

# **Chapitre 7**

L'interaction sol-structure

## **VII. 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 de 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 associée 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  $\delta$ . 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.

### **VII.1. Description du phénomène**

Afin d'illustrer les principales caractéristiques de l'interaction sol structure, on compare la réponse à une excitation sismique d'une structure fondée directement sur le substratum rocheux (considéré comme infiniment rigide par rapport à la structure) à celle de la même structure fondée sur une couche de sol souple (figure 1.1(a)). Par souci de simplicité, on considère seulement le cas d'une onde SH en incidence verticale et d'une fondation rigide. Ce cas suffit à appréhender l'ensemble du phénomène ; c'est aussi le plus étudié en ingénierie parasismique courante. On ne donne à ce stade qu'une description qualitative de la façon dont l'interaction entre le sol et la structure va modifier la réponse dynamique de la structure

### **VII.2. Modélisation de l'interaction sol-structure**

#### **VII.2.1. Définition de l'interface sol-structure**

D'un point de vue géométrique, l'**interface sol-structure** peut être définie comme étant une fine zone de sol qui se forme entre la surface de la structure et le volume de sol l'entourant.

Ainsi, la couche d'interface permet le transfert du chargement de la structure vers le sol. Elle est donc **le lieu de transmission des contraintes et des déformations**

#### **VII.2.2. 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)

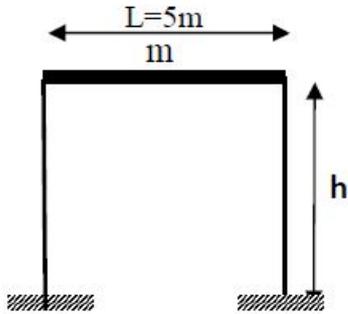


Figure.1. Modèle sans prise en compte de l'ISS

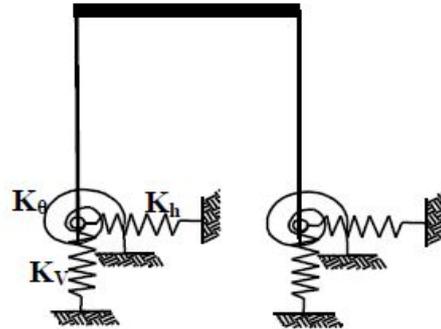


Figure .2. Modèle tenant en compte de l'ISS

**VII.3. Modèle du sol :**

L'interaction avec le sol est modélisée par l'intermédiaire des ressorts élastiques. Les coefficients de rigidité sont calculés pour chaque direction sismique (horizontal, vertical et rotation). Ils sont donnés par les formules suivantes (Newmark & Rosembueth 1971) :

Tableau VII.1 : caractéristiques mécaniques du système étudié

	Masse volumique $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson $\nu$	Rigidité à la flexion EI (KN.m <sup>2</sup> )
Sol	20	10	0,3	
Portique	24,5	32000	0,2	43200

- Translation verticale : 
$$K_v = \frac{G_s}{(1-\nu)} \beta_z \sqrt{A}$$
- Translation horizontale: 
$$K_h = 2(1+\nu)G_s \beta_x \sqrt{A}$$
- Rotation : 
$$K_\theta = \frac{1+\nu}{4} G_s \beta_x (a^2 + b^2) \sqrt{A}$$

✓ a et b: Dimensions parallèle et perpendiculaire à la direction du séisme; G : Module de cisaillement du sol;  $\beta_x$  et  $\beta_\theta$ : paramètres dépendant de la proportion des dimensions de la fondation (L/B).

Avec:

$L/B = 1$  et ( $\beta_x = 1, \beta_v = 2.16, \beta_\phi = 0.5$ )

$L/B = 2$  et ( $\beta_x = 0.94, \beta_v = 2.2, \beta_\phi = 0.6$ )

$L/B = 4$  et ( $\beta_x = 1, \beta_v = 2.4, \beta_\phi = 0.79$ )

Tableau VII.2 : RUSULTA DES RAIDEURS DES RESSORTS :

	Semelle isolé	Radai général
$k_v$	14,21	84,10
$k_h$	11,98	358,23
$k_\Theta$	2,15	6802,39

