



L'évaluation fréquentielle du comportement de la réponse structurelle de type bâtiment en béton armé sous l'effet de l'interaction sol-structure (The evaluation of the frequency behavior of the structural response of reinforced concrete building type under the influence of soil-structure interaction)

Taoufik TBATOU^{1*}, Mohamed ROUGUI²

¹ Structure LEME de l'EST, Salé – CED de l'EMI, Rabat, Université Mohammed V- Agdal, Rabat-Maroc

² Structure LEME de l'EST, Salé, Université Mohammed V-Agdal, Rabat-Maroc

Received 31 Dec 2013, Revised 26 Feb 2014, Accepted 26 Feb 2014

* Corresponding author: Email: tbatou.taoufik@gmail.com

Abstract

The seismic response of structures of reinforced concrete building types, linked to several key parameters, including soil and structure properties, which explains the interaction between the structure and the supporting environment. In fact, the most radical procedure to avoid the worry of the soil-structure interaction is to consider the structure perfectly fixed at the base; this assumption is not valid only if the subgrade is less deformable vis-à-vis the structure, as the case of a rigid construction on rocky ground. In addition, this article gives a determination of the fundamental frequency of structures of reinforced concrete building types, taking into account the soil structure interaction (SSI) in the field of modelisation's elastic behavior of ISS. Statistical analysis of the modeling results of different structure characteristics, of site categories proposed by the new Moroccan seismic code and the wide range of geometries of the buildings, has led to the determination of a simplified expression of the frequency's equation of the structure (F_{int}) as a function of the characteristics of : soil, structure and design of the regular building.

Keywords: Seismic response, Frequency, Soil-structure interaction, Regular building, Fixed base.

Résumé

La réponse sismique des structures de type bâtiment en béton armé, est liée à plusieurs paramètres déterminants, tels que les propriétés du sol et de la structure, Ce qui explique l'interaction entre la structure et le milieu porteur. Cependant, la procédure la plus radicale pour ignorer l'interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encastree à la base. Cette hypothèse est d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure, comme le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux. L'analyse statistique des simulations numérique par la modélisation mixte des différentes caractéristiques de la structure, pour différentes de site proposées par le nouveau code parasismique marocain et de large gamme de la géométrie des bâtiments, nous a permis de déterminer une équation simplifiée fréquentielle de la structure (F_{int}) en fonction des caractéristiques du sol dans le domaine élastique, de la structure et de la conception du bâtiment régulière.

Mots clés : Réponse sismique, Fréquence, Interaction sol-structure, Bâtiment régulière, Base fixe.

1. Introduction

Les règlements parasismiques, du type RPS du Maroc [1], utilisent généralement la fréquence fondamentale des bâtiments pour décrire leurs comportements à charges sismiques. Ce paramètre est souvent déterminé par des formules empiriques, qui ne tiennent généralement pas compte de la souplesse du sol, ce qui pourrait affecter considérablement la fréquence fondamentale des bâtiments et par conséquent leur réponse sismique globale. Les études récentes [2] et les observations post-sismiques suggèrent que l'interaction sol-structure (ISS) peut être avantageuse [3]. La négligence de son influence pourrait conduire à une mauvaise conception à la fois pour la base et la superstructure, en particulier pour les structures fondées sur des sols de faible valeur G_s (module de cisaillement) [4]. En effet, l'analyse sismique de la réponse structurelle en tenant compte des propriétés locales, comme la nature de propagation de l'onde sismique dans le site, diffère de celle considérée fixe 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 [5].

En outre, les règlements parasismiques en vigueur tel que le règlement RPS [1], propose une classification des sites en cinq catégories, et ce en fonction des propriétés des sols qui les constituent.

Newmark et Rosenblueth [6] ont proposé pour chaque degré de liberté de la fondation rectangulaire, des formules modélisant l'ISS dans le domaine du comportement élastique. Dans la présente étude, plus de cent soixante simulations numériques a été effectuées pour déterminer l'équation approximative de la fréquence fondamentale (plus de 78% de la masse participante en terme moyenne) en tenant compte de la flexibilité du sol (Ferme, Meuble et Mou), suivant la classification du site par RPS [1] en fonction de plusieurs paramètres déterminants de la structure et du sol.

