

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Thème

Etude de l'Interaction Sol-Structures dans le cas des bâtiments

Présenté le 01/07/2021 par :

FARDEHEB CHIHAB EDDINE

et

MEGNOUNIF MOHAMED ZAKARIA

Devant le jury composé de :

Mme BENMANSOUR N	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Présidente
Mme BENKELFAT N.	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Examinatrice
Mme BENADLA Z.	Professeur	Univ. Tlemcen	Encadrante

Année universitaire : 2020-2021

Remerciements

« En préambule de ce mémoire, nous remercions DIEU le tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail. »

Je tiens fermement à mentionner le plaisir que nous avons eu à étudier à l'Université ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, où le travail présent dans ce mémoire a été réalisé.

Notre totale gratitude et nos sincères remerciements vont d'abord à nos enseignants qui nous ont bien formés, guidés et conseillés.

Nous tenons à remercier vivement notre encadreur Madame BENADLA Zahira, de nous avoir fait l'honneur d'accepter la direction de ce mémoire, elle nous a accordé sa confiance en nous laissant une grande liberté de pensée et d'action, tout en nous faisant part de ses avis, conseils et suggestions.

Nous adressons également nos vifs remerciements aux membres de notre jury : Madame BENMANSOUR Nassima et Madame BENKALFAT Naoual, qui ont pris le temps d'examiner notre travail.

Enfin, un Merci particulier à tous ceux qui ont crus en nous et soutenus, ainsi à toute personne qui a participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers ;

A mon cher père qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Que ce travail, fruit de tes efforts soit le témoignage de ma très grande reconnaissance et de ma profonde affection.

A ma chère mère, que je remercie pour tout le soutien et l'amour qu'elle m'apporte depuis mon enfance, toi qui dirigeas mes premiers pas, Votre compréhension et votre encouragement sont pour moi le soutien indispensable que vous avez toujours su m'apporter.

Je dédie ce modeste travail à qui m'ont toujours, et sans cesse soutenu et encourager dans le cheminement de ma carrière.

Megnounif Mohamed Zakaria

Je dédie ce modeste travail à mes parents, qui m'ont soutenue contre toutes les entraves et qui n'ont jamais cessé de m'encourager pour toujours aller de l'avant et de ne pas baisser les bras en particulier, dans les moments les plus difficiles.

Puisse Dieu le Tout-puissant ma aider à les récompenser, les satisfaire et les honorer.

A l'ensemble de mes frères et ma chère sœur et à toute ma famille.

A l'ensemble de mes amis et collègues.

A tout le groupe de notre promotion.

A tous ceux et celles qui m'ont encouragé, entourés de leurs soutient durant les moments difficiles avec tant d'amour et de compréhension.

Un grand Merci pour tout le monde.

Fardeheb Chihab-Eddine

Résumé

L'objectif du travail est d'étudier la mobilité des structures de type bâtiment vis-à-vis du sol d'assise. Dans ce travail, on a effectué une analyse modale et paramétrique pour évaluer l'influence de l'ISS sur la période fondamentale de la structure. Un modèle de bâtiment R+8 reposant sur une fondation de type radier général est considéré. Deux cas sont traités, le premier est encasturé à la base et dans le second, on remplace l'encastrement par des ressorts où leurs rigidités sont exprimées en fonction des caractéristiques de la fondation ainsi que celle du sol d'assise. Après quoi, une étude transitoire a été menée afin de déterminer la réponse et le comportement de la structure vis-à-vis des sollicitations dynamiques. Le séisme de Boumerdès a été considéré comme sollicitation. Les comparaisons sont faites en termes d'accélération, vitesse, déplacement et les contraintes.

Il s'agit d'une étude purement numérique réalisée par le logiciel de calcul Ansys/Multiphysics V19.0.

Mots clés : interaction sol-structures, bâtiment, modale, transitoire, Ansys V19.0, fréquence fondamentale.

Abstract

The objective of the work is to study the mobility of building-type structures relative to the floor. In this work, a modal and parametric analysis was performed to assess the influence of the ISS on the fundamental period of the structure. A (R + 8) building model resting on a general raft foundation is considered. Two cases are treated, the first is embedded at the base and in the second, the embedding is replaced by springs where their stiffness is expressed according to the characteristics of the foundation as well as that of the base. After that, a transient study was carried out in order to determine the response and the behavior of the structure vis-à-vis dynamic stresses. The Boumerdès earthquake was considered to be stressful. Comparisons are made in terms of acceleration, speed, displacement and stresses.

This is a purely numerical study carried out by the Ansys / Multiphysics V19.0 calculation software.

Keywords : soil-structure interaction, building, modal, transient, Ansys V19.0, fundamental frequency.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة قابلية تحرك حجر أساس الهياكل من نوع المبنى. في هذا العمل، تم إجراء تحليل معياري ومحدودي لتقييم تأثير التداخل بين المبنى و حجر الأساس. يتم النظر في نموذج بناية مكونة من طابق أرضي+ ثمانية طوابق يرتكز على أساس من نوع طوف عام. يتم التعامل مع حالتين، الأولى مدمجة في القاعدة وفي الثانية، يتم استبدال الأساس الثابت بلوالب حيث يتم التعبير عن صلابتها وفقاً لخصائص الأساس وكذلك القاعدة. بعد ذلك، تم إجراء دراسة عابرة لتحديد استجابة وسلوك الهيكل مقابل الضغوط الديناميكية. كان زلزال بومرداس 2003 يعتبر بمثابة ضغط. يتم إجراء المقارنات من حيث التسارع والسرعة والإزاحة والضغوط.

هذه دراسة عددية بحتة تم إجراؤها بواسطة برنامج حساب Ansys / Multiphysics V19.0.

الكلمات المفتاحية : تفاعل بنية التربة، البناء، النموذج، عابر، Ansys V19.0، التردد الأساسي.

Table de matière

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
ملخص.....	v
Table de matière	vi
Table des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Liste des symboles	xii
Introduction Générale.....	1
I. Chapitre1 : Généralités sur l'Interaction Sol-Structure.....	1
I.1 Introduction	2
I.2 Comportement sol-structure	2
I.3 Effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures.....	3
I.3.1 Structure encastree dans la roche (sous-sol encastree)	4
I.3.2 Structure incorporee dans le sol (base flexible)	4
I.4 Amortissement.....	6
I.4.1 Amortissement interne ou structural	6
I.4.2 Amortissement externe.....	7
I.4.3 L'amortissement radiatif (ou geometrique).....	8
I.5 Mouvement du sol en champ libre	8
I.6 Methodes de prise en compte de l'ISS	8
I.6.1 Methode globale.....	8
I.6.2 Methode de superposition	10
I.6.3 Methode de sous structure.....	11
I.6.4 Methode hybride	13

I.7	Conclusion.....	14
II.	Chapitre2 : Etat d'art sur la prise en compte de l'ISS.....	15
II.1	Introduction	16
II.2	Structures sur fondations superficielles.....	16
II.2.1	Semelle isolée rectangulaire.....	16
II.2.2	Semelle isolée circulaire.....	18
II.2.3	Semelles filantes.....	19
II.3	Structures sur Fondations profondes	20
II.3.1	Semelle reposant sur des pieux	20
II.4	Structures sur fondations continues.....	20
II.4.1	Radier général	20
II.5	Conclusion.....	21
III.	Chapitre 3 : Influence de l'ISS sur la fréquence fondamentale des structures.....	22
III.1	Introduction.....	23
III.2	Étude modale du modèle de référence	23
III.3	Prise en compte de l'effet de l'ISS	25
III.4	Présentation du bâtiment.....	29
III.4.1	Choix des fondations.....	30
III.4.2	Modélisation du bâtiment (R+8)	30
III.5	Etude paramétrique	34
III.5.1	Méthode de prise en compte de l'ISS.....	34
III.5.2	Influence de V_s sur le rapport F_{enc} / F_{ISS}	34
III.5.3	Vérification de l'abaque	37
III.6	Analyse transitoire de notre bâtiment	38
III.6.1	Points de mesures	38
III.6.2	Effet de l'ISS sur l'accélération	39
III.6.3	Effet de l'ISS sur le déplacement.....	39
III.6.4	Effet de l'ISS sur la vitesse	40

III.6.5 Effet de l'ISS sur la contrainte	41
III.7 Conclusion	41
Conclusion Générale et perspectives.....	42
Références bibliographiques	44
Annexes.....	46

Table des figures

Figure I-1 : Interaction sol – structure.....	2
Figure I-2 : Fondation reposant sur un sol qui est constitué de différentes couches.....	3
Figure I-3 : Réponse sismique des structures fondées sur les roches et sur le sol	4
Figure I-4 : Interaction inertielle et Interaction cinématique [25].....	6
Figure I-5 : influence de la prise en compte de l’amortissement du sol sur les valeurs des accélérations en m/s^2 [1].....	7
Figure I-6 : Principe de l’approche directe ou globale [28].	9
Figure I-7 : Schématisation du théorème de superposition de Kausel [28]	11
Figure I-8: Illustration du principe de sous-structuration [28].....	12
Figure I-9 : Décomposition en champ proche et champ lointain pour la définition de la frontière d’un macro-élément d’ISS (grange, 2008).....	14
Figure III-1 : Modèle sans prendre en compte l’interaction sol-structure.....	24
Figure III-2 : Maillage du portique sans ISS.....	24
Figure III-3: Résultats des fréquences propres sans ISS	25
Figure III-4 : modèle en tenant en compte de l’interaction sol-structure [5]	26
Figure III-5 : l’élément COMBIN14 (ANSYS Documentation)	27
Figure III-6 : Réglage des options de l’élément COMBIN 14.....	27
Figure III-7 : Maillage du portique	28
Figure III-8 : Résultats des modes (listing).....	28
Figure III-9 : la déformée de mode fondamental.	29
Figure III-10 : L’élément poutre BEAM188.....	31
Figure III-11 : Présentation des éléments SHELL181	31
Figure III-12 : la structure R+8 en 3D.....	31
Figure III-13 : Résultats des modes (listing) sans ISS	33
Figure III-14 : la déformée du mode fondamental dans le cas encastré.....	33
Figure III-15 : Vérification de l’abaque de K_{ss} proposé par (Khalil,2009).....	37
Figure III-16 : Accélérogramme de Boumerdès 2003	38
Figure III-17 : Accélération au sommet de la structure dans les deux cas, encastré et flexible (nœud 3357)	39
Figure III-18 : Déplacements au sommet de la structure po les deux cas, encastré et flexible (nœud 3357)	40

Figure III-19 : Vitesses au sommet du bâtiment pour les deux cas encastré et flexible (nœud 3357).....	40
Figure III-20 : Variation de la contrainte en fonction du temps dans le cas encastré et flexible (nœud 510)	41

Liste des tableaux

Tableau III-1: Caractéristiques mécaniques du système étudié	24
Tableau III-2 : Résultats des fréquences fondamentales	29
Tableau III-3 : Dimensionnement des éléments principaux [27].....	32
Tableau III-4 : Rigidités des ressorts pour $V_s=100$ m/s.....	35
Tableau III-5 : Rigidités des ressorts pour $V_s=150$ m/s.....	35
Tableau III-6 : Rigidités des ressorts pour $V_s=200$ m/s.....	35
Tableau III-7 : Rigidités des ressorts pour $V_s=400$ m/s.....	36
Tableau III-8 : : Rigidités des ressorts pour $V_s=800$ m/s.....	36
Tableau III-9 : Influence de V_s sur le rapport F_{enc}/F_{ISS} et K_{ss}	36

Liste des symboles

A	:	L'aire de la fondation
a, b	:	Longueur et largeur de la fondation
E_p	:	La rigidité des poteaux
F_{enc}	:	Fréquence encastrée
F_{iss}	:	Fréquence en tenant compte interaction sol- structure
G_s	:	Module de cisaillement du sol
H	:	Hauteur d'étage
I_p	:	Inertie du poteau
ISS	:	Interaction sol-structure
K_v	:	Rigidité de translation verticale de la fondation
K_h	:	Rigidité de translation horizontale de la fondation
K_θ	:	Rigidité de rotation
K_{ss}	:	Rigidité relative sol-structure
N_e	:	Nombre d'étages
N_o, N_b	:	Nombre d'ouverture dans le sens longitudinal et transversal
V_s	:	Vitesse d'ondes dans le sol
β_z	:	Paramètre dépendant du rapport a/b (dimensions de la fondation)
β_x	:	Paramètre dépendant du rapport a/b (dimensions de la fondation)
γ	:	Masse volumique
φ	:	Masse volumique [KN/m ³]
σ	:	La contrainte du sol
ξ	:	Amortissement visqueux
ϑ	:	Coefficient de Poisson

Introduction Générale

Les bâtiments construits doivent être en mesure de résister aux charges sismiques, pour ce faire le but d'assurer l'intégralité et protéger la vie des occupants. La réponse sismique d'une structure se trouve toujours liée à la forme avec laquelle les mouvements sismiques du sol sont transmis à travers ses fondations au système sol-structure

Ce travail consiste à montrer l'influence de l'interaction sol-structure sur le comportement des structures en portiques. La réponse de la structure étudiée est évaluée dans un premier temps en considérant l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base (modèle classique). Dans un deuxième modèle (modèle sol-structure), nous considérons le couplage sol-structure en utilisant des ressorts pour la réaction du sol.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres, une introduction générale et une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous présentons quelques généralités sur la compréhension du L'ISS, en commençant tout d'abord par le comportement de l'ISS et leurs effets sur le comportement dynamique des structures dans les deux cas sous-sol encasté et flexible ensuite les différents types d'amortissement ainsi les méthodes prises en compte de l'ISS

Au second chapitre, nous exposons quelques recherches faites sur la prise en compte de L'ISS aux différents types de fondations, superficielles et profondes.

Au troisième chapitre, on a commencé tout d'abord par une étude modale d'un modèle de référence qui représente un portique à un étage et une ouverture, modélisé par Ansys V19.0. Ensuite, nous allons faire l'étude d'un bâtiment (R+8) fondé sur un radier général. Celui-ci est modélisé par des ressorts de rigidités égales au cas de fondations isolées et vérifier ainsi que ce type de fondation peut être représenté par l'abaque représentant la rigidité relative en fonction du rapport des fréquences fondamentales entre le modèle fixe et le modèle en ISS proposé par (L. Khalil, 2009, [17]). Après quoi, une étude transitoire est considérée sous l'action du séisme de Boumerdès 2003, afin de voir l'effet de l'introduction de l'ISS sur le déplacement, l'accélération, vitesse et contraintes.

Enfin le travail se termine par une conclusion générale résumant tous les résultats obtenus.

Chapitre1 : Généralités sur l'Interaction Sol-Structure

I.1 Introduction

L'interaction sol-structure, notée généralement (ISS), est un sujet de mécanique appliquée, qui implique le développement et la recherche de méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures sous charges dynamiques en tenant compte des caractéristiques de base du sol. Pour une structure reposant sur un sol de fondation, il existe une influence réciproque dans le comportement du sol et de la structure et la complexité réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments sol et la structure.

Ce phénomène peut décrire l'influence qui se produit dans le plan de contact entre la masse du sol et la structure. Par conséquent, dans l'analyse de la réponse dynamique, non seulement les caractéristiques structurelles, mais aussi les caractéristiques du sol sous-jacent sont incluses.

Ce chapitre explique l'effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures (Figure I-1) et présente les différentes méthodes qui peuvent être utilisées pour prendre en considération ce phénomène.

