4} = 0.63 sec$

Fondation, Tableau (14):

Tableau (14)): Propriétés des fondations

Type du sol	Capacité portante $\bar{\sigma}_{sall} (kg/cm^2)$	Surface (m^2)	Hauteur (cm)
S_A	4	3.8	60
S_B	3	5	60
S_C	2.5	6	60
S_D	2	7.5	60
S_E	1	15	70

Effort tranchant à la base $V(kN)$ avec et sans ISS, Tableau (15):

$R = 4.5; I = 1; W = 11000 kN$

Tableau (15)): Efforts tranchants à la base

Type du sol	$v_s (m/sec)$	$T_{en} (sec)$	$\log K_{ss}$	$\alpha = \frac{T}{T_{en}}$	$T (sec)$	$V_{en} (kN)$	$V_{ISS} (kN)$	$V_{max} (kN)$	$V_{min} (kN)$	V_{ISS} / V_{EN}
S_A	1500	0.63	1.12	1.0187075	0.64179	931	917	1467	290	0.98
S_B	760	0.63	0.58	1.0660135	0.67159	1164	1095	1833	363	0.94
S_C	360	0.63	-0.03	1.2460599	0.78502	1746	1392	2017	399	0.80
S_D	180	0.63	-0.58	1.5860998	0.99924	2095	1320	2200	436	0.63
S_E	100	0.63	-0.94	1.9249584	1.21272	3259	1697	2200	436	0.52

Résultats et discussion

Les résultats présentés dans notre travail permettent de mieux comprendre le phénomène ISS se développant durant un mouvement de terre. ils montrent que la période fondamentale de la structure est une fonction de la rigidité relative, et l'on peut constater que la variation du coefficient de majoration de la période avec cette rigidité relative prene une courbe d'allure bien claire suivant une formule bien déterminé. Et par conséquent, Les résultats obtenus à partir des analyses effectuées sur quelques structures de type bâtiment, très courant en Syrie, montrent que les efforts tranchants à la base de la structure (efforts de rappel V) sont influencés par le phénomène ISS, et liés à la rigidité relative sol-structure. On peut remarquer que, pour ces types de bâtiments, La force sismique équivalente à la base d'une structure est diminuée en tenant compte du phénomène de l'ISS, par rapport au cas d'encastrement à la base. Or, on peut dire que l'ISS

est dans le sens de la sécurité; pour des cas étudiés; structure de type bâtiment; entre 4 et 12 étages.

En plus, les résultats montrent que l'on peut arriver à des cas où l'effort de rappel (V) dépasse la valeur maximale déterminée par le code syrien (V_{\max}), malgré le rôle positif fourni par l'ISS.

La figure (8) montre l'évolution du coefficient de diminution de l'effort tranchant (V_{ISS}/V_{EN}) en fonction de la rigidité relative (K_{ss}), avec V_{ISS} : effort tranchant avec ISS, et V_{EN} : effort tranchant avec base encastrée.

On note que l'allure générale de cette courbe ressemble très bien celle de la variation du rapport de la fréquence fondamentale des structures type bâtiment (f_{ISS}/f_{EN}) avec la rigidité relative (K_{ss}).

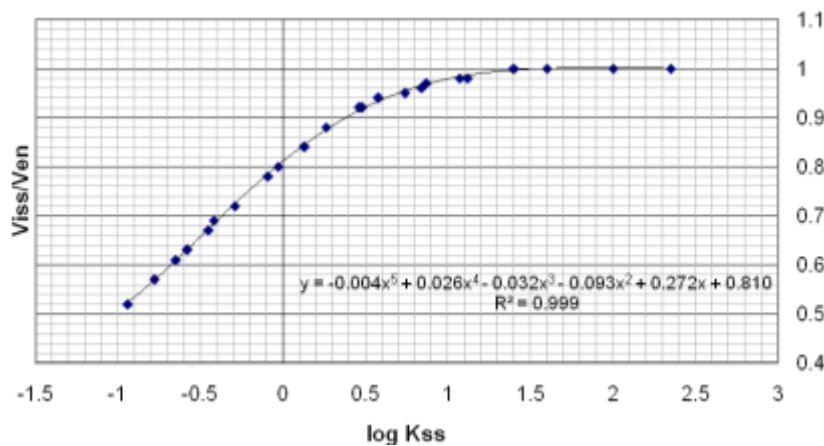


Figure (8): Evolution du coefficient de diminution de l'effort tranchant à la base en fonction de rigidité relative sol-structure

On peut noter que pour des structures ayant $\log K_{ss} > 1$, ce coefficient de diminution de l'effort tranchant (V_{ISS}/V_{EN}) est proche de 1, par conséquent, l'influence de l'ISS peut être négligée.

Ce coefficient paraît très important et significatif pour des valeurs de $\log K_{ss} < 0$, la réduction de l'effort tranchant à la base d'une structure arrive à 50% lorsque $\log K_{ss} \approx -1$.