2. Approche de la modélisation du système ISS

La structure est modélisée par un portique constitué de quatre poteaux « 4 » et poutres « 4 » sous une dalle. L'ensemble de l'interaction de la structure avec le sol est modélisé par des ressorts élastiques horizontaux et des ressorts verticaux et de rotations (Figure 1). Ces ressorts relient un ou plusieurs nœuds à une base rigide.

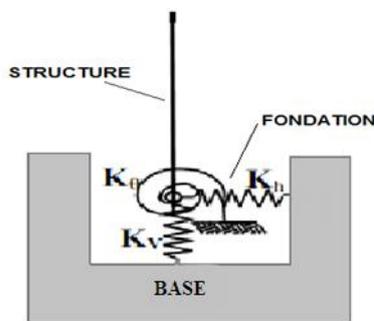


Figure 1 : Modèle tenant en compte de l'ISS

Les coefficients de rigidité de ces ressorts, sont donnés par les équations (1), (2) et (3) de Newmark et Rosenblueth [6] pour les fondations rectangulaires.

- Raideur de translation verticale K_v :
$$K_v = \frac{G_s}{1-\nu} \beta_z \sqrt{BL} \quad (1)$$

- Raideur de translation horizontale K_h :
$$K_h = 2(1+\nu)G_s \beta_x \sqrt{BL} \quad (2)$$

- Raideur de torsion K_θ :
$$K_\theta = \frac{(1+\nu)G_s}{4} \beta_x (B^2 + L^2) \sqrt{BL} \quad (3)$$

B et L : Dimensions parallèle et perpendiculaire à la direction du séisme, avec $S=BL$ (m^2) ; G_s : Module de cisaillement du sol ; ν : Coefficient de poisson ; β_x et β_z : Paramètres dépendant de la proportion des dimensions de la fondation (b/a) [7].

3. Description du modèle de référence

3.1. Structure en béton armé

Le modèle étudié est un bâtiment en béton armé [8-9] à usage d'habitation [1]. La structure résistante comportant une travée de 5 m, les poteaux sont de hauteur $h = 3.5$ m, ayant un moment d'Inertie I_p . La dalle est pleine de 20 cm d'épaisseur. La superstructure repose sur des semelles superficielles en béton armé de section carrée.

Le bâtiment est dimensionné selon le règlement parasismique marocain [1].

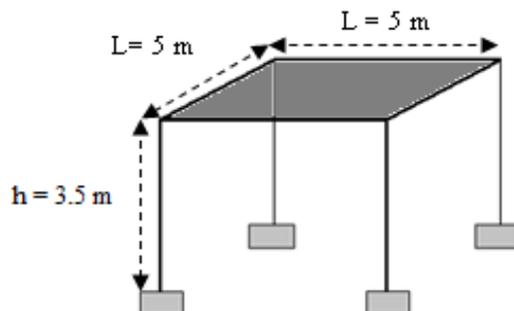


Figure 2 : Modèle d'une structure de type Bâtiment en BA d'un seul niveau.

L'analyse dynamique de structure de type bâtiment en béton armé étudiée, est évaluée en considérant les deux hypothèses suivantes : (i) l'encastrement est parfait à la base (Figure 2) et (ii) le couplage sol-structure en modélisant l'ISS par des ressorts (Figure.1), moyennant une approche numérique par les méthodes paramétrique et des éléments finis - Robot millenium [10].

3.2. Sol utilisé

Cinq types de sites sont définis par [1], selon les caractéristiques du sol (La résistance non drainé au cisaillement et à la pénétration standards) et la vitesse de propagation des ondes de cisaillement.

En outre, nous nous limiterons à la classification en tenant compte de type du sol (Sol ferme (S2), Meuble (S3) et Mou (S4)). Une fois les différents sites classés, nous utiliserons le tableau 1 donnant les valeurs et les caractéristiques physiques (Masse volumique ρ , module de cisaillement G_s , coefficient de Poisson ν et module de Young E_s) du sol supposé homogène. Ces caractéristiques sont donnés par [11,18] et [1].