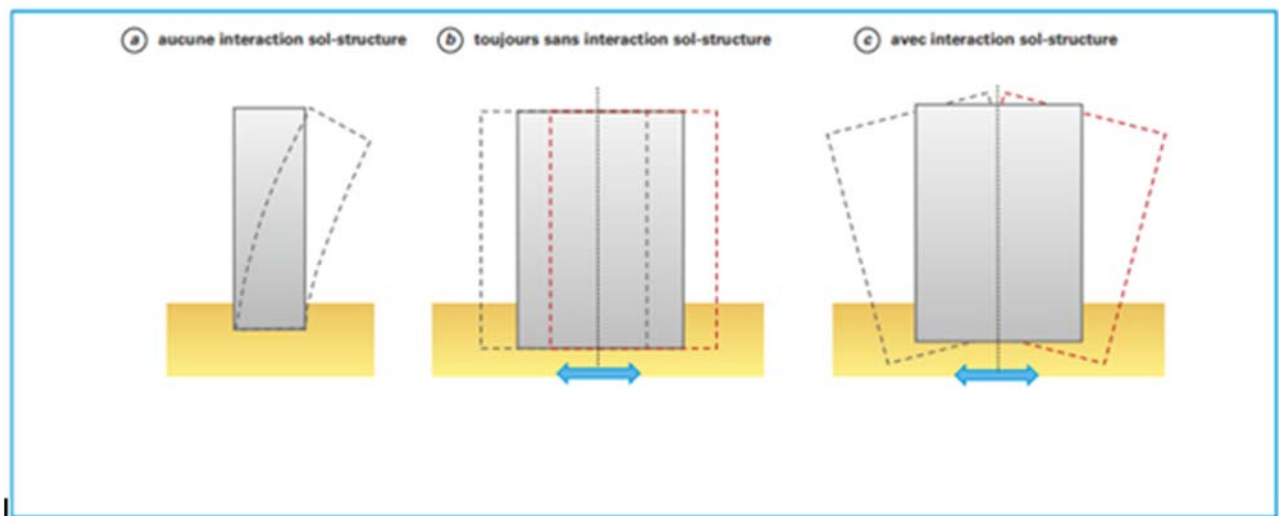


Figure I-1 : Interaction sol – structure

- a) sans ISS, bâtiment souple et sol de très bonne résistance mécanique.
- b) sans ISS, bâtiment raide et sol de très bonne résistance mécanique.
- c) avec ISS, bâtiment raide et sol de faible ou moyenne résistance mécanique

I.2 Comportement sol-structure

Aujourd'hui, le problème le plus courant dans le domaine géotechnique, selon la capacité du sol ou de la roche à soutenir la structure, la fondation peut être superficielle ou profonde.

Ce type de fondation peut retarder la charge due qu'il supporte Sur des couches de sol avec des profondeurs variables de plusieurs mètres à des dizaines de mètres.

Lorsque la structure est soumise à un tremblement de terre, elle se déforme pour répondre à la force de réaction exercée sur la zone de contact entre les fondations Et le sol, en raison de la déformation de la structure, modifie la réponse du sol. Ce type de déformation du sol dans la couche de fondation affectera également le mouvement de la structure.

Ce phénomène est appelé Interaction Sol Structure.

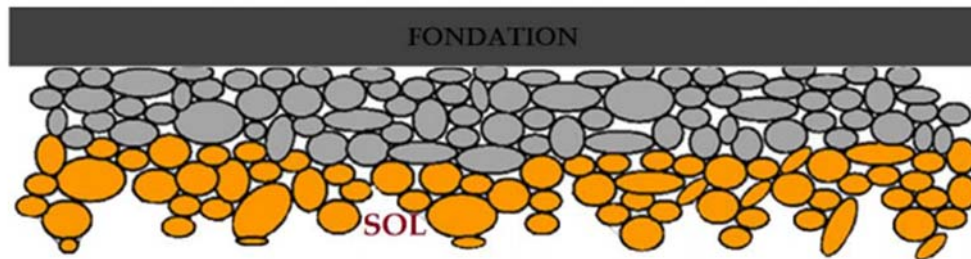


Figure I-2 : Fondation reposant sur un sol qui est constitué de différentes couches

I.3 Effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures

Afin d'évaluer l'influence de l'ISS sur les caractéristiques dynamiques des structures en béton armé, nous présentons le modèle de Wolf (1985) (Figure I-3). Wolf a utilisé deux structures identiques avec une base rigide (constituée d'un radier et d'un mur de soutènement): la première est sur le rocher de base en retrait tandis que la seconde est enterrée dans le sol reposant sur une base flexible. Le point de contrôle est sélectionné sur la surface libre de la roche (point A). D'un point de vue pratique, le mouvement de la roche entière est le même, (les mouvements des points A et B sont égaux), [8].

Généralement, pour une même onde sismique, l'excitation du fond de la structure incorporée dans le sol (point O), doit être différente de l'excitation de la structure à base de roche (point B) car nous avons du sol au-dessus de la roche, ce qui va modifier le mouvement sismique.

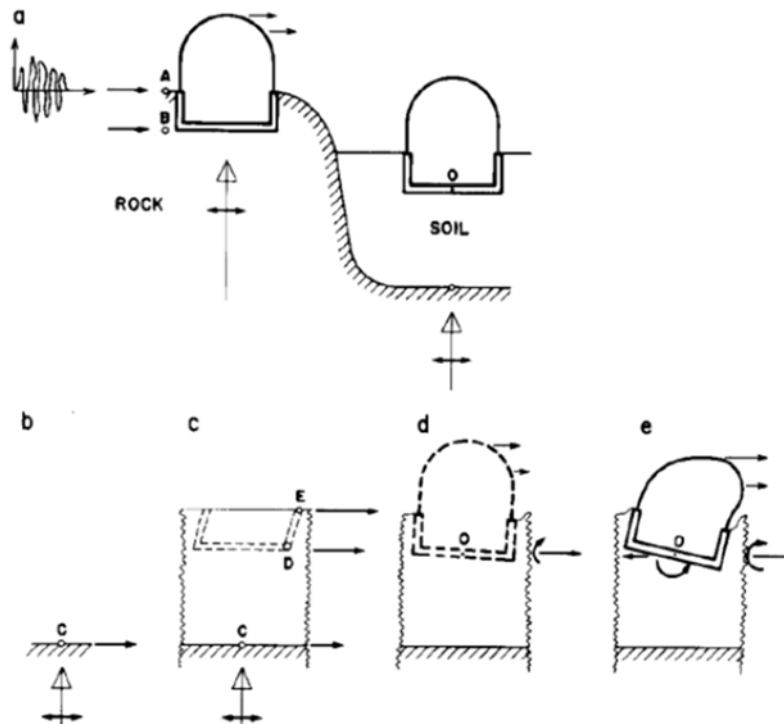


Figure I-3 : Réponse sismique des structures fondées sur les roches et sur le sol

(a) Sites ; (b) champ libre ; (c) interaction cinématique ; (d) interaction inertielle. (Wolf 1985)

I.3.1 Structure encastrée dans la roche (sous-sol encastré)

Sous excitation sismique, la structure incorporée dans la masse rocheuse (fondation encastrée) doit avoir un moment de renversement et un effort tranchant transversal sur sa fondation. Cependant, comme cette structure est incorporée dans la masse rocheuse abrupte, il n'y a pas d'autre déformation sur la base. Le déplacement horizontal résultant est égal au déplacement du point de contrôle (A). Par conséquent, dans ce cas, nous n'avons pas d'ISS et la réponse sismique de la structure ne dépend que des caractéristiques de la structure.

I.3.2 Structure incorporée dans le sol (base flexible)

I.3.2.1 Interaction Cinématique

L'interaction cinématique se traduit par la différence entre le mouvement sismique en champ libre et celui dans un champ dont l'excavation et l'inclusion de la fondation ont changé les caractéristiques. Elle ne résulte que de la différence de raideur entre le sol et la fondation, qui l'empêche de suivre les mouvements imposés par le sol.

L'excavation et l'insertion de la base rigide (fondation sans la superstructure, Figure I-3c) vont modifier le mouvement du champ libre (sol sans la fondation et la superstructure ; Figure I-3b).

Le fait d'excaver va diminuer le mouvement. De plus, la différence de la rigidité entre la fondation et le sol va aussi modifier le mouvement puisque les ondes sismiques incidentes doivent être reflétées et diffractées par la fondation. De ce fait, le mouvement total du sol au voisinage de la fondation doit être modifié du mouvement du champ libre. Puisque le sol est flexible, on doit avoir également des déformations additionnelles à la base (déplacement horizontal et balancement) différentes de celles du point de contrôle (A). Ainsi, cette interaction entre la fondation rigide et le sol (Interaction cinématique) modifie le mouvement sismique incident à la base et par suite conduit à des accélérations (forces d'inertie) tout au long de la hauteur de la structure différentes de celles développées dans la structure incorporée dans le massif de roche (base encastrée).

1.3.2.2 Interaction Inertielle

L'interaction inertielle provient des efforts d'inertie engendrés par la masse de la structure à sa base et donc dans le sol sous effet du mouvement imposé à la fondation.

Les forces d'inertie dans la structure, résultantes de l'interaction cinématique, conduisent à un moment fléchissant et un effort tranchant en point O (Figure I-3d). Puisque le sol est flexible, cet effort et moment doivent aboutir à des déplacements horizontaux et des rotations à la base. Ainsi le mouvement à la base de la structure est modifié de nouveau. De plus, on doit avoir deux genres d'amortissement qui ont pour fonction la dissipation de l'énergie amenée par le mouvement de la structure ainsi un amortissement hystérétique (matériel) dû aux non linéarités qui se présentent dans le sol et un amortissement radiatif dû aux rayonnements des ondes dans le sol où la fondation se manifeste comme une source d'onde.

Si on ne prend pas compte des effets d'interaction cinématique (alors on a les mêmes forces d'inertie développées dans les deux structures ; incorporées dans les roches et le sol), l'interaction inertielle doit modifier le comportement dynamique de la structure.

En effet, les mouvements et les amortissements qui prennent naissance à la base de la structure incorporée dans le sol (base flexible) aboutissent à l'augmentation de la flexibilité de cette structure par comparaison au cas de la structure incorporée dans les roches (base encastrée).

Pour une structure reposant sur un massif de sol plus souple, nous distinguons la notion d'interaction cinématique de celle d'interaction inertielle.

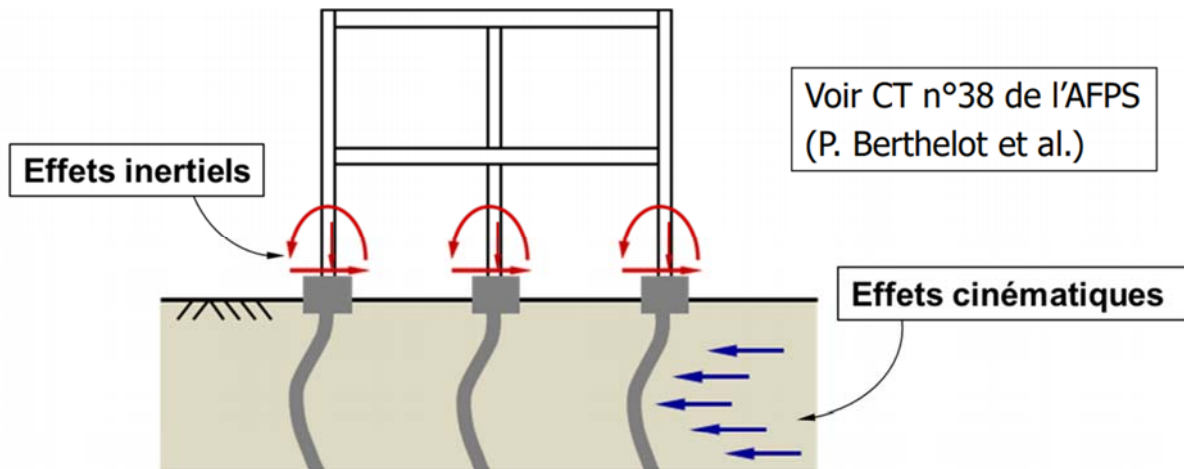


Figure I-4 : Interaction inertielle et Interaction cinématique [25]

1.3.2.3 Déformations de la fondation

On peut avoir des déformations (flexion, axiales, cisaillement) des éléments de la fondation qui résultent des forces et des déplacements appliqués par la superstructure et le sol. Ces déformations sont en relation avec les exigences sismiques pour lesquelles les éléments de la fondation doivent être conçus. Elles peuvent être significatives surtout pour les fondations flexibles comme les radiers et les pieux (NEHRP, 2012).

1.3.2.4 Déplacement au sommet de la structure

Puisqu'on a un balancement de la base de la structure incorporée dans le sol (base flexible), alors on doit avoir un déplacement au sommet plus élevé que celui obtenu pour la structure incorporée dans le massif de roche (base encastree)

I.4 Amortissement

Les phénomènes d'amortissement jouent un rôle majeur dans la réponse des structures, on peut le décomposer en deux points.

I.4.1 Amortissement interne ou structural

Se produit dans les matériaux à cause des déformations qu'ils subissent, est la principale cause de dissipation de l'énergie, il comporte

1.4.1.1 Amortissement visqueux

Il est lié à la viscoélasticité des matériaux dépendant de la fréquence

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (\text{I-1})$$

1.4.1.2 Amortissement d'hystérésis

Il est indépendant de la fréquence, ayant son origine dans la non linéarité du comportement des éléments structuraux

$$M \ddot{D} + K(1 + 2\beta)D = P(t) \quad (\text{I-2})$$

$$\xi_{eq} = \beta \frac{w_n}{w} \text{ Amortissement visqueux équivalent.}$$

1.4.2 Amortissement externe

Correspond aux frottements divers aux surfaces de contact entre la structure et les éléments non structuraux.

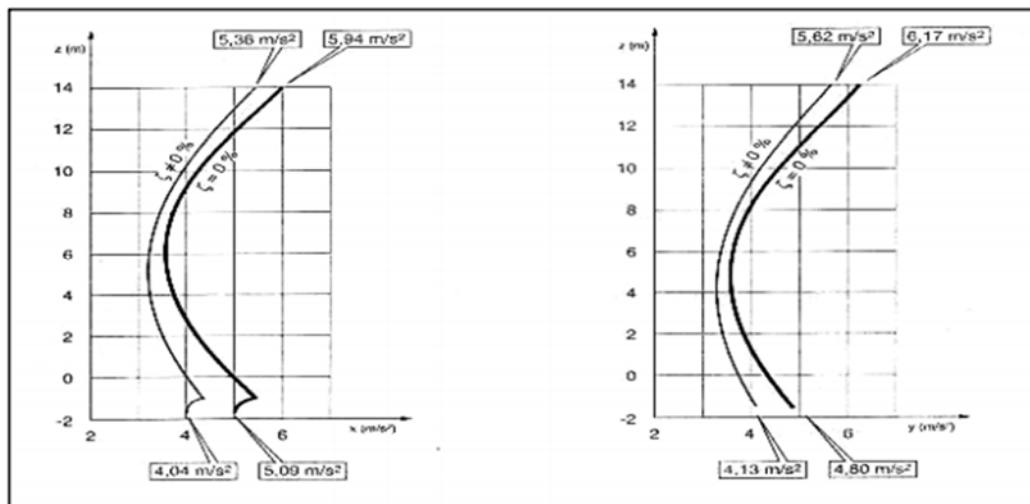


Figure I-5 : influence de la prise en compte de l'amortissement du sol sur les valeurs des accélérations en m/s^2 [1]

On classe dans cette famille le frottement entre les fondations et le sol, appelé aussi amortissement géométrique, pris en compte dans les modèles de l'ISS. Il correspond aussi à une perte d'énergie par propagation à l'infinie des vibrations dans le sol

$$\xi_{eq} = \beta \frac{k_t(w_n)}{2k_r(w_n)} \quad (\text{I-3})$$

I.4.3 L'amortissement radiatif (ou géométrique)

L'amortissement géométrique augmente avec la fréquence d'oscillation. Il ne peut avoir lieu pour les fréquences inférieures à la fréquence propre du sol, ce qui se produit souvent dans le cas des couches meubles. Dans celles-ci, la dissipation d'énergie est due principalement à leurs déformations et augmente donc avec leur amplitude.