Pour démontrer les différences engendrées par le phénomène d'interaction sol-structure au niveau des fondations, nous avons effectué le design des semelles sans considéré l'interaction sol structure dans un premier temps. Nous avons par la suite soumis les mêmes semelles à l'approche transitoire et à l'approche permanente. Le tableau 2 présente les résultats de cette analyse. On y retrouve le nom du modèle, la combinaison qui a contrôlé lors du design, la pression de contact sous la semelle, le tassement Les tableaux suivants (3-4-5) présentent les résultats obtenus par l'analyse trois type des structures identiques ne diffèrent entre elle que par le type de fondation : la première structure avec des encastremets c.-à-d. sans l'interaction sol structure la deuxième avec des semelles isolées et nous prenons l'interaction sol fondation par des ressorts voir figure ci-dessus et la troisième structure repose sur un radier général ,aussi nous prenons le phénomène de l'interaction sol structure par la même manière précédente (des ressorts

Tableau .VII. 3 : les résultats des déplacements et des rotations des semelles encastrees (sans interaction sol structure)

N° nœud En SAP	semelle	U1	U2	U3	R1	R2	R3
89	S1	0	0	0	0	0	0
25	S2	0	0	0	0	0	0
67	S3	0	0	0	0	0	0
121	S4	0	0	0	0	0	0
153	S5	0	0	0	0	0	0
145	S6	0	0	0	0	0	0
129	S7	0	0	0	0	0	0
137	S8	0	0	0	0	0	0
105	S9	0	0	0	0	0	0
41	S10	0	0	0	0	0	0
9	S11	0	0	0	0	0	0
73	S12	0	0	0	0	0	0
65	S13	0	0	0	0	0	0
81	S14	0	0	0	0	0	0

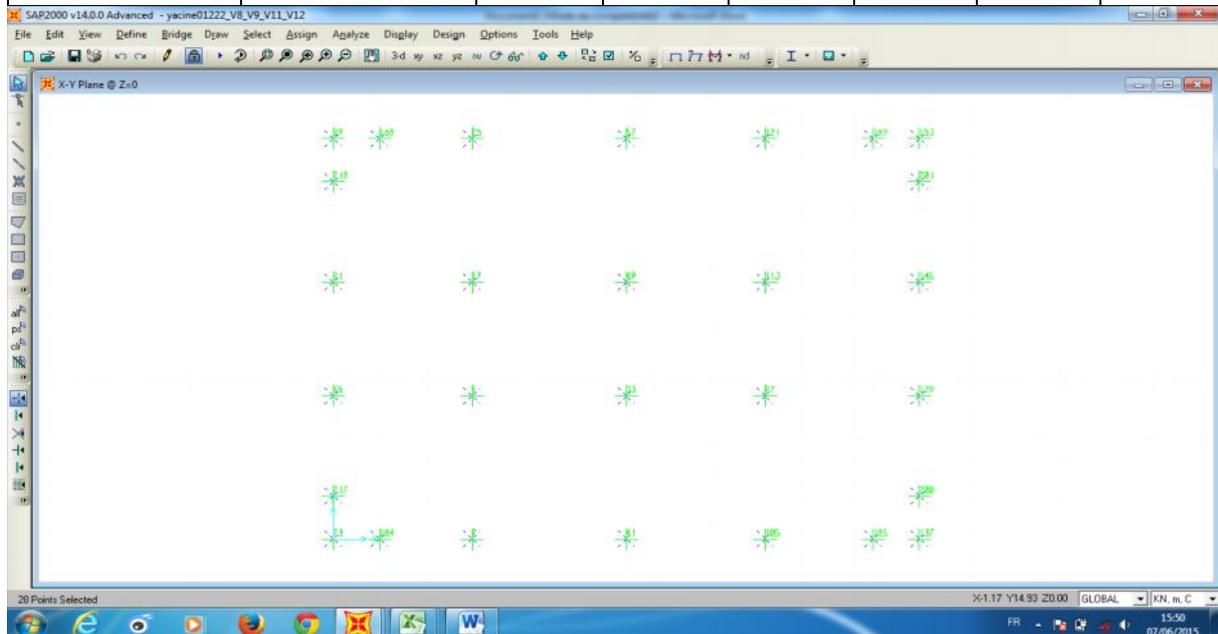


Figure.VII.3: Vue en plan au niveau des semelles des semelles encastées (sans interaction sol structure) de la première partie

Tableau VII.4 : les résultats des déplacements et des rotations du Radier général