Tableau 1 : Caractéristiques physiques propres du sol utilisé selon la classification de RPS 2011

Désignation	Classe du sol	Module de cisaillement G_s (MPa)	Module de Young E_s (MPa)	Densité (Kg/m ³)	Module de poisson (ν)
S2	Ferme	538,461538	1400	2200	0,3
S3	Meuble	176,153846	458	2000	
		96,1538462	250	1800	
		57,6923077	150	1730	
S4	Mou	15,3846154	40	1700	

4. Analyse paramétrique

4.1. Détermination des paramètres intervenant au comportement de la réponse structurelle

4.1.1. Influence de la hauteur (h), du moment d'inertie (I_p), du module de Young (E_p) et de la surface (S) de la fondation du modèle étudié

L'étude numérique a été conduite en considérant différents paramètres de base relatifs au sol et à la structure, afin de déterminer le rapport entre la fréquence propre du mode fondamental (F_{fixe}) du modèle (considéré fixe à la base) de la figure 2, et l'autre du même modèle (en tenant compte de l'ISS, F_{int}). Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence le rôle de chaque paramètre au niveau du calcul ainsi que l'influence de l'interaction sol-structure sur la fréquence propre fondamentale des structures de type bâtiments.

Tableau 2 : Influence de la hauteur du modèle étudié en fonction des paramètres du sol dans le plan (X, Y, Z)

Sol		F_{int} / F_{fixe}			Ecart (%) (Paramètre de la structure)
Type	G_s (MPa)	H = 3.5 m	H = 5 m	H = 7 m	
S2	538,461538	0,9765	0,9897	0,9947	1,82 %
S3	176,153846	0,9314	0,9693	0,9841	5.35 %
S4	15,3846154	0,5879	0,7475	0,8539	31.15 %
Ecart (%) (Paramètre du Sol)		39,79 %	24,47 %	14,15 %	
$I_p=0,0400166 \text{ m}^4$, $E_p= 40000 \text{ MPa}$					

Tableau 3 : Influence du moment d'inertie du modèle étudié en fonction des paramètres du sol dans le plan (X, Y, Z)

Sol		F_{int} / F_{fixe}			Ecart (%) (Paramètre de la structure)
Type	G_s (MPa)	$I_p = 0,0006510 \text{ (m}^4\text{)}$	$I_p = 0,0104166 \text{ (m}^4\text{)}$	$I_p = 0,0400166 \text{ (m}^4\text{)}$	
S2	538,461538	0,9974	0,9952	0,9809	1.65 %
S3	176,153846	0,9974	0,9856	0,9439	5.36 %
S4	15,3846154	0,9872	0,8587	0,6310	36.08 %
Ecart (%) (Paramètre du Sol)		1.02 %	13.71 %	35,67 %	
H= 3.5 m , $E_p= 32000 \text{ MPa}$					

Tableau 4 : Influence de module de Young de la structure (E_p) du modèle étudié en fonction des paramètres du sol dans le plan (X, Y, Z)

Sol		F_{int} / F_{fixe}			Ecart (%) (Paramètre de la structure)
Type	G_s (MPa)	$E_p = 30000$ MPa	$E_p = 32000$ MPa	$E_p = 43000$ MPa	
S2	538,461538	0,9848	0,9809	0,9745	1,04 %
S3	176,153846	0,9555	0,9439	0,9264	3,04 %
S4	15,3846154	0,6840	0,6310	0,5735	16,15 %
Ecart (%) (Paramètre du Sol)		30,54 %	35,67 %	41,14 %	
H= 3.5 m , $I_p = 0,0400166 \text{ m}^4$					

Tableau 5 : Influence de la surface de la semelle du modèle étudié en fonction des paramètres du sol dans le plan (X, Z)

Sol		F_{int} / F_{fixe}			Ecart (%) (Paramètre de la structure)
Type	G_s (MPa)	S= 1 m ²	S = 4 m ²	S = 6 m ²	
S2	538,461538	0,9938	0,9966	0,9972	00.34 %
S3	176,153846	0,9816	0,9911	0,9925	01.09 %
S4	15,3846154	0,8214	0,9035	0,9205	10.76 %
Ecart (%) (Paramètre du Sol)		17.34 %	9.34 %	7.92 %	
H= 3.5 m , $I_p = 0,0400166 \text{ m}^4$, $E_p = 32000 \text{ MPa}$					

4.1.2. Influence du nombre des ouvertures N_x , N_y et N_z

En variant les nombres d'ouvertures (N_x , N_y et N_z) dans les trois directions (x, y et z) pour les mêmes caractéristiques du sol mou (S4) et de la structure. Le tableau 6 donne une synthèse des résultats obtenus en terme de rapports des fréquences avec et sans l'interaction sol-structure (ISS).