I.5 Mouvement du sol en champ libre

Le mouvement sismique est défini par la carte d'accélération ou le spectre de réponse. Ce mouvement est largement affecté par les conditions géotechniques locales. La recherche du site doit suivre les principes suivants :

- Définition du mouvement du sol ;
- Le niveau d'accélération réel que le sol peut transmettre ;
- Les caractéristiques de fréquence du mouvement sont compatibles avec les caractéristiques physiques du site ;
- Le changement d'accélération avec la profondeur se situe dans une limite raisonnable.

I.6 Méthodes de prise en compte de l'ISS

Pour prendre en compte l'effet de l'interaction sol-structure, nous distinguons quatre catégories de méthodes qui sont respectivement les méthodes globales, Méthode superposition, les méthodes de sous-structures et les méthodes hybrides.

Les méthodes sont décrites et détaillées dans de nombreuses ouvrages ([Pecker, 1984], [Wolf, 1988]) et aussi dans les différentes thèses ([Cremer, 2001], [Chatzigogos, 2007], et [Grange, 2008]).

I.6.1 Méthode globale

Dans la méthode globale appelée aussi « méthode directe », l'analyse du système complet s'effectue en une seule étape, qui permet d'inclure :

- Le comportement non linéaire de la structure ou du sol (comportement anélastique).
- Toute hétérogénéité présente dans ce dernier.
- Le glissement et le décollement des fondations.

Elle permet aussi de traiter les conditions de contact à l'ISS et, implicitement, les effets de radiation et de dissipation d'énergie dans la partie infinie du sol non borné. Les approches directes consistent à résoudre directement l'équation de la dynamique régissant le comportement du système (sol, fondation, structure). La formulation est orientée vers un traitement par éléments finis du phénomène d'interaction mécanique avec, par exemple, généralement un schéma d'intégration par différences finies de la composante temporelle (Figure I-6).

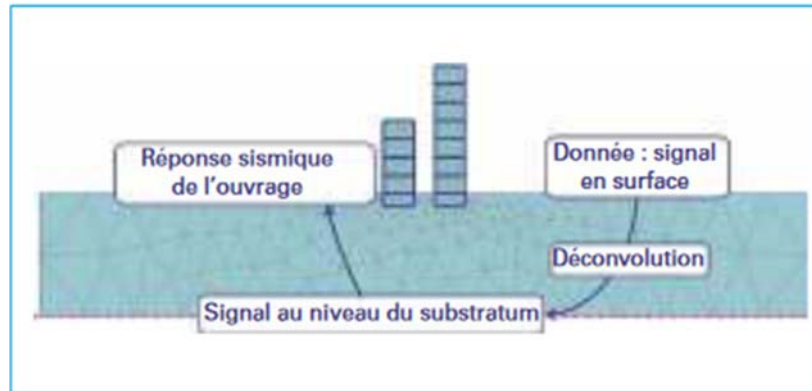


Figure I-6 : Principe de l'approche directe ou globale [28].

1.6.1.1 Étapes de l'approche directe

L'approche directe nécessite de construire un modèle détaillé du sol (E_i , ν_i , ξ_i) et de le doter d'éléments absorbants (« frontières absorbantes ») pour éviter les rebonds des ondes dont la propagation est simulée par méthodes numériques sur les frontières du modèle fini arbitrairement retenu.

- Dans un cas réel, les ondes se propagent dans un milieu considéré comme très grand (infini) à l'échelle de l'étude et l'énergie initiale émise à la source, dans l'hypothèse d'un milieu purement élastique, a une distribution décroissante avec la distance parcourue (amortissement géométrique ou « radiatif »).
- Dans la pratique, le mouvement sismique (de dimensionnement) est connu à la surface du sol, en champ libre. Afin de connaître le signal sismique $u(z, t)$ à une profondeur donnée, suffisamment importante pour que ce mouvement ne soit pas affecté par la présence d'une structure en surface, il faut procéder à une étape spécifique de traitement du signal visant à « remonter » au signal « source », au niveau du substratum sismique, tel qu'il serait avant de

traverser les couches superficielles (celles-ci pouvant jouer un rôle de filtre). Cette opération de traitement du signal se nomme « déconvolution » (Figure I-6).

- L'étape suivante consiste alors à appliquer ce signal déconvolué de façon uniforme à la base du modèle complet (sol, fondation, structure) et la réponse en surface est calculée par une méthode d'approximation numérique de solutions de problèmes aux limites dynamiques. Il s'agit, comme dans toutes les méthodes numériques, de trouver une approximation discrète d'un problème différentiel aux limites linéaires.

1.6.1.2 Variante de la méthode globale

Une variante de la méthode globale consiste en la réduction de domaine. Elle permet de réduire le domaine du modèle à un domaine plus petit limitant ainsi le coût de calcul.

Dans les grandes lignes, la méthode consiste à ramener les forces agissant sur le système global sol-structure à une surface continue entourant la structure et une petite partie du sol. Le domaine complet est divisé en deux modèles.

- le premier modèle considéré comme « proche » est constitué de la structure et d'une partie du sol avoisinant, de dimensions suffisamment grandes.
- le second modèle désigne le reste du domaine. Celui-ci est considéré comme assez éloigné pour être assimilé au milieu extérieur. Il peut alors être tronqué. La frontière fictive entre les deux parties est désignée par un contour.

1.6.2 Méthode de superposition

1.6.2.1 Théorème de Kausel

La méthode fait appel au principe de superposition et consiste à analyser le problème d'interaction sol-structure en plusieurs étapes successives. Chaque étape est réputée plus simple à résoudre que le problème global. Le principe du théorème de superposition de Kausel et Roesset est schématisé par la (Figure I-7).

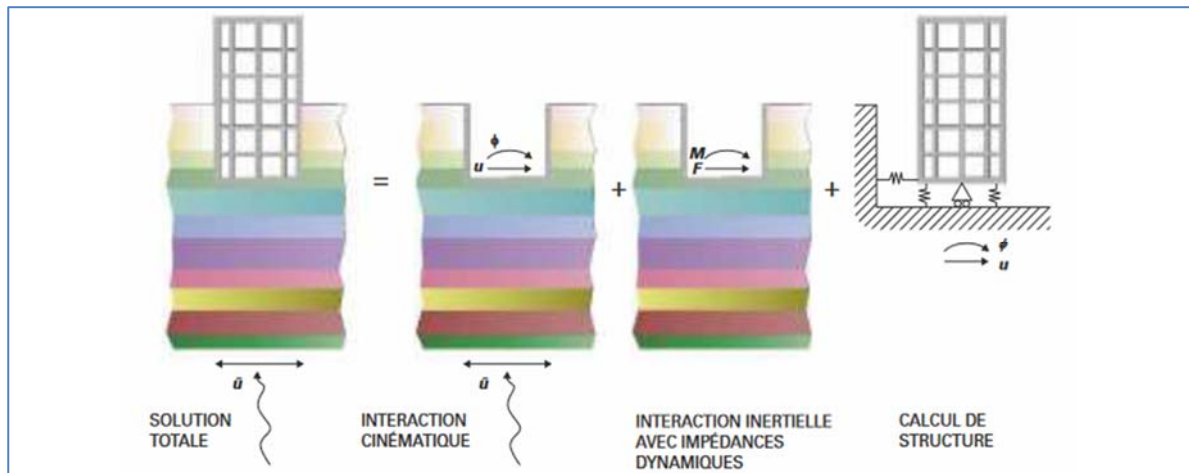


Figure I-7 : Schématisation du théorème de superposition de Kausel [28]

Ainsi, les sous-structures sont constituées, d'une part, par le sol et, d'autre part, par la structure. Les équations d'équilibre de chaque sous-système sont posées, puis les conditions de compatibilité à l'interface sont précisées à savoir la continuité en déplacement et en contrainte.

Il faut distinguer trois grandes étapes dans la méthode

- étape 1 – Interaction cinématique
- étape 2 – Interaction inertielle
- étape 3 – Calcul de structure

I.6.3 Méthode de sous structure

La méthode de sous-structuration est une méthode d'analyse assez répandue dans la pratique de l'interaction sol-structure sous séisme et a fait l'objet de programmes informatiques spécifique. Son principe est celui de la construction d'un modèle « hybride » combinant une discrétisation numérique « du champ proche » et de solutions semi-analytiques de propagation d'ondes pour le champ lointain [28].

La mise en équation repose sur une formulation dans le domaine fréquentiel et fait appel au principe de superposition (théorème de superposition de Kausel et Roesset) comme le schématise la (Figure I-8).

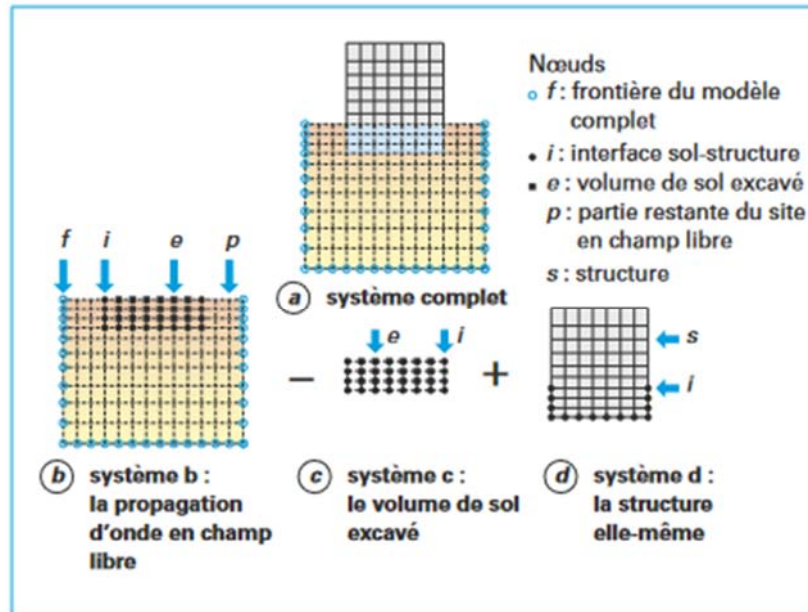


Figure I-8: Illustration du principe de sous-structuration [28]

Trois systèmes d'équations matricielles sont alors considérés

- Système (b) traduisant la réponse du sol en l'absence de la structure au niveau des nœuds de la zone maillée. Ce système résulte d'une résolution analytique des équations de propagation d'ondes dans le cas d'un sol multicouche.
- système (c) traduisant la réponse du volume de sol excavé au niveau de l'ensemble des nœuds de la zone maillée. Ce système résulte d'une discrétisation numérique de ce volume (même maillage que celui de la partie ancrée de la structure).
- système (d) traduisant la réponse de la structure seule, exprimée au niveau des nœuds d'interface avec le sol. Ce système résulte également d'une discrétisation numérique de l'élément structure.

La combinaison, puis la condensation, de ces trois systèmes (au point où devront être exprimées les fonctions d'impédances) permet ainsi de remonter directement à la matrice de souplesse (puis, par inversion, à la matrice d'impédance) pour une fréquence de sollicitation donnée. Par rapport à un traitement numérique complet, cette méthode présente l'avantage décisif d'avoir une discrétisation limitée à l'emprise de la fondation avec un traitement rigoureux des conditions de radiation vers l'infini, ce qui permet de s'affranchir des problématiques liées aux conditions aux limites inhérentes aux modèles numériques complets.

I.6.4 Méthode hybride

La méthode de sous-structuration suppose implicitement la validité du principe de superposition qui requiert notamment un comportement linéaire élastique du sol. Pour pallier cette difficulté, la méthode hybride a été développée. Elle est intermédiaire entre l'analyse directe et la méthode de sous-structuration [28]. Elle consiste à décomposer le sol en deux domaines :

- Le premier est un domaine « champ proche », intégrant. L'ouvrage lui-même, le massif de sol situé dans la zone d'influence de l'ouvrage, et permettant un traitement des non-linéarités liées au comportement du sol ;
- Le deuxième domaine est le « champ libre » suffisamment éloigné de la fondation et où le comportement du sol n'est pas affecté par l'interaction avec l'ouvrage. Le problème consiste alors à définir les coefficients de la matrice d'impédance du champ lointain. Ainsi, le champ lointain peut être traité par les techniques adaptées pour les problèmes linéaires (exemple : impédances dynamiques), alors que le champ proche est incorporé dans le modèle de la superstructure et peut être traité par une méthode directe.

Le point délicat des méthodes hybrides est la définition de la frontière entre le champ proche et le champ lointain, élément qui doit être déterminé indépendamment selon les particularités du problème traité.

I.6.4.1 Concept du macro-élément

Comme il est évident dans la (Figure I-9), le macro-élément, dans le cadre de la méthode des éléments finis, est une boîte à laquelle nous appliquons à son entrée des déplacements et qui permet de calculer en sortie le torseur des efforts associés en considérant diverses non-linéarités [8].

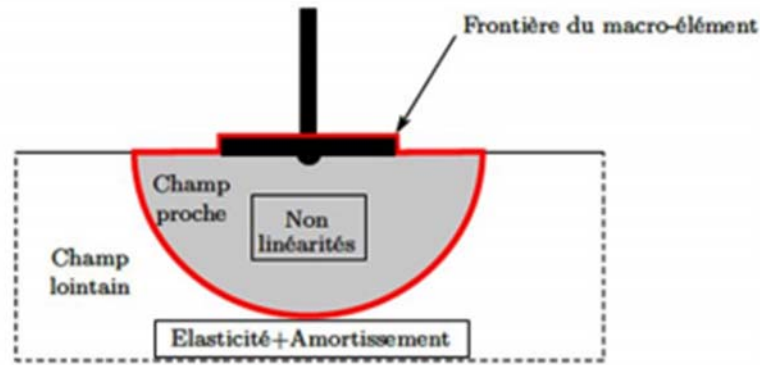


Figure I-9 : Décomposition en champ proche et champ lointain pour la définition de la frontière d'un macro-élément d'ISS (grange, 2008)

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre vous avons défini des notions nécessaires pour la compréhension du phénomène de l'interaction sol structure. Aussi, nous avons exposé quelques méthodes qui permettent de prendre en compte l'ISS dans le calcul des structures. En effet, la méthode globale ainsi que celle de sous-structuration ont été parmi les premières à être utiliser. Mais le fait d'étudier le système complet (sol+structure) rend l'analyse lourde et complexe. Après quoi, d'autres méthodes ont été développées afin de remédier à ce problème, telle que la méthode hybride, mais cette dernière présente aussi des inconvénients tels que la détermination de la limite entre le champ proche et le champ lointain. Ces méthodes ont contribué énormément à la compréhension de l'ISS mais elles restent limitées. C'est pour cela, que les recherches dans ce domaine ne cessent d'évoluer. Nous allons alors, exposer par la suite, un état de l'art, dans lequel nous avons regroupé les différentes méthodes utilisées dans le cas des structures de type bâtiments.

Chapitre2 : Etat d'art sur la prise en compte de l'ISS

II.1 Introduction

Les ingénieurs analysent et conçoivent des structures, ils ignorent souvent l'interaction entre le sol et la structure, bien que ce phénomène ait une grande influence sur le comportement de la structure, en fonction des caractéristiques du sol et de la structure elle-même.

Par conséquent, de nombreuses recherches ont été menées dans ce domaine suivant les différents types de fondations. Nous allons alors présenter par la suite quelques-unes, en mettant l'accent principalement sur les études réalisées dans le cas des bâtiments.