N° nœud En SAP	La semelle	U1	U2	U3	R1	R2	R3
89	S1	0	0	0.000000273	-0.000071	- 0.000001977	0
25	S2	0	0	0	0	0	0
67	S3	0	0	-0.000186	0.000122	0.000118	0
121	S4	0	0	-0.000308	0.000001045	0.000108	0
153	S5	0	0	-0.000301	0.000147	0.000037	0
145	S6	0	0	-0.000248	-8.919E-20	-0.00006	0
129	S7	0	0	-0.000082	0.000153	0.000075	0
137	S8	0	0	-0.000153	-0.000301	0.000074	0
105	S9	0	0	-0.000308	-0.000001045	0.000108	0
41	S10	0	0	0	0	0	0
9	S11	0	0	0	0	0	0
73	S12	0	0	-0.000365	-0.000226	-0.000034	0
65	S13	0	0	-0.00025	-0.000014	0.000131	0
81	S14	0	0	-0.000218	-0.000148	-0.000147	0

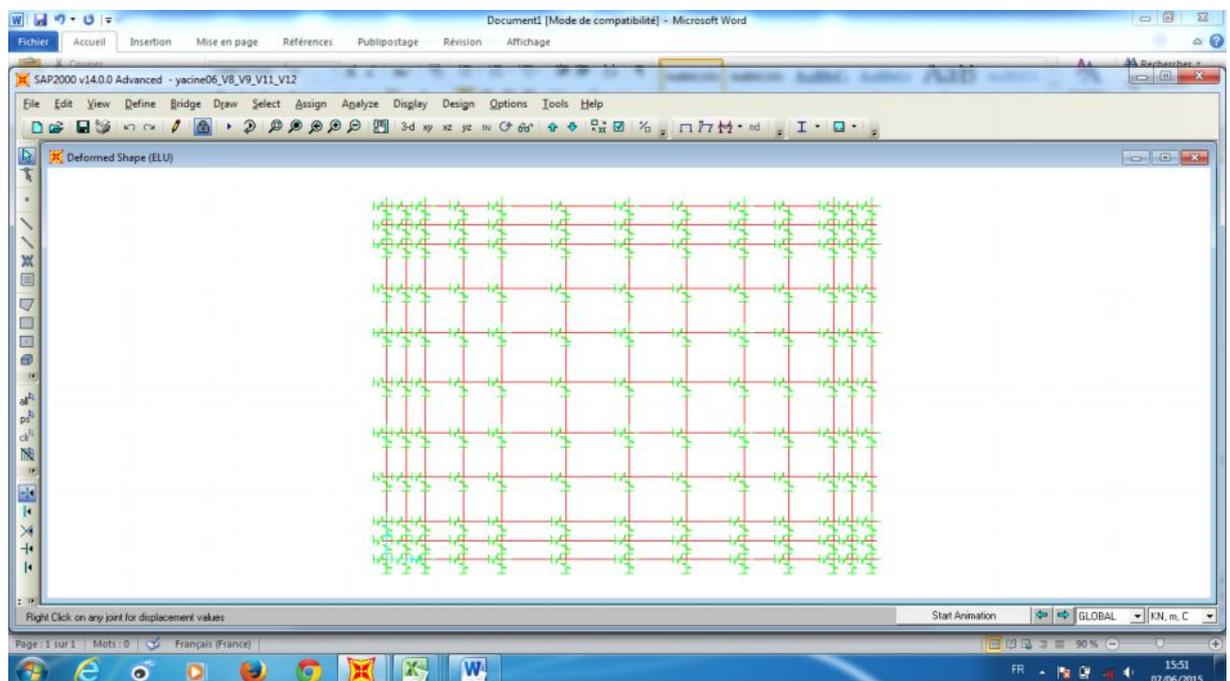


Figure.VII.4 : Vue en plan au niveau du radier général  
Tableau. VII.5 :les résultats des déplacements et des rotations des  
semelles isolées

N° nœud En SAP	semelle	U1	U2	U3	R1	R2	R3
89	S1	1.951E-20	1.538E-20	0	0	0	0
25	S2	1.951E-20	1.111E-20	0	0	0	0
67	S3	1.441E-20	1.753E-20	0	0	0	0
121	S4	0	1.538E-20	0	0	0	0
153	S5	1.951E-20	0	0	0	0	0
145	S6	3.593E-20	0	0	0	0	0
129	S7	1.473E-20	3.061E-20	0	0	0	0
137	S8	1.524E-20	0	0	0	0	0
105	S9	1.182E-20	1.538E-20	0	0	0	0
41	S10	1.18E-20	1.111E-20	0	0	0	0
9	S11	1.524E-20	1.111E-20	0	0	0	0
73	S12	1.524E-20	1.538E-20	0	0	0	0
65	S13	1.473E-20	1.883E-20	0	0	0	0
81	S14	3.593E-20	3.061E-20	0	0	0	0