Tableau 6 : Influence du nombre des ouvertures (N_x , N_y , N_z) du modèle étudié sur le sol mou (S4) dans le plan (X, Y, Z)

$N_x = N_y$	F_{int} / F_{fixe}			Différence (Max)
	$N_z = 2$	$N_z = 5$	$N_z = 7$	
1	0,4224	0,3610	0,3541	6,83 %
2	0,6041	0,5450	0,5205	8,36 %
3	0,7159	0,6891	0,6617	5,42 %
Différence (Max)	29,35 %	32,81 %	30,76 %	
Ip = 0,087001041, $E_p = 40000 \text{ MPa}$, h = 3.5 m,				

4.2. Discussion

La principale constatation de l'effet d'ISS est la réduction de la fréquence fondamentale de la réponse de la structure en tenant compte de l'interaction sol-structure par rapport à la valeur calculée dans le cas de la structure à base fixe. Elle est déterminée par l'influence de différents paramètres du sol et de la structure représentés par l'écart (%) dans les différentes mesures prises. Cependant, nous constatons que l'effet de l'interaction sol-structure augmente avec le couplage des différents paramètres suivants :

- La diminution du paramètre de la hauteur (h) de la structure, a aussi affectée le rapport F_{int} / F_{fixe} , avec un écart de 31.15 % sur un même sol (S4) comme le montre le tableau 2 ;
- L'augmentation du moment d'inertie (I_p) des éléments verticaux de la structure (36.08% d'écart maximal entre 0,0006510 m⁴ à 0,0400166 m⁴) sur un sol de type S4, est également illustré sur le tableau 3 ;
- La diminution du module d'élasticité E_p de la structure, avec un écart du 16,15 % entre 30000 MPa et 43000MPa, sur un même sol S4 (Tableau 4) ;
- La diminution de la surface normale du contact de la structure avec le sol au niveau de la fondation (10.76% d'écart entre 1m² et 6m² de la surface S sur le sol de type S4, Tableau 5) ;

- La diminution de module de cisaillement G_s du sol, mais cette réduction du rapport F_{int}/F_{fixe} est moins significative pour les sols rigides, ce qui est illustré par les écarts (%) en fonction de plusieurs paramètres structurels dans les tableaux 2, 3,4 et 5 ;

- L'augmentation du nombre d'ouverture N_z , et la diminution du nombre des ouvertures (N_x et N_y) en trois dimensions (Tableau 6).

En se basant sur les résultats obtenus et récapitulés sur les tableaux 2, 3, 4, 5 et 6, les paramètres du sol et de la structure tels que G_s , N_x , N_y , N_z , S , E_p , I_p et la hauteur du modèle H , interviennent directement sur la détermination de la réponse fréquentielle du bâtiment en tenant compte de l'ISS. En outre, la variation du rapport F_{int}/F_{fixe} est en fonction de ces paramètres, par conséquent nous pouvons admettre l'équation de la rigidité globale (Eq 4) donné en [19] et par la méthode de la régression multilinéaire [20].

$$K_{sol.str} = \frac{N_x N_y}{N_z} \frac{G_s}{E_p (I_p)^{(3/4)}} h^3 \sqrt{S / S_0} \quad (4)$$

Avec S est la moyenne de la surface de la fondation considérée au niveau maximal de chaque poteau ($S = \sum_i^n \frac{S_i}{n}$), S_0 est la surface unitaire de référence ($1m^2$) et l'indice « n » est le nombre total des fondations.

5. Application

Nous avons calculé le rapport des fréquences en tenant compte de l'interaction sol-structure et sans en tenir compte, en utilisant les équations (1), (2) et (3) précitées, Nous faisons varier les paramètres du modèle étudié (Figure 2) au niveau de la conception, du dimensionnement de la structure et des caractéristiques du sol. Le tableau 7 donne une synthèse des résultats obtenus.