II.2 Structures sur fondations superficielles

Dans cette partie, nous allons présenter les différentes recherches qui ont été menées sur des structures construites sur des fondations superficielles, en évoquant principalement les méthodes utilisées dans ce cas-là.

II.2.1 Semelle isolée rectangulaire

En (1992) Sieffert and Franck a fait un ouvrage a pour objectif de rassembler l'ensemble des fonctions d'impédance des fondations superficielles de façon à mettre à la disposition de l'utilisateur un outil suffisant, dans la majorité des cas, pour le calcul des vibrations d'une fonction. Le domaine d'application s'étend des fondations de machines aux structures soumises à des sollicitations sismiques [27].

En (2006) L. Khalil et al, ont fait une étude paramétrique sur l'influence de l'interaction sol-structure sur la fréquence fondamentale de structure sous chargement sismique. L'analyse a été effectuée en utilisant une modélisation numérique par éléments finis. L'influence est présentée sous forme d'un abaque qui permet par simple lecture de déterminer F_{ISS}/F_{en} en fonction de $\log(K_{ss})$, où le K_{ss} est un paramètre adimensionnel représentant la rigidité relative sol-structure [16].

En (2009) L. Khalil présente l'Influence de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des bâtiments : analyse dans les domaines linéaire et non linéaire [17].

L'étude est réalisée en utilisant une modélisation tridimensionnelle par différences finies intégrant dans la même analyse les différentes composantes du système, à savoir le sol, la fondation et la structure. Une partie comporte une étude de l'influence de l'interaction sol-fondation-structure sur la fréquence fondamentale des structures de type bâtiment. Le sol et la

fondation sont modélisés à l'aide des éléments ressorts. L'analyse montre que l'interaction sol-structure peut réduire d'une manière très importante la première fréquence des structures de type bâtiment. Un abaque a été proposé pour une prise en compte aisée de cette interaction dans l'évaluation de la première fréquence des bâtiments.

On présente une étude tridimensionnelle de l'interaction sol-structure. Le comportement du sol est supposé élastique. L'analyse montre que la réponse de la structure dépend sensiblement de l'interaction complexe entre le sol et la structure, qui fait intervenir plusieurs paramètres, notamment le contenu fréquentiel du chargement, les fréquences propres du massif du sol et de la structure. Elle montre également que le comportement non linéaire du sol rend l'analyse plus complexe à cause de l'apparition de multiples fréquences dans le massif de sol. L'étude de l'influence du comportement non linéaire du sol et de la structure sur l'interaction sol-fondation-structure. Cette étude montre que la plasticité du sol et des éléments de la structure peut avoir une forte influence sur la réponse sismique de la structure.

En (2010) M. Tamahoult et T. Branci présente influence de l'interaction sol structure sur la réponse dynamique des structures des bâtiments. Il a pris 2 portiques en béton armé repose sur des semelles superficielles en béton [28].

Le premier sans prise en compte de l'ISS est l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base. Le deuxième tenant en compte de l'ISS en modélisant le sol par des ressorts Les changements dans le sol de base et les paramètres structuraux déterminent le rapport entre la période propre du mode fondamental du modèle de base fixe (considérant fixe à la base T FIXE), et avec du même modèle (cette fois en considérant ISS T)

La variation du rapport T Fixe/T en fonction de la rigidité relative (K_{ss}) calculé par sa formule, cette variation peut être rapprochée pour avoir l'allure d'une courbe simple bien précise en fonction de $\log(K_{ss})$ qui dépend de la caractérisation de la structure

En (2012) N. Benlaala a montré l'influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments, Ce travail comprend le calcul de la réponse de la structure (avec ou sans ISS) à partir de période de base des différents types de sol (rocheux; fort; lâche; très meuble) et l'effort tranchant à la base de la structure; déformation et la hauteur du bâtiment dépend des paramètres de la réponse dynamique (période et transfert) [7].

Le résultat et l'interprétation sur ces cas une étude comparative entre les sites sans ISS et avec ISS montre que la période fondamentale est le déplacement relatif et absolu augmentent. On constate que la prise en compte de l'ISS est plus importante pour la diminution de l'effort tranchant à la basse

En (2013) S. Aissaoui et A. Baouch [2] ainsi qu'en (2014) Z. Benadla et al [5] ont étudié l'interaction dynamique sol-structure dans le cas de bâtiments sur fondations superficielles. Deux cas de bâtiments ont été étudiés (R+4 et R+6) qui reposent sur des semelles isolées modélisées par des ressorts. La rigidité de ces derniers est exprimée en fonction des caractéristiques des semelles ainsi que le type de sol. Les fréquences fondamentales en tenant en compte de l'ISS ont été relevées et comparées aux fréquences des mêmes structures encastées. L'analyse sous l'effet du séisme de Boumerdès 2003 a révélé que le fait de prendre de considération l'interaction sol-structure peut amplifier les accélérations, les déplacements et la durée du mouvement peut augmenter également au niveau de la structure, Mais cette augmentation diminuera forcément les contraintes au niveau de la base de la structure.

En (2014) M. Miloudi et F.Z. Ramdani se sont penchés sur l'étude dynamique non linéaire de l'interaction sol structure où ils ont considéré de la non-linéarité géométrique, matérielle et de contact dans le calcul des bâtiments. Une étude transitoire sous l'effet de deux séismes de différentes intensités (faible et forte) a été menée sur un portique à des différents étages [22]. L'étude a montré plus la hauteur augmente, plus l'écart entre le cas ISS et le cas fixe augmente. De même, dans un bâtiment de 10 étages, les non-linéarités géométriques sont clairement visibles. En introduisant la non linéarité de contact les résultats ont montré que le déplacement et l'accélération maximaux obtenus pour le cas ISS dépasse largement les valeurs obtenues en considérant le modèle fixe.

II.2.2 Semelle isolée circulaire

En (1973) MacCalden et Matthiesen ont étendu le travail de Bycroft établi en (1956) qui ont déterminé un modèle analytique pour le mouvement d'une fondation rigide isolée de forme circulaire posée sur un demi-espace élastique, et ont développé une formulation matricielle pour déterminer le déplacement dynamique induit par la présence d'une fondation voisine chargée harmoniquement et attachée au demi-espace élastique. Cependant, des études comparatives ont été présentées ultérieurement qui ont révélé des écarts importants entre les résultats théoriques et expérimentaux [32].

En (1973) Luco et Contesse et al, ont abordé les problèmes bidimensionnels (2D) de l'interaction entre deux murs infinis ou plus en cisaillement placés sur des fondations circulaires rigides et soumis à des chargements harmoniques appliqués obliquement ou verticalement et provoquant des ondes de type S, [20].

En (1978) et (1980) Kobori et Kusakabe se sont investi sur les systèmes de structures à travers l'interaction entre deux structures assumant que chaque structure est formée par une masse et la fondation cylindrique encastrée en considérant un modèle tridimensionnel (3D) du sol est subdivisé en plusieurs plans horizontaux, [32].

En (1989) Triantafyllidis et Neidhart ont analysé l'interaction dynamique de deux fondations circulaires rigides croisées placées sur la surface d'un demi-espace linéaire, élastique, isotrope et homogène soumis à des ondes de Rayleigh, [32]. La méthode paramétrique est une méthode commune utilisée pour l'analyse d'ISS, où le sol est simulé en utilisant des ressorts, une masse et un amortissement, ou une fonction d'impédance équivalente.

II.2.3 Semelles filantes

En (1993) Hryniewicz a considéré l'incohérence dans le milieu du sol pour la première fois. L'auteur a examiné deux fondations filantes en 2D, basées sur un milieu semi-infini, constitué de couches de variables supposées aléatoires.

En (2001) Crémer a présenté un modèle de macroélément pour l'analyse de l'interaction dynamique sol-structure, où le comportement non linéaire au niveau de la fondation est décrit par un modèle de plasticité en couplage avec un modèle de décollement. Le modèle a été développé pour la configuration d'une semelle filante sur la surface d'un sol purement cohérent sans résistance à la traction.

En (2008) S. Grange a affirmé que dans le domaine du génie parasismique, l'interaction du sol avec la structure est un phénomène important à considérer pour espérer rendre compte du comportement réel d'une structure et donc évaluer sa vulnérabilité. Il a modélisé des fondations superficielles de forme : circulaire, rectangulaire ou filante reposant sur un massif de sol semi infini et permettant de prendre en compte l'ISS en considérant la plasticité du sol et le décollement de la fondation. Il a construit un élément d'interface 3D, basé sur la méthode des macroéléments. Cet élément a permis de travailler en variables globales (forces et déplacements), ainsi simplifier le problème en réduisant le temps de calculs. L'utilisation des variables globales a permis de réduire significativement le temps de calcul.

II.3 Structures sur Fondations profondes

II.3.1 Semelle reposant sur des pieux

En (1987) Tazoh et coll., ont fait des observations sismiques sur un pont et un bâtiment de 12 étages construit sur un sol mou. Ils ont souligné que le moment fléchissant est non seulement important au sommet du pieu, mais également important à la limite de la couche de sol où la rigidité change de manière significative, et le moment fléchissant au sommet du pieu est principalement lié à l'inertie de la superstructure [35].

En (2005) V. Gennaro et R. Frank ont fait une recherche consacrée à l'analyse du test de chargement des pieux modèles intérieurs. Calibration, dans la grande quantité de sol formée par les précipitations autour d'elle. Cette configuration a permis de s'affranchir en partie du problème de définition de l'impact causé par l'implantation forage, battage, levage...etc. La modélisation numérique de la mise en place des pieux est un énorme terrain ; les progrès actuels n'apportent pas de réponse globale et valent toujours la peine d'être développés[13].

En (2011) Correia a développé un macroélément pour pieux isolés dans un sol cohérent sous charge. Un séisme latéral a été appliqué en tête de pieu. La méthode adoptée utilise la loi de comportement inélastique Linéaire, intégrant l'impédance élastique proposée par Gazetas (1991) (et adoptée dans EC8 (2005)) afin de reproduire la réponse élastique du pieu sous faible contrainte. Ainsi la coupler avec le modèle plastique [30].

En (2018) Lesgidis et al. Ont développé un macro-élément, où ils ont montré que la dépendance en fréquence peut reproduire les caractéristiques du système à différentes intensités de tremblement de terre. Leur méthode a été divisée en deux composants de base couplés en série. Macro cellules indépendantes de la fréquence qui gèrent la réponse statique non linéaire des systèmes et des modèles. La rhéologie dépend de l'intensité de chargement. Bien que cette méthode soit intéressante, le programme de l'étalonnage numérique proposé est coûteux en valeurs et en temps [19]

II.4 Structures sur fondations continues

II.4.1 Radier général

En (1970) Lee et Harrison ont étudié l'interaction sol-fondation-structure et ont proposé deux modèles analytiques afin d'étudier des semelles continues ainsi que des radiers en 2D

Ces modèles tiennent en compte de l'effet de la rigidité de la superstructure sur les forces et les moments transmis aux fondations [33].

En (1971) Luco et Westmann ont donné des fonctions de rigidité dynamique. Dans la même année, Haddadin a suggéré une approche de sous-structuration afin de tenir compte de la rigidité relative entre le sol et la fondation et celle entre la fondation et la superstructure [34].

En (1972) Lee et Brown ont mené une étude comparative sur trois bâtiments à plusieurs étages reposant sur des radiers, Les résultats consistent à calculer les moments, les forces de cisaillement et les flèches [33].

En (2015) H. Niandou a étudié le phénomène d'interaction sol-structure en fonction de la variabilité spatiale des propriétés du sol. L'analyse minutieuse des résultats permettent de déterminer les zones où les contraintes maximales sont générées. Les résultats ont mis en évidence la prise en compte de la variabilité spatiale pour améliorer la sécurité effective du radier. Il est également nécessaire d'améliorer cette connaissance en variabilité, en particulier la longueur relative des propriétés du sol [26].

II.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une synthèse des différents travaux réalisés sur l'interaction sol-structure en considérant différents types de fondations (superficielles et profondes). A l'issue de ce qui a été présenté, nous allons étudier le cas d'un bâtiment (R+8) fondé sur un radier général.

Chapitre 3 : Influence de l'ISS sur la fréquence fondamentale des structures

III.1 Introduction

Dans la première partie du chapitre nous présentons une analyse détaillée de l'influence de l'ISS sur la réponse dynamique des structures. Un cas de référence composé d'un portique à une ouverture est considéré. L'analyse est effectuée en utilisant le logiciel ANSYS V19.0.

Dans un but de comprendre les paramètres clés sol/structure qui influent la réponse dynamique de notre portique, nous effectuons une étude paramétrique en fonction des principaux paramètres tels que le type du sol. L'analyse concerne la période fondamentale.

En seconde partie, nous présentons une vérification de l'abaque qui donne la rigidité relative K_{ss} en fonction du rapport F_{enc}/F_{ISS} tirée de la bibliographie. Pour cet effet, nous allons considérer un bâtiment à huit étages plus un rez-de-chaussée (R+8) constitué d'ouvertures multiples (06 ouvertures dans le sens longitudinal et 05 dans la direction transversale). Le bâtiment est fondé sur un radier général. Cette vérification concernera le calcul de la fréquence fondamentale. Le but principal de cette vérification, est de savoir si le fait de modéliser le radier par des rigidités testées sur des semelles isolées et filantes sont toujours fiables pour le cas d'un radier général.

Après nous présentons une étude de l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique du bâtiment en comparant les accélérations, vitesses, déplacements au sommet du bâtiment ainsi que les contraintes en bas du bâtiment.

III.2 Étude modale du modèle de référence

Le but de cette partie est de vérifier ou plutôt de retrouver les résultats trouvés par les références [2] et [5].

La structure modélisée est un portique en béton armé comportant une travée de 5 m. Les poteaux de hauteur =4m. La section du poteau est de (0,50x0,50m²). Le plancher est constitué d'une dalle pleine de 0,21 m d'épaisseur et d'une surface de (5x5 m²). La structure repose sur des semelles superficielles en béton de section (2mx2m) représenté sur la Figure III-1, Ayant les caractéristiques suivantes :

- $I_p = (0,5)^4 / 12 = 0,00521 \text{ m}^4$
- La rigidité des poteaux $E_p = 32000 \text{ MPa}$

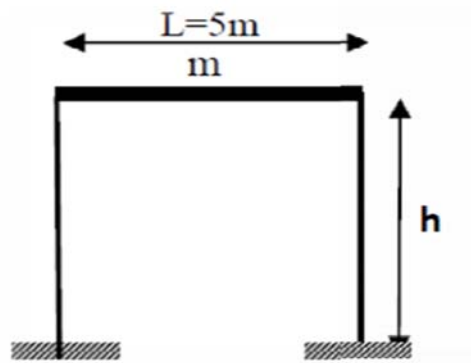


Figure III-1 : Modèle sans prendre en compte l'interaction sol-structure

Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés (sol, béton) sont représentées dans le (Tableau III-1) :

Tableau III-1: Caractéristiques mécaniques du système étudié

	Masse volumique (KN/m ³)	Module de Young E (MPa)	Coefficient de poisson ν	Vitesse des ondes sismiques V_s (m/s)
Sol	20	52	0,3	200
structure	24,5	32000	0,2	

Ensuite on a fait le maillage du portique représenté sur la Figure III-2.