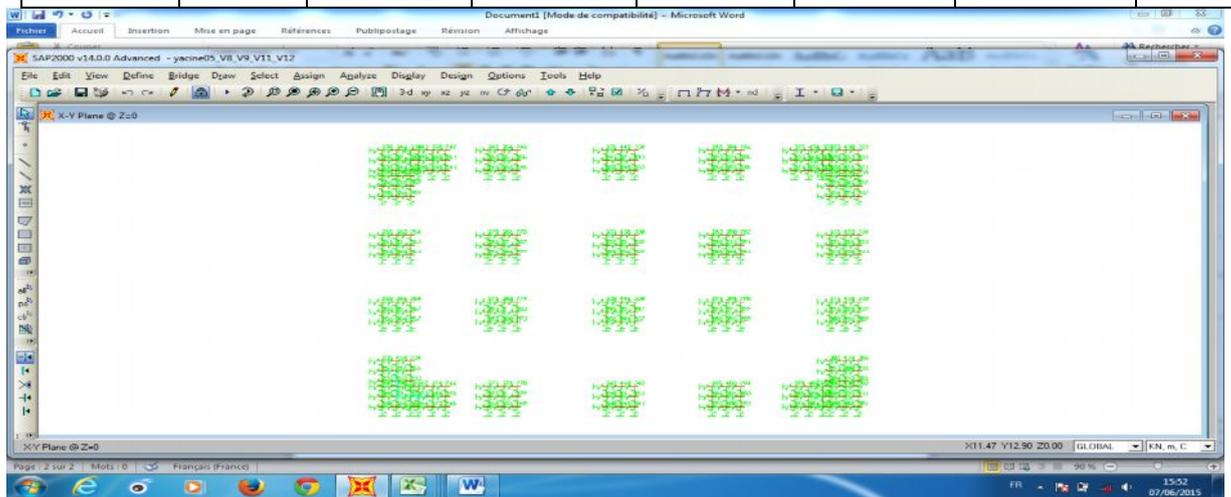


Figure. VII.5 : Vue en plan au niveau des semelles isolées

Tableau V II.6 : Comparaison des résultats des déplacements suivants x

	U1ou (Ux)		
	Isolée-radier	Isolée-encastree	encastree-radie
s1	1.951E-20	1.951E-20	0
s6	3.593E-20	3.593E-20	0
s14	3.593E-20	3.593E-20	0

Tableau VII.7 : Comparaison des résultats des déplacements suivants Y

	U2		
	Isolé-radie	Isolé- Encastre	Encastre -radie
s1	1.538E-20	1.538E-20	0
s6	0	0	0
s14	3.061E-20	3.061E-20	0

Tableau VII.8 : Comparaison des résultats des déplacements suivants Z

	U3		
	Isolé-radie	Isolé- Encastre	Encastre -radie
s1	0.000000273	0	0.000000273
s6	-0.000248	0	-0.000248
s14	-0.000218	0	-0.000218

Tableau.VII.9. de rotation suivent X

	R1		
	Isolé-radie	Isolé- Encastre	Encastre -radie
s1	-0.000071	0	-0.000071
s6	-8.919E-20	0	-8.919E-20
s14	-0.000148	0	-0.000148

Tableau.VII.10. de rotation suivent Y

	R2

	Isolé-radie	Isolé- Encastre	Encastre -radie
s1	-0.000001977	0	-0.000001977
s6	-0.00006	0	-0.00006
s14	-0.000147	0	-0.000147

Tableau.VII.11. de rotation suivant Z

	R3		
	Isolé-radie	Isolé-san iss	San iss-radie
s1	0	0	0
s6	0	0	0
s14	0	0	0

Les tableaux ci-dessus présentent l'influence du phénomène de l'interaction sol structure .il est vu clairement que le déplacement et rotation de la structure seront changés en fonction de la nature de la fondation (cas de prend en compte la présence du sol) et ils sont nuls dans le cas de l'encastrement.

#### **VII.4. Conclusion**

Ces résultats montrent que la majorité des fissures (fissures dans les éléments de maçonnerie non armée en particulier) apparus dans nos structures sont provoqué par ce phénomène (un tassement différentiel du bâti) surtout sous les charges hydromécaniques.

Cette étude présenté dans ce travail a permis de mettre en évidence les différences dans la redistribution des efforts internes suite à une analyse avec ou sans interaction sol-structure dans un des cadres de la structure.

Cette étude à démontrée que le fait de considérer les tassements différentiels comme charges transitoires équivalait à ne pas considérer les tassements du tout puisque qu'aucune différence ne fut notée entre les analyses sans interaction.