Tableau 7 : Influence de la variation de différents paramètres du modèle étudié (différentes ouvertures dans le plan tridimensionnel) sur le rapport de fréquences F_{int} / F_{fixe}

Type du Sol (RPS2011)	GS (MPa)	I_p (m^4)	N_x	N_y	N_z	F_{int} / F_{fixe}
S2	538,461539	0,001733	1	2	1	0,99821429
	538,461539	0,005122	1	2	1	0,99787911
	538,461539	0,005122	2	2	3	1,00000000
	538,461539	0,010416	2	2	3	0,99600000
	538,461539	0,010416	2	2	6	0,99609375
	538,461539	0,103472	2	2	6	0,96737357
	538,461539	0,103472	3	4	6	0,98677686
	538,461539	0,244016	3	4	6	0,97047970
	538,461539	0,244016	2	2	9	0,93288591
	538,461539	0,068266	2	2	9	0,97500000
	538,461539	0,068266	2	3	9	0,97741935
	538,461539	0,476016	2	3	9	0,91616766
	538,461539	0,109350	4	4	9	0,98746867
	538,461539	0,024729	4	4	9	0,99555556
	538,461539	0,640266	2	2	12	0,89425982
538,461539	0,640266	2	2	15	0,90540500	
S3	176,153846	0,001733	1	2	1	0,99821429
	96,1538462	0,001733	1	2	1	0,99642857
	57,6923077	0,001733	1	2	1	0,99464286
	176,153846	0,005122	1	2	1	0,99469777
	96,1538462	0,005122	1	2	1	0,99045599
	57,6923077	0,005122	1	2	1	0,98409332
	176,153846	0,005122	2	2	3	0,99722992

	96,1538462	0,005122	2	2	3	0,99445983
	57,6923077	0,005122	2	2	3	0,98891967
	176,153846	0,010416	2	2	3	0,99200000
	96,1538462	0,010416	2	2	3	0,98600000
	57,6923077	0,010416	2	2	3	0,97600000
	176,153846	0,010416	2	2	6	0,98828125
	96,1538462	0,010416	2	2	6	0,97656250
	57,6923077	0,010416	2	2	6	0,96484375
	176,153846	0,103472	2	2	6	0,90864600
	96,1538462	0,103472	2	2	6	0,84828711
	57,6923077	0,103472	2	2	6	0,77814029
	176,153846	0,103472	3	4	6	0,96033058
	96,1538462	0,103472	3	4	6	0,93057851
	57,6923077	0,103472	3	4	6	0,89090909
	176,153846	0,244016	3	4	6	0,91881919
	96,1538462	0,244016	3	4	6	0,86346863
	57,6923077	0,244016	3	4	6	0,79827798
	176,153846	0,244016	2	2	9	0,82997763
	96,1538462	0,244016	2	2	9	0,74049217
	57,6923077	0,244016	2	2	9	0,65324385
	176,153846	0,068266	2	2	9	0,92500000
	96,1538462	0,068266	2	2	9	0,87187500
	57,6923077	0,068266	2	2	9	0,80937500
	176,153846	0,068266	2	3	9	0,93548387
	96,1538462	0,068266	2	3	9	0,89032258
	57,6923077	0,068266	2	3	9	0,83548387
	176,153846	0,476016	2	3	9	0,79441118
	96,1538462	0,476016	2	3	9	0,69860279
	57,6923077	0,476016	2	3	9	0,60678643
	176,153846	0,109350	4	4	9	0,96741855
	96,1538462	0,109350	4	4	9	0,94235589
	57,6923077	0,109350	4	4	9	0,90977444
	176,153846	0,024729	4	4	9	0,99111111
	96,1538462	0,024729	4	4	9	0,98222222
	57,6923077	0,024729	4	4	9	0,97333333
	176,153846	0,640266	2	2	12	0,75528701
	96,1538462	0,640266	2	2	12	0,65256798
	57,6923077	0,640266	2	2	12	0,55891239
	176,153846	0,640266	2	2	15	0,77477500
	96,1538462	0,640266	2	2	15	0,67567600
	57,6923077	0,640266	2	2	15	0,58558600
S4	15,3846154	0,001733	1	2	1	0,98035714
	15,3846154	0,005122	1	2	1	0,94485684
	15,3846154	0,005122	2	2	3	0,95844875
	15,3846154	0,010416	2	2	3	0,91800000
	15,3846154	0,010416	2	2	6	0,87890625
	15,3846154	0,103472	2	2	6	0,54486134