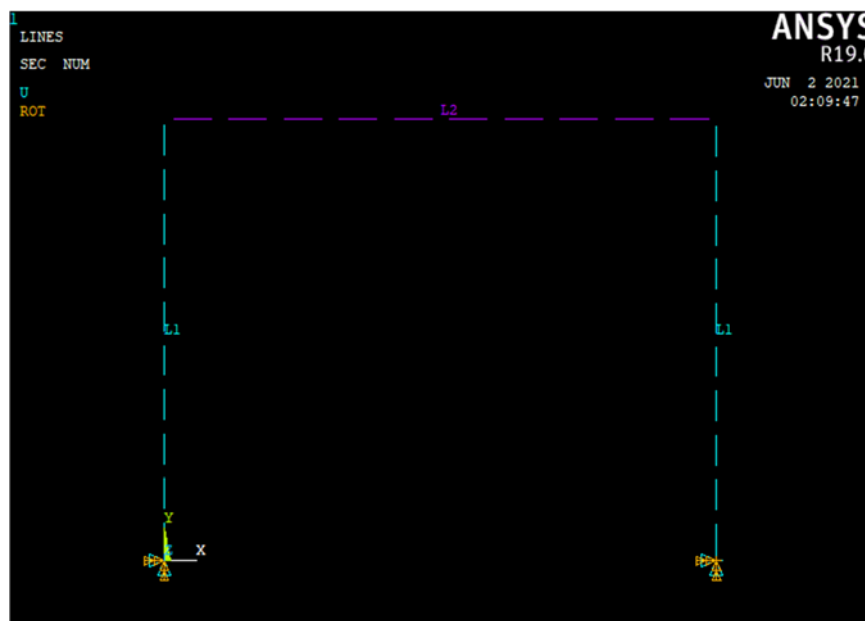


Figure III-2 : Maillage du portique sans ISS

L'analyse modale du portique a été effectuée et les résultats sont représentés sur la Figure III-3. Nous avons relevé les différents modes fondamentaux pour le cas encastré. Le calcul donne une fréquence fondamentale de 8,05 Hz pour le cas encastré. Le mode fondamental trouvé représente le mode de translation suivant la direction X le cas traité, Le mode fondamental représente le mode pour lequel le 'Ratio' est égale à 1.

***** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION ***** X DIRECTION							
MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	4.64285	0.21538	0.0000	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000
2	8.05189	0.12419	125.20	1.00000	15675.2	0.980769	0.882487
3	9.80593	0.10198	0.0000	0.00000	0.0000	0.980769	0.0000
4	14.9057	0.67088E-01	0.0000	0.00000	0.0000	0.980769	0.0000
5	21.8378	0.45792E-01	0.0000	0.00000	0.0000	0.980769	0.0000
6	28.6843	0.34862E-01	0.0000	0.00000	0.0000	0.980769	0.0000
7	45.1284	0.22159E-01	0.0000	0.00000	0.0000	0.980769	0.0000
8	60.6928	0.16476E-01	-17.532	0.140028	307.358	1.0000	0.173038E-01
9	63.5088	0.15746E-01	0.0000	0.00000	0.0000	1.0000	0.0000
10	82.2986	0.12151E-01	0.0000	0.00000	0.0000	1.0000	0.0000
-----					-----		
sum					15982.5	0.899790	
-----					-----		

Figure III-3: Résultats des fréquences propres sans ISS

III.3 Prise en compte de l'effet de l'ISS

La modélisation de l'ensemble (fondation + sol) est faite à l'aide de 6 ressorts, dont 3 travaillant en translation et 3 en rotation, tels qu'ils sont présentés sur la Figure III-4.

Les coefficients rigidités des ressorts sont déterminés à l'aide des formules données par (Newmark & Rosemblyeth 1971) [25] dans le cas des fondations rectangulaires :

- Translation verticale :

$$K_V = \frac{G_S}{1+v} \beta_z \sqrt{A} \quad (\text{III-1})$$

- Translation horizontale :

$$K_h = 2(1+v)G_S \beta_x \sqrt{A} \quad (\text{III-2})$$

- Rotation:

$$K_\theta = \frac{1+v}{4} G_S \beta_x (a^2 + b^2) \sqrt{A} \quad (\text{III-3})$$

Avec :

$$G_S = \frac{E}{(1+v)} \quad (\text{III-4})$$

A : aire de la fondation ; (2 m × 2m)

a : dimension parallèle à la direction du séisme ;

b: dimension perpendiculaire à la direction du séisme ;

β_x et β_z : paramètres dépendant du rapport a/b ; avec $\beta_z = 2,18$ et $\beta_x = 1$ d'après [28].

ν : coefficient de Poisson

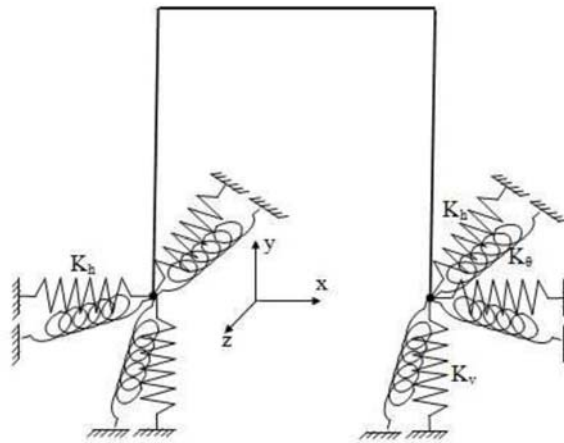


Figure III-4 : modèle en tenant en compte de l'interaction sol-structure [5]

D'après les données :

$$K_V = 124500\text{KN/m} \quad K_h = 104000\text{KN/m} \quad K_\theta = 104000\text{KN/m}$$

Pour le modèle considérant l'ISS, l'interaction est modélisée par un élément de type ressort nommé « COMBIN14 », comme le montre la Figure III-5. L'élément a la capacité de travailler longitudinalement ou en torsion dans des applications à une (option K2), deux ou trois dimensions (option K3), (Figure III-6). Nous avons essayé d'appliquer le cas de trois dimensions (« 3D-longitudinal » et « 3-D torsional »), ce qui aller nous faciliter la modélisation en ne considérant que deux ressorts pour chaque fondation mais après plusieurs tentatives, les résultats trouvés n'ont pas été satisfaisants. Alors, nous avons donc appliqué le cas unidimensionnel, en introduisant six ressorts à chaque pied de poteaux, en changeant à chaque fois le bon degré de liberté (option K2) (Figure III-6).

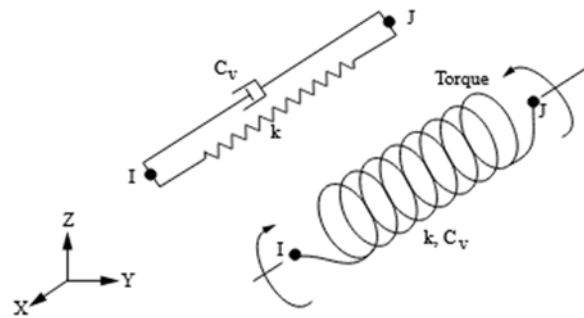


Figure III-5 : l'élément COMBIN14 (ANSYS Documentation)

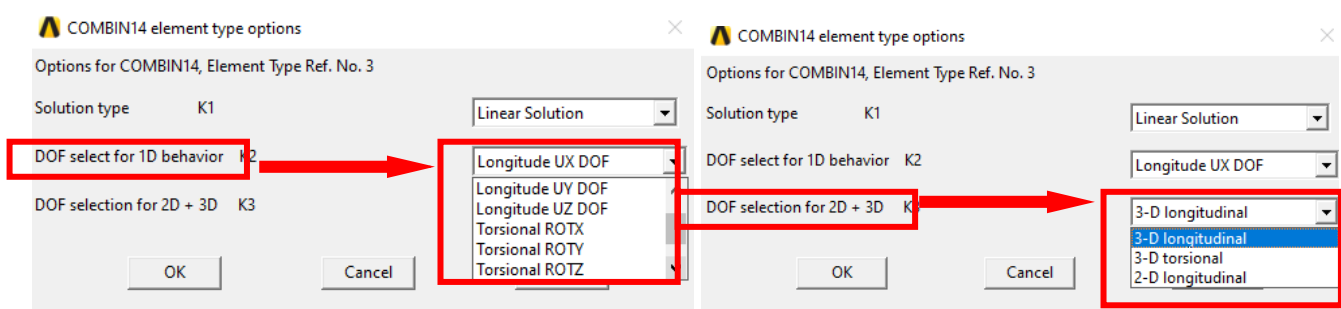


Figure III-6 : Réglage des options de l'élément COMBIN 14.

Le modèle numérique que nous avons choisi pour cette première étude est composé de 33 Nœuds et de 42 Éléments en comptant les douze éléments ressorts aux pieds des poteaux (Figure III-7).

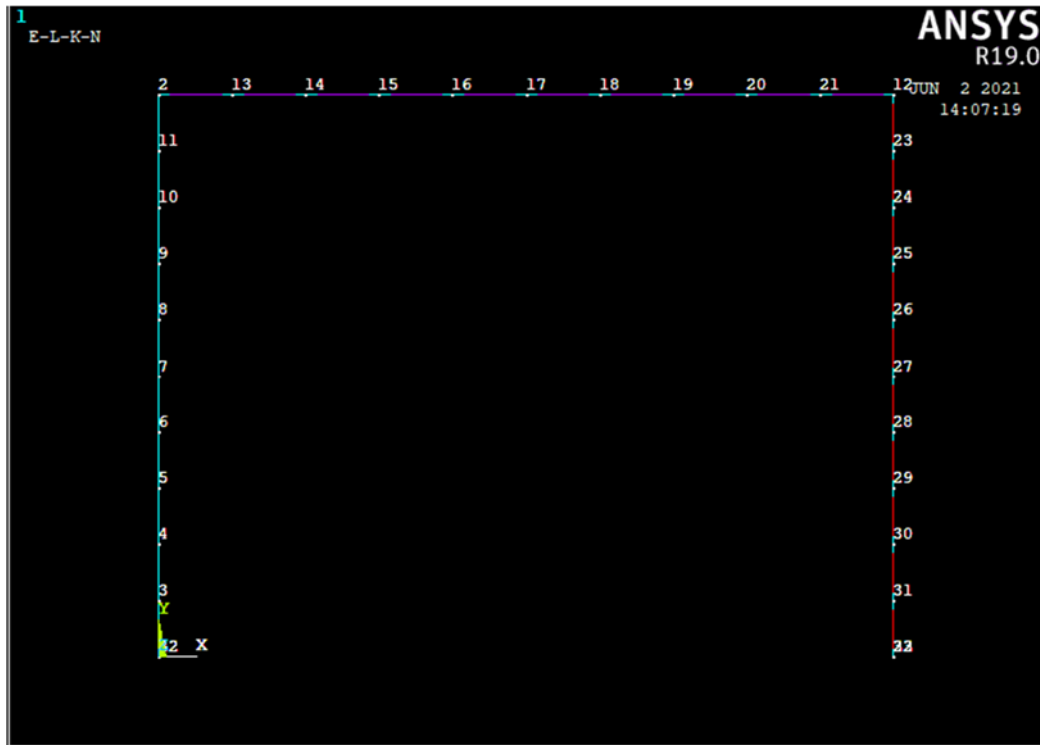


Figure III-7 : Maillage du portique

L'analyse modale du portique a été effectuée. Nous avons relevé les différents modes fondamentaux pour le cas en considérant l'ISS. Le calcul donne une fréquence fondamentale de 5,51 Hz pour le cas en tenant en compte de l'interaction sol-structure. Donc, nous avons une diminution dans la fréquence fondamentale en considérant l'ISS.

```

**** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION **** X DIRECTION

```

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC.FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	3.21710	0.31084	0.0000	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000
2	5.51835	0.18121	127.89	1.000000	16355.2	0.931379	0.920770
3	7.40170	0.13510	0.0000	0.000000	0.00000	0.931379	0.00000
4	13.0141	0.76840E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.931379	0.00000
5	14.0594	0.71127E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.931379	0.00000
6	23.2833	0.42949E-01	-5.9835	0.046787	35.8023	0.933417	0.201561E-02
7	26.2308	0.38123E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.933417	0.00000
8	36.1646	0.27651E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.933417	0.00000
9	41.2010	0.24271E-01	0.0000	0.000000	0.00000	0.933417	0.00000
10	49.4911	0.20206E-01	34.194	0.267373	1169.20	1.00000	0.658241E-01
sum					17560.2		0.988610

Figure III-8 : Résultats des modes (listing)

Le mode fondamental trouvé représente le mode de translation suivant la direction X ou en considérant l'ISS. Ce mode est représenté en Figure III-8. Celle-ci représente le listing des modes

extraits ainsi que les facteurs de participation de masse. Le mode fondamental représente le mode pour lequel le 'Ratio' est proche de 1. Ce paramètre représente le rapport entre la masse participative et la masse totale de la structure.

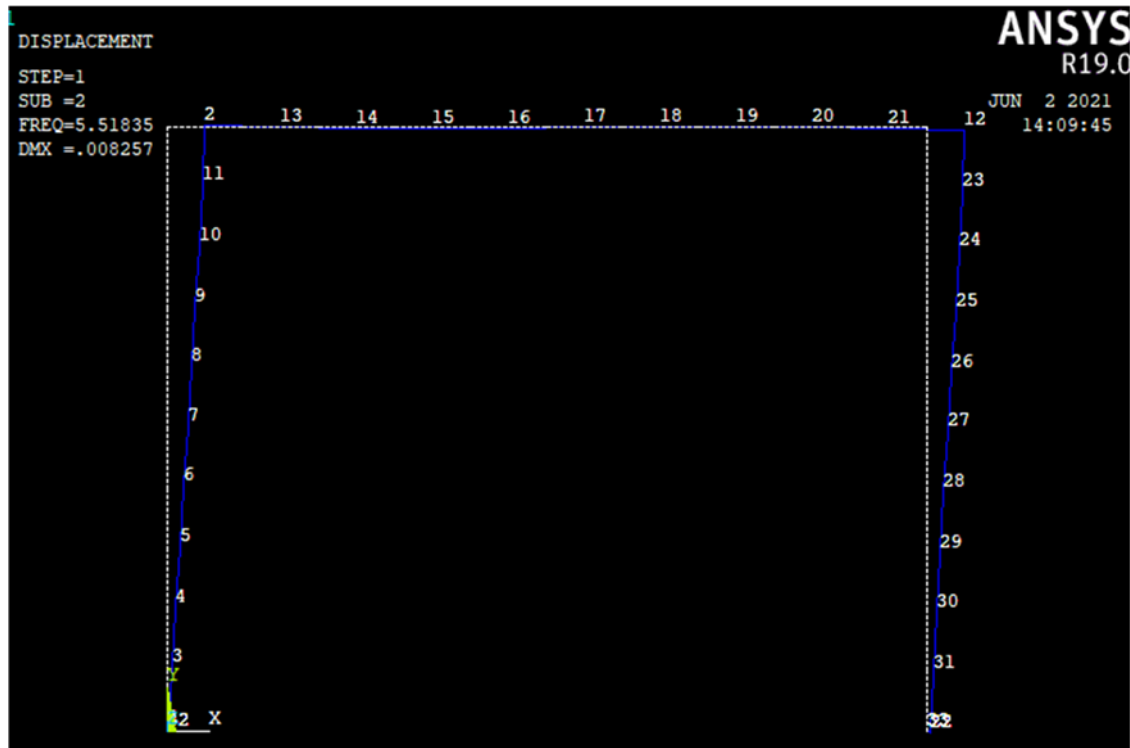


Figure III-9 : la déformée de mode fondamental.

La direction du mode propre du portique est une translation suivant la direction de x.

Les résultats trouvés sont comparables à ceux trouvés par les références, comme c'est indiqué dans le Tableau III-2. Alors, nous allons passer à l'exemple réel de bâtiment afin de voir l'influence de l'ISS sur la réponse de ce dernier.