Enfin, nous signalons que la majorité des codes parasismiques internationaux fixe une valeur limitant la réduction de l'effort tranchant, due à l'effet de l'ISS, cette valeur est de l'ordre de 25%. Ce la correspond à une valeur de $\log K_{ss} = -0.2$ suivant notre étude.

Conclusions:

Les résultats de cette étude montrent que l'ISS a une influence très importante sur la réponse des bâtiments soumis aux excitations sismiques. Cette influence se traduit par une augmentation de la période fondamentale de la structure, et cela diminue l'effort tranchant à la base de la structure lorsque l'on utilise la méthode de calcul dite équivalente statique dans le dimensionnement ou l'évaluation (un effet bénéfique).

Enfin, Pour conclure sur l'interaction sol structure, il faut noter que si, dans la grande majorité des cas elle est bénéfique ou négligeable (types bâtiments traités dans notre

étude), il existe des cas pathologiques où elle a un effet néfaste en particulier pour une structure relativement légère reposant sur une fondation massive dont la période fondamentale est proche de celle de la structure légère.

Dans le prochain article, nous allons présenter l'influence de l'ISS sur le spectre d'accélération utilisé en Syrie dans le dimensionnement et l'évaluation des structures (réponse élastique).

Bibliographie:

- [1] BIELAK, J. (1975). *Dynamic Behavior of Structures with Embedded Foundations*. J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn. Vol.3, N° 1, 1975, 259–274.
- [2] GAZETAS, G. & MYLOAKIS, G. *Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues*, Emerging Issues Paper, Geotechnical Special Publication No 75, ASCE, Vol. III, No. 75, 1998, 1119-1174.
- [3] GAZETAS, G. & MYLOAKIS, G. *Seismic Soil-Structure Interaction: Beneficial or Detrimental*. J. Earthquake Engrg., Vol. 4, N° 3, 2000, 277-301.
- [4] SHAKIB, H. & FULADGAR, A. *Dynamic Soil-Structure Interaction Effects on the Seismic Response of Asymmetric Buildings*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 24, N° 4, 2004, 379–388.
- [5] PECKER, A. *Dynamique des sols*. Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1984, 336.
- [6] WOLF, J. P. *Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain*. Prentice Hall International Series, Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- [7] BETBERDER, M. J. *Génie Parasismique V1, V2 et V3*. Lavoisier, Paris, 2003.
- [8] KHALIL, L. *Influence de l'Interaction Sol-Structure sur le Comportement Sismique des Bâtiments: Analyse dans les Domaines Linéaire et non Linéaire*. Thèse de Doctorat, LML, Université Lille 1, France, 2009.
- [9] GRANGE, S. *Modélisation Simplifiée 3D de l'Interaction Sol-Structure : Application au Génie Parasismique*. Thèse de Doctorat, Laboratoire Sols, Solides, Structures - Risques (3S-R), Institut Polytechnique de Grenoble, France, 2008.
- [10] CREMER, C. *Modélisation du Comportement non Linéaire des Fondations Superficielles sous Séismes*. Thèse de Doctorat, LMT Cachan - ENS, Cachan, France, 2001.
- [11] VELETSOS, A. S. & MEEK, J.W. *Dynamic Behavior of Building-Foundation Systems*. J. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 3, N° 2, 1974, 121–138.
- [12] BORIS, J., SASHI, K., & FENG, X. *Influence of Soil-Foundation-Structure Interaction on Seismic Response of the I-880 Viaduct*. J. Struct. Engrg., Vol. 26, N° 2, 2004, 391- 402.
- [13] AVILES, J. & MARTHA, S. *Effective Periods and Dampings of Building Foundation Systems Including Seismic Wave Effects*. J. Struct. Engrg., Vol. 24, N° 5, 2002, 553-562.
- [14] GAZETAS, G. *Formulas and Charts for Impedances of Surface and Embedded Foundations*. Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 117, N° 9, 1991, 1363 –1381.
- [15] MYLONAKIS, G.; NIKOLAOU, S., GAZITAS, G. *Footings under Seismic Loading: Analysis and Design Issues with Emphasis on Bridge Foundations*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 26, N° 9, 2006, 824–853.

- [16] ATC-3. *Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations of Buildings: A Cooperative Effort with the Design Profession, Building Code Interests, and the Research Community*. National Bureau of Standards, Washington DC, 1978.
- [17] NEHRP. *Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and other Structures*. Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1997.
- [18] UBC. *Uniform Building Code (1997), International Conference of Building officials*. Whittier, U.S.A. 1997.
- [19] BSSC. Building Seismic Safety Council, *The 2003 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings and other Structures*. Part 2: Commentary (FEMA 450), 2003.
- [20] MARAVAS, A.; MYLONAKIS, G. & KARABALIS, L. *Dynamics Characteristics of Structures on Piles and Footings*. 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering June. Paper N^o. 1672, June 25-28, 2007.