15,3846154	0,103472	3	4	6	0,71074380
15,3846154	0,244016	3	4	6	0,56580566
15,3846154	0,244016	2	2	9	0,42058166
15,3846154	0,068266	2	2	9	0,58437500
15,3846154	0,068266	2	3	9	0,61935484
15,3846154	0,476016	2	3	9	0,38722555
15,3846154	0,109350	4	4	9	0,74937343
15,3846154	0,024729	4	4	9	0,91111111
15,3846154	0,640266	2	2	12	0,36253776
15,3846154	0,640266	2	2	15	0,38288300

$E_p = 32000 \text{ MPa}$, $h = 3.5 \text{ m}$

Ces résultats ont été projetés dans le diagramme binaire représentant les rapports des fréquences $F_{\text{int}} / F_{\text{fixe}}$ en fonction de la rigidité globale $K_{\text{sol.str}}$ (Figure 3).

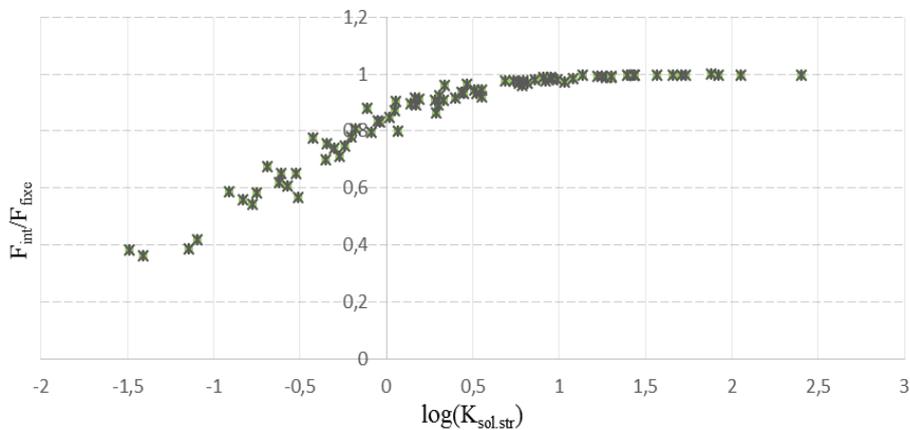


Figure 3 : Rapport des fréquences $F_{\text{int}}/F_{\text{fixe}}$ en fonction de la rigidité globale du modèle étudié de différents paramètres déterminants.

Cette figure 3 montre clairement que la raideur du sol augmente avec le rapport des fréquences $F_{\text{int}} / F_{\text{fixe}}$. Cela indique une nette corrélation (d'environ 98,69 %) entre la fréquence en tenant compte de l'ISS et la rigidité globale du sol au niveau de la fondation du bâtiment dans le domaine élastique (Comportement linéaire du sol et de la structure).

6. Détermination de l'équation fréquentielle du bâtiment en BA en tenant compte de l'ISS

En se basant sur la méthode d'approximation (base du moindre carré) utilisant le moyen de programmation sur Matlab [21], nous avons obtenu les résultats illustrés sur la figure 4.

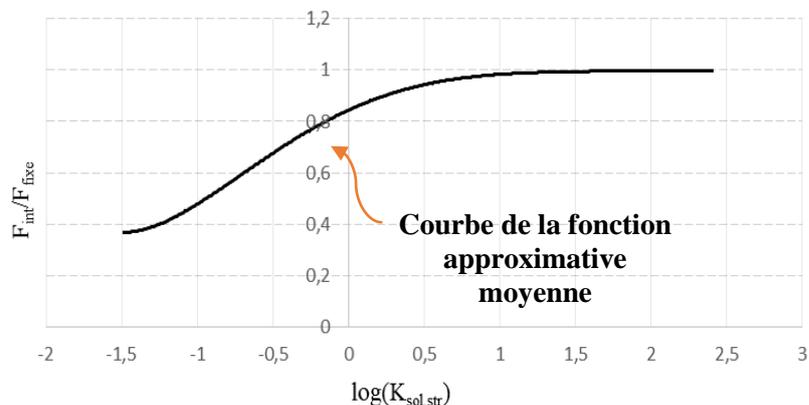


Figure 4 : La courbe des valeurs moyens de $F_{\text{int}} / F_{\text{fixe}}$ en fonction de la rigidité $K_{\text{sol.str}}$.