Tableau III-2 : Résultats des fréquences fondamentales

	Modèle	Aissaoui&Baouch, 2013, [2]	Benadla et al., 2014 [5]
F_{enc} (Hz)	8,05	8,13	8,13
F_{ISS} (Hz)	5,51	5,53	5,53

III.4 Présentation du bâtiment

Il s'agit d'une construction à usage d'habitation qui comporte un rez-de-chaussée des locaux à usage personnel ainsi que huit étages à usage d'habitation avec trois logements par niveau de type F4, surmontés par une terrasse inaccessible.

Cette construction est destinée à être implantée dans la nouvelle ville cité Yaghmoracen « Boudjlida » dans la wilaya de Tlemcen, le bâtiment est implanté dans une zone de faible sismicité (zone I). Il s'agit d'un bâtiment de 19,50 mètres de longueur et de 23,40 mètres de largeur. Quant à la hauteur du RDC est de 3,4 mètres et elle vaut 3,06 mètres pour les étages courants. Ce qui fait une hauteur totale de 27,54 mètres

Le bâtiment est considéré comme un ouvrage courant ou d'importance moyenne (groupe d'usage 2) puisque sa hauteur totale ne dépasse pas 48m. Le sol d'assise de la construction est un sol meuble et d'après le rapport du laboratoire de la mécanique de sol, la contrainte du sol est $\sigma_{\text{sol}} = 1,5$ bars pour un ancrage de 2,00 m.

La configuration du bâtiment présente une irrégularité en plan et en élévation (Annexe A). D'après la classification des RPA99 version 2003.

La stabilité de l'ouvrage est en fonction de la résistance des différents éléments structuraux (poteaux, poutres, voiles...) aux différentes sollicitations (compression, traction, flexion...) dont la résistance de ces éléments est en fonction du type des matériaux utilisés et de leurs dimensions et caractéristiques.

La structure du bâtiment a un système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques, voiles.

III.4.1 Choix des fondations

Le dimensionnement a été fait par (A. Nehari et K. Nadji) [24], qui a montré que le type de fondations est un radier général

III.4.2 Modélisation du bâtiment (R+8)

La structure est modélisée par des éléments poteaux/poutres (BEAM188), Figure III-10 dont l'ensemble forme un portique. Quant aux voiles sont modélisés par des éléments coques, nommés (SHELL181), présentés dans la Figure III-11. On obtient alors le modèle numérique montré en Figure III-12.

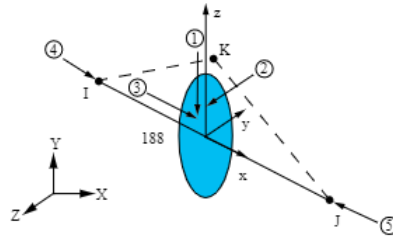


Figure III-10 : L'élément poutre BEAM188

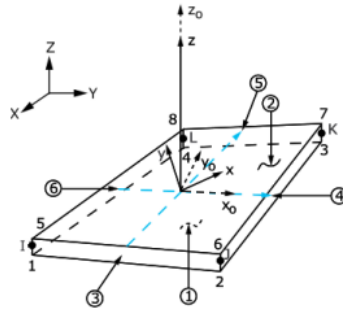


Figure III-11 : Présentation des éléments SHELL181

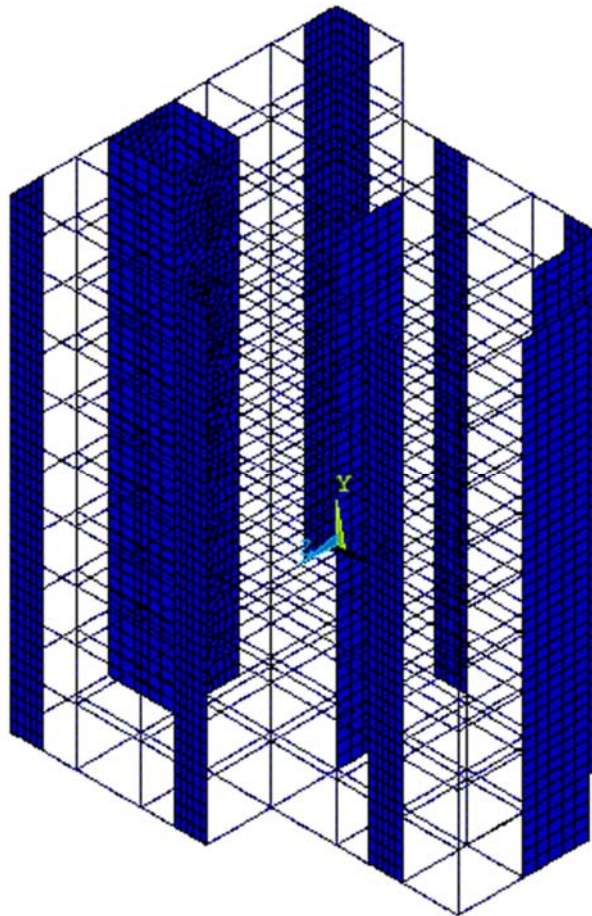


Figure III-12 : la structure R+8 en 3D

Le dimensionnement des poteaux et poutres est résumé dans le Tableau III-3 : Dimensionnement des éléments principaux [27] :

Tableau III-3 : Dimensionnement des éléments principaux [27]

Dimensions des poteaux	
RDC	(45 × 45) cm ²
Etages 1, 2 & 3	(40 × 40) cm ²
Etages 4, 5 & 6	(35 × 35) cm ²
Etages 7 & 8	(30 × 30) cm ²
Dimensions des poutres principales (40 × 30) cm ²	
Dimensions des poutres principales (30 × 30) cm ²	
Epaisseur du voile = 15cm	

Nous avons considéré pour ce calcul, une hauteur d'étage de 3,06m mètres et une rigidité E_p de 32000 MPA ainsi qu'une inertie de poteaux de 0,00341m²

Nous avons choisi d'utiliser les équations présentées précédemment (III-1) à (III-3) à pour modéliser le radier. Nous l'avons donc discrétisé sous forme de surfaces rectangulaires et chaque zone sera divisée sur les poteaux qui lui sont adjacents.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés (sol, béton) sont représentées dans le Tableau III-1, présenté précédemment.

Une analyse modale de la structure a été effectuée, et les résultats sont représentés sur la

Figure III-13. Nous avons relevé le mode fondamental pour le cas encastré. Le calcul donne une fréquence fondamentale de 1,678 Hz

**** PARTICIPATION FACTOR CALCULATION **** X DIRECTION

MODE	FREQUENCY	PERIOD	PARTIC FACTOR	RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION	RATIO EFF.MASS TO TOTAL MASS
1	1.67825	0.59586	917.37	1.000000	841559.	0.824989	0.712709
2	1.91269	0.52282	122.85	0.133912	15091.1	0.839783	0.127805E-01
3	2.73526	0.36560	-20.061	0.021869	402.461	0.840178	0.340840E-03
4	3.77233	0.26509	-39.435	0.042987	1555.12	0.841702	0.131702E-02
5	4.69542	0.21297	8.4197	0.009178	70.8910	0.841771	0.600370E-04
6	4.83553	0.20680	-27.697	0.030192	767.120	0.842524	0.649667E-03
7	5.94156	0.16831	-383.28	0.417808	146905.	0.986536	0.124413
8	6.66031	0.15014	39.921	0.043517	1593.69	0.988099	0.134969E-02
9	7.06259	0.14159	-110.08	0.120001	12118.6	0.999979	0.102632E-01
10	7.28838	0.13720	4.6525	0.005072	21.6457	1.00000	0.183316E-04
sum					0.102009E+07		0.863902

Figure III-13 : Résultats des modes (listing) sans ISS

Le mode fondamental trouvé représente le mode de translation suivant la direction x qui est montré sur la Figure III-14.

DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
FREQ=1.67825
RSYS=0
DMX =.001953
U
ROT

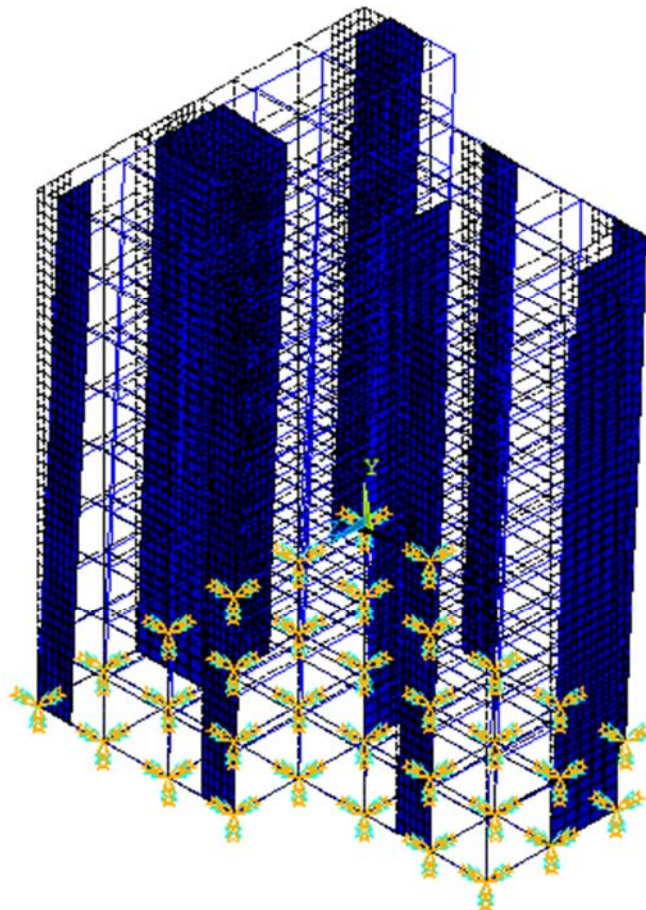


Figure III-14 : la déformée du mode fondamental dans le cas encastéré.

III.5 Etude paramétrique

L'objectif de cette étude est de déterminer le rapport entre la fréquence fondamentale du modèle encastré à la base F_{enc} et du même modèle considérant l'interaction sol structure F_{ISS} et de tracer le graphe F_{enc}/F_{ISS} en fonction de $\log(K_{ss})$ qui est la rigidité relative en prenant l'expression suivante, tirée de [17]

$$K_{ss} = \frac{N_o * N_b * \rho * V_s^2 * H^3 * \sqrt{\frac{A}{A_o}}}{N_e * e * p * I_p^{\frac{3}{4}}} \quad (III-5)$$

Avec :

V_s : la vitesse des ondes de cisaillement dans le sol ;

E_p , I_p sont respectivement, le module de Young et le moment d'inertie des poteaux.

H : la hauteur d'étage.

A : l'aire de la fondation.

N_e , N_o , N_b désignent respectivement le nombre d'étages, et de travées du bâtiment dans les directions, longitudinale (N_o) et transversale (N_b).

Les résultats obtenus permettront de mettre en évidence l'influence de l'interaction sol-structure sur la fréquence fondamentale de la structure.

III.5.1 Méthode de prise en compte de l'ISS

Afin de déterminer l'effet de l'ISS sur la réponse dynamique des structures. Nous allons procéder à une variation des paramètres de base relatifs au sol et à la structure en vue de déterminer le rapport entre la fréquence du mode fondamental, F_{enc} du modèle encastré et celle du même modèle considérant l'ISS F_{ISS} .

On modélise le même système avec des ressorts en utilisant les éléments COMBIN14 (3translation et 3rotation) à la base pour différentes valeurs de rigidité

III.5.2 Influence de V_s sur le rapport F_{enc}/F_{ISS}

On calcule pour chaque valeur de vitesse d'onde de cisaillement, les différentes rigidités de ressorts, translationnelles et rotationnelles pour différentes formes de fondations.

Pour $v_s=100(m/s)$

Tableau III-4 : Rigidités des ressorts pour $V_s=100 m/s$

Surface de semelle	$K_v * 10^5 (KN/m)$	$K_h * 10^5 (KN/m)$	$K_\theta * 10^5 (KN/m)$
15,21	4,47	3,01	11,45
12,831	4,10	2,75	7,23
11,505	3,89	2,61	7,80
10,452	3,70	2,48	6,96
7,906	3,22	2,16	4,29
5,772	2,75	1,48	2,89

Pour $v_s=150(m/s)$

Tableau III-5 : Rigidités des ressorts pour $V_s=150 m/s$

Surface de semelle	$K_v * 10^5 (KN/m)$	$K_h * 10^5 (KN/m)$	$K_\theta * 10^5 (KN/m)$
15,21	10,03	6,73	25,60
12,831	9,21	6,18	20,71
11,505	8,72	5,85	17,50
10,452	8,31	5,58	15,62
7,906	7,23	4,85	9,63
5,772	6,18	4,14	6,48

Pour $v_s=200(m/s)$

Tableau III-6 : Rigidités des ressorts pour $V_s=200 m/s$

Surface de semelle	$K_v * 10^5 (KN/m)$	$K_h * 10^5 (KN/m)$	$K_\theta * 10^5 (KN/m)$
15,21	15,71	10,54	40,9
12,831	14,5	9,8	31
11,505	13,66	9,17	27,41
10,452	13,50	8,8	24,4
7,906	11,50	7,8	16,20
5,772	9,66	6,49	10,13

Pour $v_s=400$ (m /s)

Tableau III-7 : Rigidités des ressorts pour $V_s=400$ m/s

Surface de semelle	$K_v * 10^5 (KN/m)$	$K_h * 10^5 (KN/m)$	$K_\theta * 10^5 (KN/m)$
15,21	71,81	48,18	183,22
12,831	65,95	44,25	156,08
11,505	62,45	41,90	125,26
10,452	59,53	39,94	111,80
7,906	51,77	34,73	68,97
5,772	44,23	29,68	46,39

Pour $v_s=800$ (m /s)

Tableau III-8 : : Rigidités des ressorts pour $V_s=800$ m/s

Surface de semelle	$K_v * 10^5 (KN/m)$	$K_h * 10^5 (KN/m)$	$K_\theta * 10^5 (KN/m)$
15,21	287,37	192,82	733,20
12,831	263,94	177,10	611,22
11,505	249,93	167,70	501,16
10,452	238,22	159,84	447,40
7,906	207,19	139,01	276,03
5,772	177,03	118,78	185,67

Le Tableau III-9 montre les valeurs du rapport F_{enc}/F_{ISS} ainsi que les rigidités relatives K_{ss} en fonction de la vitesse des ondes de cisaillement du sol.

Tableau III-9 : Influence de V_s sur le rapport F_{enc}/F_{ISS} et K_{ss}

V_s (m/s)	F_{ISS}	F_{enc}/F_{ISS}	$\text{Log}(K_{ss})$
100	1,290952279	0,769225252	-0,019810414
150	1,37795	0,821063608	0,332372104
200	1,42290435	0,847850052	0,582249577
400	1,52634481	0,90948596	1,18430957
800	1,56049	0,92983167	1,78636956

Nous remarquons que le rapport F_{enc}/F_{ISS} est proportionnel à la vitesse d'ondes. C'est-à-dire, plus la vitesse d'onde augmente plus les rigidités augmentent.

Cette variation a été conduite en considérant différentes vitesses des ondes de cisaillement dans le sol. Cela a pu représenter l'effet de l'ISS sur la fréquence fondamentale de la réponse de la structure. Le premier effet de l'ISS constaté est l'augmentation de la fréquence fondamentale de la structure par rapport à la valeur obtenue dans le cas de la structure à base encastree.

III.5.3 Vérification de l'abaque

La figure montre les résultats d'exemples d'une vérification de calcul de l'influence de la rigidité relative sur la fréquence fondamentale d'un bâtiment qui été effectué par [17].

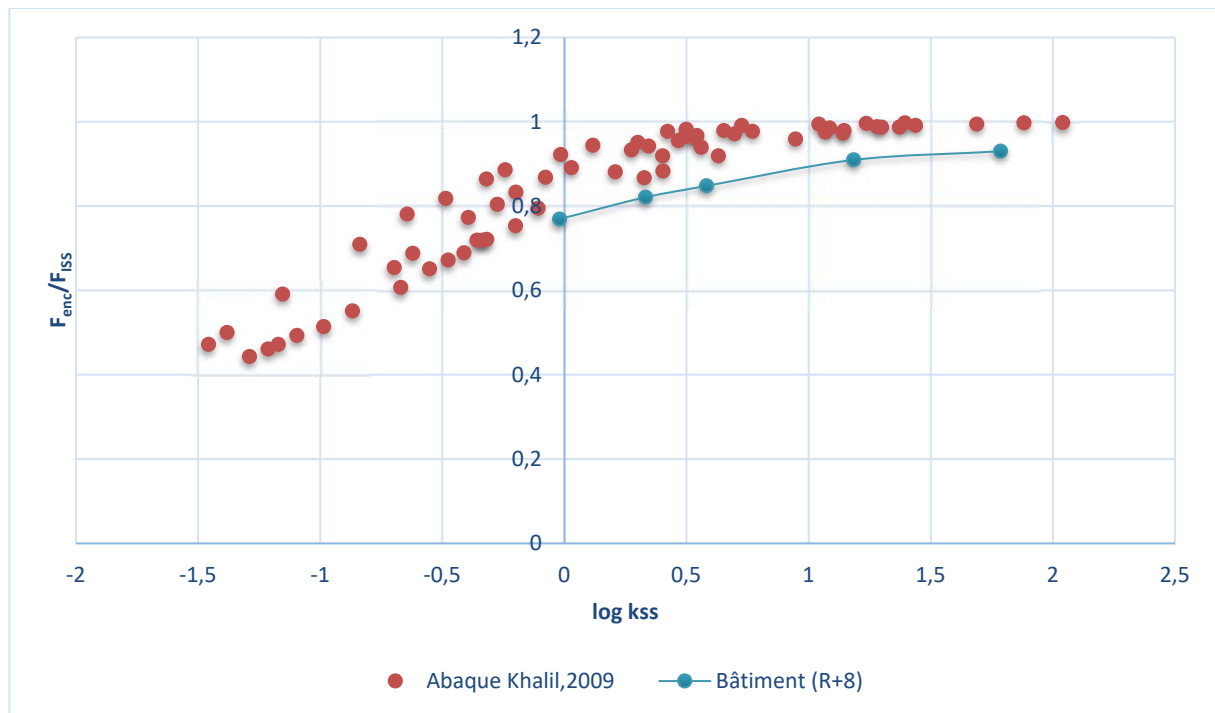


Figure III-15 : Vérification de l'abaque de K_{ss} proposé par (Khalil, 2009)

Dans notre cas, les résultats obtenus sont très proches de l'abaque référence, ce que indique on peut utiliser l'abaque afin de déterminer la fréquence fondamentale (F_{ISS}) de n'importe quel bâtiment construit sur des fondations superficielles.

III.6 Analyse transitoire de notre bâtiment

Le comportement sismique d'un ouvrage dépend du mouvement sismique imposé par le sol à la réponse dynamique de l'ouvrage, du comportement des fondations pendant et après le séisme, ainsi que la capacité de résistance de la superstructure. La prise en compte des caractéristiques du sol, qui jouent un rôle important sur les aspects dynamiques de la structure, revêt donc une importance particulière dans l'étude des effets de l'interaction sol structure sur la réponse sismique de l'ouvrage.

Pour l'analyse sismique qui devra être menée par la suite, Nous utilisons l'enregistrement sismique réel afin de solliciter notre structure. Il s'agit du séisme de Boumerdès 2003 (Figure III-16) appliqué à la base de la structure suivant la direction x, l'analyse est faite, en considérant le cas fixe et le cas flexible en considérant un amortissement de 2%.

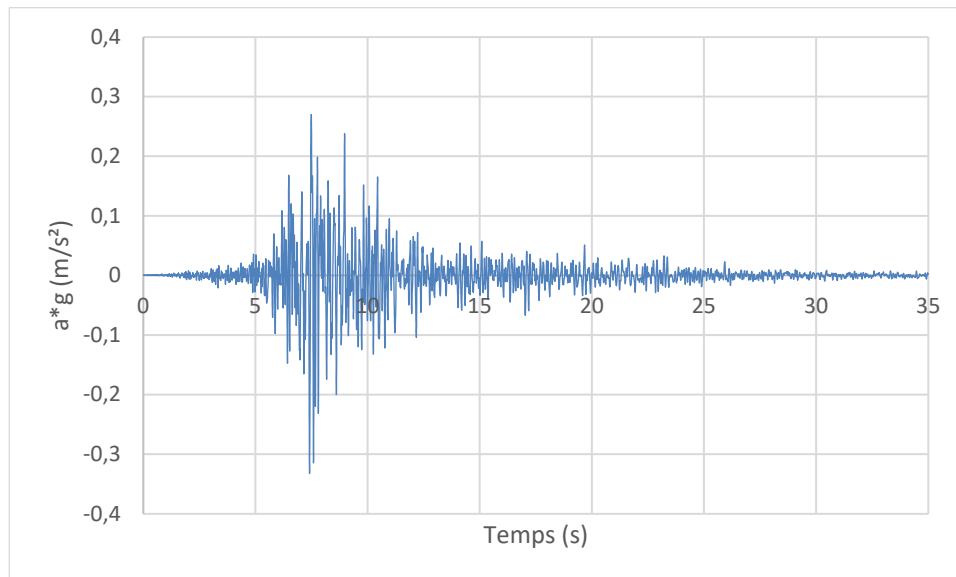


Figure III-16 : Accélérogramme de Boumerdès 2003

III.6.1 Points de mesures

D'après la modélisation sur logiciel, on a choisi le nœud au sommet de la structure numéro 3357 pour faire notre mesure (déplacement, vitesse, accélération) de coordonnées $x=19,5$ $y=27,88$ $z=3,90$

A la base de la structure on a choisi le nœud 510 de coordonnées $x=0$ $y=1,36$ $z=13,56$ pour le calcul des contraintes

III.6.2 Effet de l'ISS sur l'accélération

Nous représentons les résultats des accélérations, relevées au sommet du bâtiment que nous illustrons dans la Figure III-17.

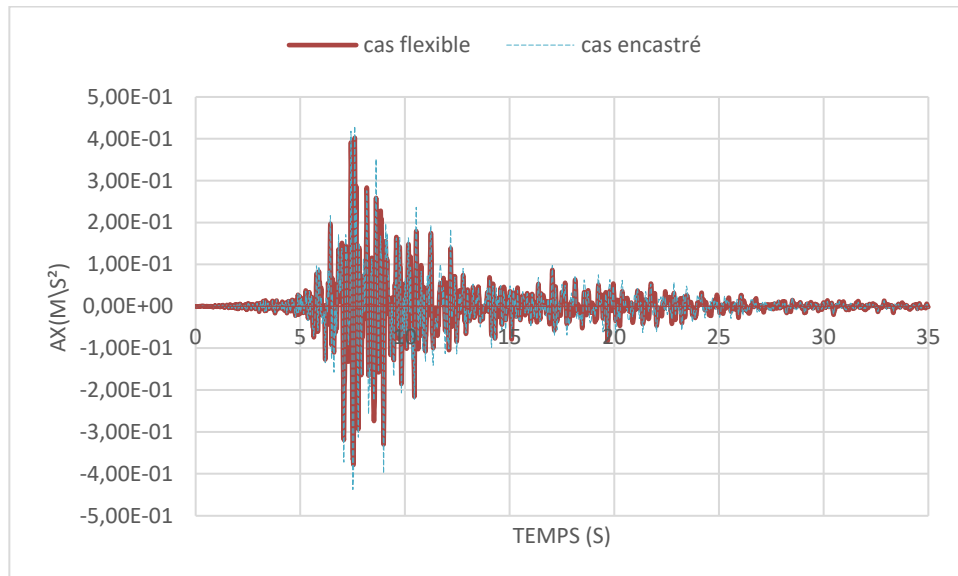


Figure III-17 : Accélération au sommet de la structure dans les deux cas, encastré et flexible (nœud 3357)

Nous remarquons que dans le cas flexible, l'accélération maximale diminue légèrement par rapport au cas encastré. Dans ce dernier, on a relevé une valeur maximale de $0,437 \text{ m/s}^2$. Ce qui conduit à une différence de $0,035 \text{ m/s}^2$ par rapport au cas flexible.

III.6.3 Effet de l'ISS sur le déplacement

Nous avons relevé le déplacement au sommet du bâtiment que nous avons représenté sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** D'après les deux graphes, on constate que les deux déplacements sont comparables. Aussi, nous remarquons que le cas ISS dépasse le cas encastré pour certaines valeurs entre 5 et 10 secondes.

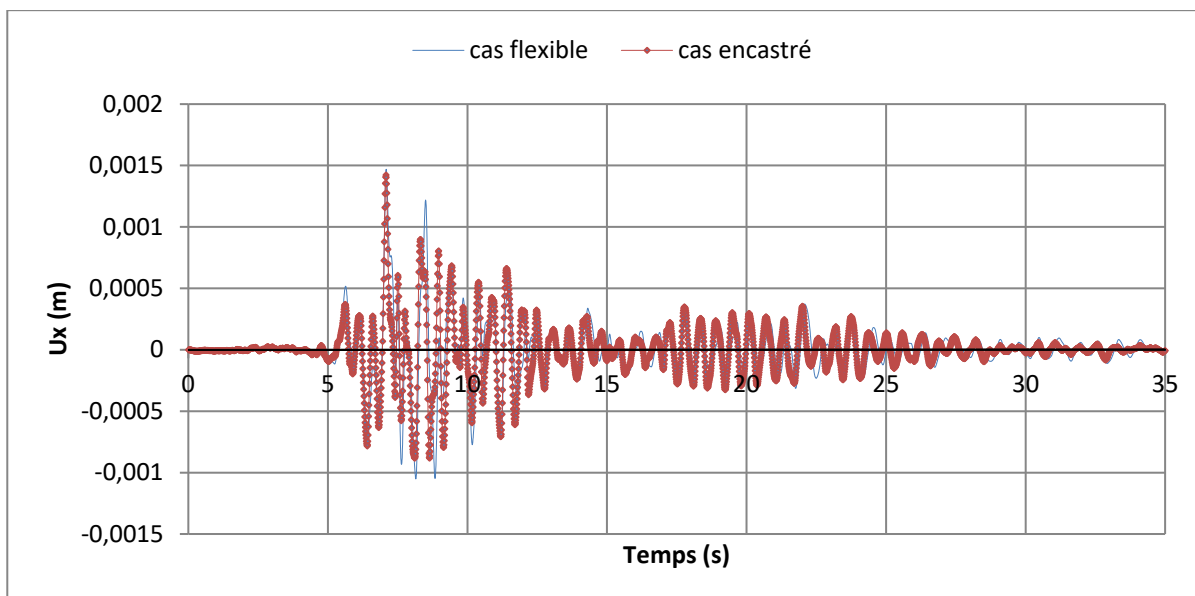


Figure III-18 : Déplacements au sommet de la structure pour les deux cas, encastré et flexible (nœud 3357)

III.6.4 Effet de l'ISS sur la vitesse

Les figures suivantes présentent les résultats de la vitesse en fonction du temps. La vitesse obtenue dans le cas flexible est légèrement diminuée par rapport au cas encastré dans l'ensemble. En revanche, nous remarquons que dans le cas flexible, la valeur maximale est de $1,89 \times 10^{-2}$ m/s alors qu'elle est de $1,82 \times 10^{-2}$ m/s pour le cas encastré. Une légère augmentation.

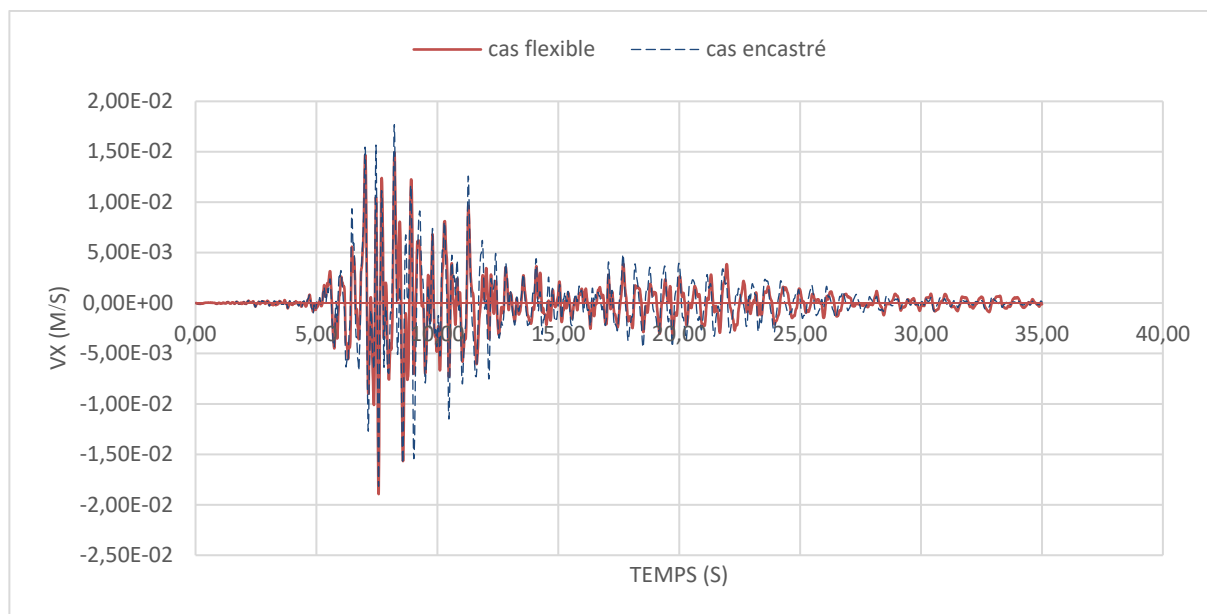


Figure III-19 : Vitesses au sommet du bâtiment pour les deux cas encastré et flexible (nœud 3357)

III.6.5 Effet de l'ISS sur la contrainte

Nous traçons par la suite la contrainte en fonction du temps relevée au bas de la structure.

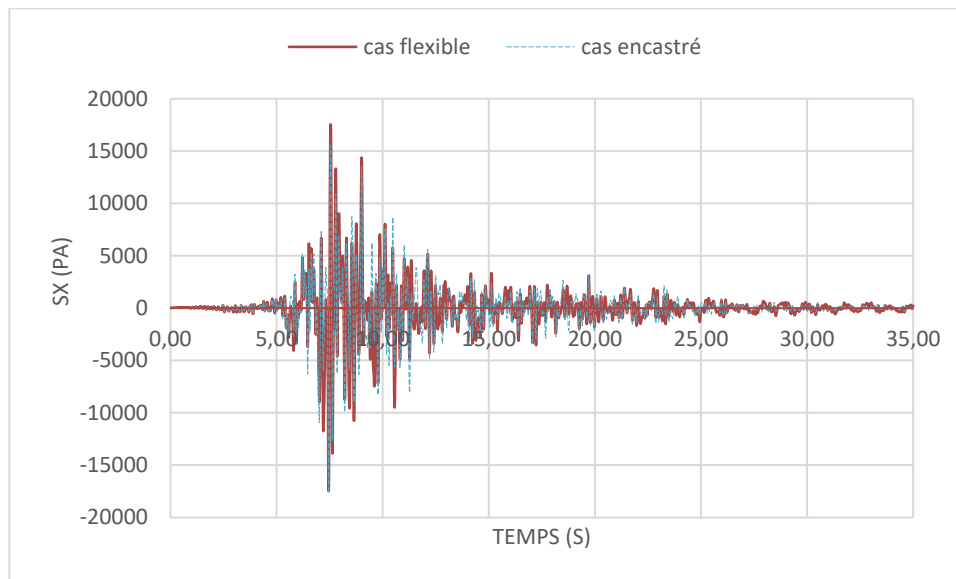


Figure III-20 : Variation de la contrainte en fonction du temps dans le cas encastré et flexible (nœud 510)

D'après les résultats nous observons une légère diminution de la contrainte, la valeur maximale du cas flexible est de 17669,6(Pa) alors qu'elle est égale à 17545,8(Pa) pour le cas encastré.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une étude modale et paramétrique a été faite pour confirmer que l'abaque est valable pour le cas d'une fondation superficielle de type radier général.