L'équation approximative en terme moyen du rapport des fréquences F_{int}/F_{fixe} en tenant compte de l'ISS sur celle en l'absence, en fonction des paramètres déterminantes de la réponse structurelle en cas dynamique, dans l'intervalle [-1,487024888 et 2,406118423] de l'axe X, est donnée par :

$$F_{int} / F_{fixe} = \left[-7,231.10^{-1} X^5 + 3.221X^4 - 1,091X^3 - 14,55X^2 + 27,05X + 84,43 \right] . 10^{-2} \quad (5)$$

Où : $X = \text{Log}(K_{sol.str})$

NB : La limite de confiance approximative de cette équation est d'environ 95%.

Conclusion

L'analyse de l'influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la fréquence fondamentale des bâtiments, exécutée pour différentes conditions du sol et de la structure, a montré que cette influence dépend principalement des paramètres déterminante, à savoir le module de cisaillement de sol (G_s), la surface de fondation (A), la rigidité de flexion des poteaux de bâtiment (I_p , E_p), la hauteur totale du bâtiment (h), et les nombres des ouvertures N_x , N_y et N_z .

L'analyse statistique des résultats nous a permis la détermination d'une valeur moyenne et approximative du rapport de la fréquence F_{int} / F_{fixe} en terme de l'expression simplifiée de la rigidité du système sol-structure $K_{sol.str}$ (Equation 5). A l'issue de cette analyse, nous avons déterminé d'une manière directe et avec une approximation, l'existence de l'effet de l'interaction sol-structure de type bâtiment en béton armé dans le cas de trois dimensions (cas réel) et dans le cas d'absence de l'ISS, afin d'utiliser les conditions et les paramètres nécessaires de la conception parasismique.

Références

1. RPS 2000 (version de 2011), Règlement parasismique marocain .Ministère de l'habitat et l'aménagement de l'espace, Maroc.
2. Esteban S., Fernando L.C., Arézou M., Farahmand R., *Elsevier. Structural safety* 33, pp 51– 63. (2011).
3. Mylonakis G., Gazetas G., Seismic soil–structure interaction: beneficial or detrimental, *Earthquake Engineering*, (2000) 277–301.
4. Chang C.Y., Development of Shear Modulus Reduction Curves Based on Lotung Down hole. Ground Motion Data. Proc. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics (1991).
5. Smith HA., Wu WH., Borja RI., Structural control considering soil-structure interaction effects. *Earthq Eng Struct Dyn* 23 (1994) 609–626.
6. Newmark NM., Rosenblueth.E., Fundamentals of earthquake engineering. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, NJ (1971).
7. Zacek, Construction parasismique, Editions Parentheses. Marseille (1996).
8. EN, Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance, Ed. Eyrolles (2004).
9. BAEL 91 modifiées 99, Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, Éd.Eyrolles (2000).
10. "Robot" Computer and structures, tutorial-sismic simulation analysis.
11. Lavergne M., Méthodes sismiques. Edition Technip (1986).
12. Éric Gervreau, Géotechnique et Mécanique des sols (1997).
13. Bardet J.P., Experimental soil mechanics. Civil Engineering Department. University of Southern California, Los Angeles pp 286-287.
14. Bowles, I. E. Foundation Analysis and Design, 4th ed., McGraw-Hill, New – York (1988) 99-100.
15. Converse F.J., Foundations subjected to dynamic forces, Chapter 8 of Foundation Engineering. G.A. Leonards ed., McGraw-Hill, New York, (1962) pp 769-825.
16. Hallam M.G., Heaf N.J., and Wootton L.R., Dynamic of marine structures, Report UR 8, 2nd edition, Ciria Underwater Engineering Group. (1978).
17. Hunt R., Geotechnical Engineering Techniques and Practices, Mc Graw-Hill, New York (1986) 134.
18. Jean P.C., Les vitesses en sismique réflexion. Edition Lavoisier Tec & doc (1983)
19. Khalil L., Marwan S., & Isam S., Influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la Fréquence fondamentale des bâtiments. Poly Tech-Lille (2006).
20. Rakotomalala R., Pratique de la Régression Linéaire Multiple- Diagnostic et sélection de variables, Université Lumière Lyon 2 (2011).
21. Matlab. The Language of Technical Computing, Computation-Visualization-Programming.

(2014) ; <http://www.jmaterenvironsci.com>