Ainsi, l'étude transitoire qui a été réalisée sur le bâtiment (R+8) sur radier général n'a révélé que de légères modifications au niveau des valeurs maximales du cas de la considération de l'ISS vis-à-vis du cas fixe. En effet, selon les résultats obtenus, on conclut que l'accélération n'a baissé que de 8,7% en considérant l'ISS. Alors que les valeurs maximales du déplacement et de la vitesse se sont relevés d'environ 4%. Concernant la contrainte maximale à la base, les valeurs sont presque les mêmes, la différence n'est que de 0,7% seulement.

Conclusion Générale et perspectives

Ce travail implique l'utilisation de modèles numériques pour analyser l'impact de l'ISS sur les bâtiments fondés sur radier général.

La recherche sur l'influence de l'ISS montre qu'elle peut réduire considérablement la fréquence fondamentale des structures de bâtiment.

La modélisation du bâtiment (R+8) a été faite en portique formé de système poteaux/poutres, en plus les voiles qui ont été modélisés par des éléments bidimensionnels de type coques (SHELL181). La structure est de forme irrégulière. Les résultats trouvés montrent que le radier peut être modélisé par des ressorts élastiques utilisés dans le cas des fondations superficielles de types semelles isolées et semelles filantes. Ainsi, en calculant le paramètre adimensionnel (K_{ss}), nous pouvons déterminer les fréquences fondamentales F_{ISS} . Et juger par la suite, si la considération de l'ISS a un impact remarquable sur le comportement dynamique de la structure.

L'étude transitoire a permis de voir l'influence de l'ISS sur la réponse sismique de notre bâtiment. Les résultats obtenus montrent que l'accélération n'a baissé que de 8,7% en considérant l'ISS. Alors que les valeurs maximales du déplacement et de la vitesse ont augmenté d'environ 4%. Concernant la contrainte maximale à la base, les valeurs sont presque les mêmes, la différence n'est que de 0,7% seulement. Nous pouvons conclure que l'étude du bâtiment que nous avons fait sous l'effet du séisme de Boumerdès d'intensité 0.33g ne nécessite pas l'introduction de l'ISS car les résultats sont presque les mêmes avec le cas encasté.

Comme perspectives, nous souhaitons que cette étude soit suivie par d'autres recherches dans lesquelles :

- Tout d'abord, reprendre le cas étudié avec des séismes plus forts et voir leurs impacts sur la réponse de la structure ;
- Faire une étude paramétrique qui concerne la hauteur totale du bâtiment. Il est fort possible que le fait d'augmenter le nombre d'étages influe sur les résultats
- Concernant la modélisation numérique, il faut revoir la possibilité d'utiliser l'option tridimensionnelle de l'élément ressort (COMBIN14), car l'utilisation de cette option réduira énormément le nombre d'éléments, ce qui réduit le temps de calcul. Chose que nous avons tenté de faire de la présente étude mais nous n'avons pas pu la développer davantage.

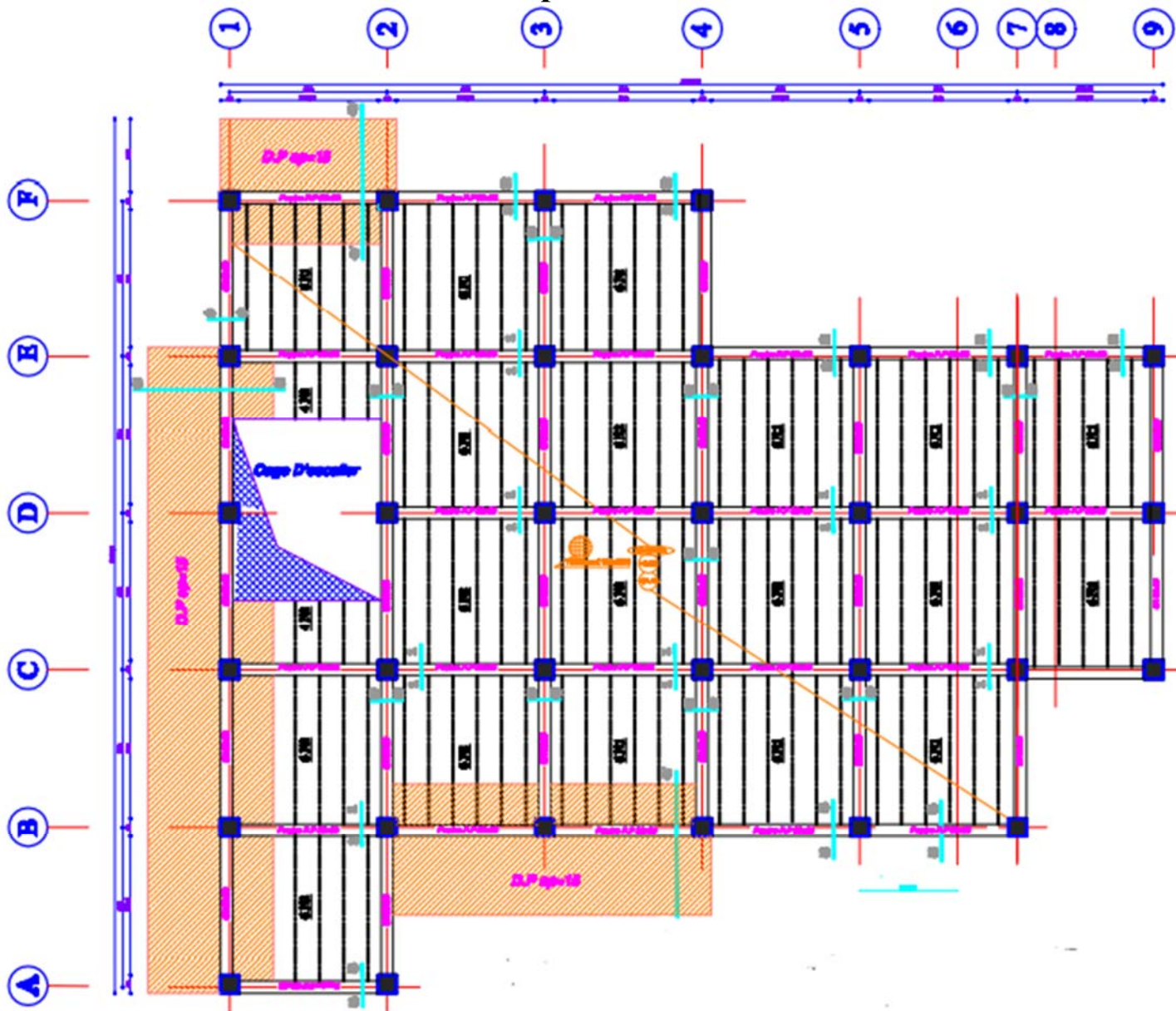
Références bibliographiques

- [1] Y. Agri interaction sol structure, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université El Hadj Lakhdar Batna, 2007.
- [2] S. Aissaoui et A. Baouch, Etude de l'interaction dynamique sol-structures dans le cas de bâtiments sous fondations superficielles, Mémoire de Master en Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid, 2013.
- [3] M. Barka et A. Djelmoudi, Modélisation de l'interaction sol-structure : comparaison entre une approche 3D-EF et une approche basée sur les macroéléments, Mémoire de Master en Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid 2017.
- [4] F. Belhadj, Modélisation de l'interaction Sol-structure sous l'action sismique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- [5] Z. Benadla, K. Hamdaoui, S. Aissaoui et A. Baouch, Influence of the soil-structure interaction of the seismic behavior of buildings on shallow foundations. International Journal of GEOMATE, March 2014, Vol. 06 No.1 (SI. No11) PP 811-816, ISSN :2186-2982(Print), 2186-29900(Online). DOI: 10.21660/2014.11.3311.
- [6] C. Ben aissi et S. Gouze, Interaction sol-structure d'un pont cadre, Département Génie civil, Faculté science et de technologie, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2020.
- [7] N. Benlaala, Influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments Université Mohamed Khider– Biskra, 2012
- [8] A. Bou Mehdi, Interaction dynamique sol-structure. Géotechnique, 2015.
- [9] S.Brûle F.Cuira pratique de l'interaction sol-structure sous séisme ,2018 afnor édition
- [10] M. Choinière, Influence de l'interaction sol-structure sur le calcul des efforts sismique, université de Sherbrooke, Janvier 2019.
- [11] P. Dangla et J .Semblat, Modélisation de la propagation d'ondes et de l'interaction sol-structure : approches par éléments finis et éléments de frontière, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2005
- [12] V. Davidovici, Eurocode 8, Pratique du calcul sismique, Guide d'application, afnor éditions-Eyrolles, 2013.
- [13] A. Gandomzadeh Interaction dynamique sol-structure influence des non-linéarités de comportement du sol, octobre 2008
- [14] V. Gennaro et R. frank Modélisation de l'interaction sol-pieu par la méthode des éléments finis (École Nationale des Ponts et Chaussées - LCPC, Institut Navier 2005)
- [15] R. Gholami V. Shirgi et al, A new analytical model for estimating the natura frequency of pile-supported bridges, Iran 2018.
- [16] L. Khalil et M. Sadek et I. Shahrour., Influence de l'interaction sol-structure (ISS) sur la fréquence fondamentale des bâtiments », XXIV^{ème} rencontres universitaires de Génie Civil, Montpellier 1-2 juin 2006.

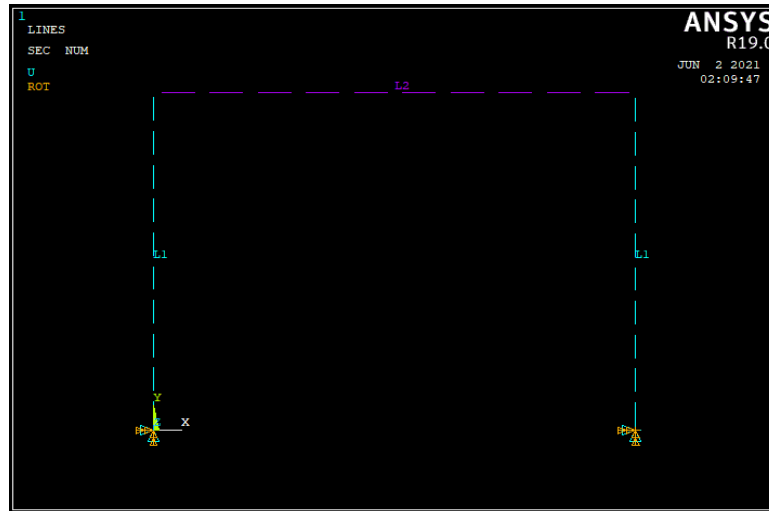
- [17] L. Khalil, Influence de l'interaction sol- structure sur le comportement sismique des bâtiments analyse dans le domaine linéaire et non linéaire », Thèse de doctorat, Lille 2009.
- [18] M. Kechroud et Y. Allal, Influence de l'interaction sol structure sur la période fondamentale des bâtiments, Université Mohamed Boudiaf -M'sila 2020.
- [19] N.Lesgidis et al a frequency-and intensity-dependent macroelement for reduced order seismic analysis of soil-structure interacting systems, 2018M.
- [20] Lou H. Wang Dynamic Structure-Soil-Structure Interaction: Literature Review, J. Soil Dynamics. And Earthquake Engineering., Vol. 31, pp. 1724-1731 (2011),
- [21] F. Meribout, Analyse de la transmission au sol des vibrations à partir d'une structure vibrante, Thèse de doctorat, Université Mentouri Constantine
- [22] M. Miloudi F.Ramdani, étude dynamique non linéaire de l'interaction sol-structure, Mémoire de Master en Génie Civil, 2014.
- [23] K. Mulliken, 3-D dynamic foundation-soil-foundation interaction on layered soil, 1998.
- [24] A. Nehari et K. Nadji, étude d'un bâtiment (R+8) de forme irrégulière à Tlemcen, mémoire de Master en Génie Civil, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2017.
- [25] N.Newmark et E.Rosenblueth. Fundamentals of earthquake engineering. PrenticeHall, Englewood Cliffs, 1971
- [26] H. Niandou Interaction sol – structure : Déformation d'un radier sur un sol hétérogène en 3D, 24 Jun 2015.
- [27] J. Sieffert C. Franck, Manuel des fonctions d'impédance fondation superficielle, Nantes 1992.
- [28] M. Tamahoult et T. Branci, Influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des structures des bâtiments, Université Hassiba Benbouali, Chlef 2010.
- [29] Techniques de l'Ingénieur, C 251 – 1, Bases de l'interaction sol-structure sous séisme Principes généraux et effets inertiels.
- [30] J. Pérez, P. Kotronis, S. Escoffier et F. Cuiira, Interaction dynamique sol-structure d'un groupe de pieux avec l'approche macroélément, Septembre 2019.
- [31] Xiang Wei Zhang, Modélisation physique et numérique des interactions sol-structure sous sollicitations dynamiques transverses, Autre, Université Grenoble Alpes, 2011.
- [32] Yongmei et al, Soil Dynamic and Earthquake Engineering, 2011.
- [33] S. Deepa Balakrishnan, Numerical investigations on soil structure interaction of multistorey frames, 2008
- [34] Luco and Westmann, Luco, J. E. and Westmann, R. A. (1968). Dynamic response of a rigid footing bonded to an elastic half-space. Journal of Applied Mechanics, ASME, 35(4) :697–705
- [35] C.Yun-suk, Etude numérique de l'interaction sol-pieux-structure sous chargement sismique, novembre 2000

Annexes

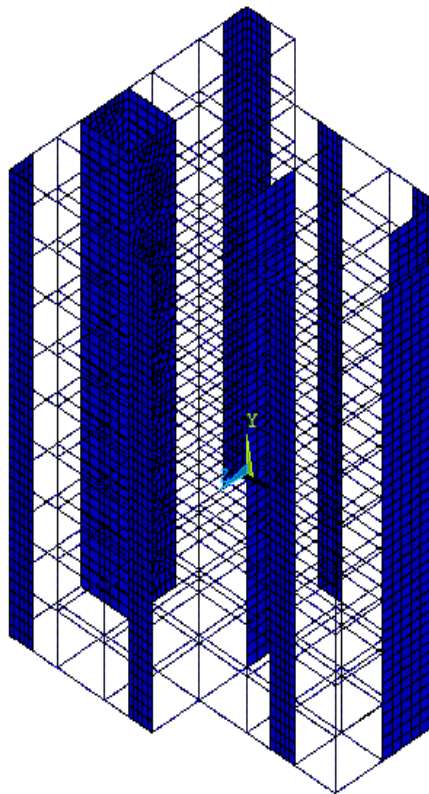
Annexe A : Vue en plan du bâtiment R+8



Annexe B : Cas traités



Cas du portique2D



Cas du bâtiment (R+8) en 3D