

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
N° :



DOMAINE : ST
FILIERE : GÉNIE CIVIL
OPTION : STRUCTURE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par: Nedjai Alaeddine

Rouane Zakarya

Intitulé

**L'influence de l'interaction sol structure sur la réponse
sismique des bâtiments (cas des bâtiments portiques
en béton armée)**

Soutenu devant le jury composé de:

| | | |
|----------------|----------------------|------------|
| TITOU MESSAOUD | Université de M'SILA | Président |
| MENASRI YOUCEF | Université de M'SILA | Rapporteur |
| MEKKI LAKHDAR | Université de M'SILA | Examineur |
| AMOUR AHMED | Université de M'SILA | Examineur |

Année universitaire : 2017 /2018

DEDICACE

قال تعالى: " و ما توفيقى إلا بالله عليه توكلت و إليه أنيب "

On dit souvent que le trajet est aussi important que la destination, après cinq ans d'étude et d'assiduité et en fin de ce cycle et le commencement d'un nouveau départ

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents (Noui et Lyamna), que Allah les garde et les protège pour leur soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés toutes ces années.

A toute ma famille sans exception de près ou de loin.

A mon binôme et Mon frère Zakarya.

Aux toutes mes très chères amies avec lesquelles j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.

A tous les amis d'études surtout promotion de master 2 génie civil 2018.

À tous nos enseignants: à travers toute l'étude. À tous ceux qui se sont tenus à nos côtés, même si nous vous offrons mille salutations et gratitude.

Les mots me manquent encore pour vous témoigner reconnaissance car un proverbe dit « Quelle que soit la valeur du présent fait à l'homme ; il n'y a qu'un seul mot pour exprimer la reconnaissance inspirée par la libéralité, ce mot c'est Merci ».

Enfin à tous ceux qui sont chers, merci et mille merci.

NEDJAI ALAEDDINE

DEDICACE

Je remercie dieu qui m'a donné la force de faire ce travail.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et m'a soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.

A tous mes frères, mes sœurs et toute ma famille sans exception

A mon cher ami Alaeddine

A toutes mes amies avec lesquelles j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur,

A tous les amis d'études surtout promotion de master 2 génie civil 2018.

A que toute personne m'ayant aidé de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

ROUANE ZAKARYA

REMERCIEMENT

A la fin de ce modeste travail nous adressons nos remerciements premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années d'études. Et tous les enseignants qui ont contribué à notre enseignement pendant toutes les années scolaires.

Nos remerciements s'adressent à Menasri .Y pour avoir proposé et dirigé ce travail et pour son suivi continu pendant la préparation de ce Mémoire.

Qu'il nous soit permis de remercier également toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration ce travail. leurs expériences et leurs conseils m'ont aidé à surmonter les nombreux obstacles que Nous avons rencontré.

Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger notre travail.

TABLE DES MATIERES

| | |
|----------------------------|-----|
| Dédicace..... | i |
| Remerciements..... | iii |
| Table des matières..... | iv |
| Liste des tableaux..... | iv |
| Liste des figures..... | iv |
| Table des Notations..... | xii |
| ملخص..... | xiv |
| Résumé..... | xv |
| Abstract..... | iv |
| Introduction générale..... | 1 |

CHAPITRE I

NOTION DE BASE SUR LES SEISMES

| | |
|---|----|
| I.1.Introduction | 3 |
| I.2.Définition..... | 3 |
| I.3. Origine et actionsdes séismes..... | 3 |
| I.4. Caractéristiques d'un séisme..... | 4 |
| I.5. Nature et mode de propagation des ondes sismiques..... | 4 |
| I.5.1.Ondes de volume..... | 5 |
| I.5.2. Ondes de surface..... | 6 |
| I.6. Mesure des ondes sismiques..... | 7 |
| I.6.1. Sismographes | 7 |
| I.6.2. Sismogramme..... | 8 |
| I.7. Echelles d'évaluation d'un séisme | 9 |
| I.7.1. Echelle de mercalli | 9 |
| I.7.2. Echelle De Richter | 9 |
| I.8.Zonage du risque sismique (aléas sismiques) | 9 |
| I.9. Conclusion..... | 12 |

CHAPITRE II

EFFETS DU SEISME SUR LES BATIMENTS

| | |
|---|----|
| II.1.Introduction..... | 13 |
| II.2.Différents type de structures en béton armé..... | 13 |
| II.2.1.Structure en portique (poteau-poutre)..... | 13 |
| II.2.2.Structure mixte (portique + voile)..... | 14 |
| II.2.3. Voiles en béton armé..... | 14 |
| II.3.Comportement dynamique des ouvrages | 15 |
| II.4. Types de déformation | 15 |
| II.5. Effet des séismes sur les bâtiments..... | 16 |
| II.5.1. Effets directs | 16 |
| II.5.1.1.Effondrement en galette (pancake) | 17 |
| II.5.1.2. Fissures en croix | 17 |
| II.5.1.3.Etage souple | 18 |
| II.5.1.4. Poteau courte | 19 |
| II.5.1.5.Dommage due aux détails d'armature | 20 |
| II.5.1.6.Martèlement | 21 |
| II.5.2. Effets indirects | 21 |
| II.5.2.1 Liquéfaction..... | 21 |
| II.5.2.2. Mouvements gravitaires (glissements) | 22 |
| II.6. Conclusion..... | 22 |

CHAPITRE III

INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|---|----|
| III.1. Introduction | 23 |
| III.2. Composantes de l'interaction | 24 |
| III.2.1. Interaction inertielle | 24 |
| III.2.2. Interaction cinématique..... | 24 |
| II .3. Formulation d'un problème d'interaction..... | 24 |

| | |
|--|----|
| III .4. Mouvement du sol en champ libre..... | 25 |
| III.5.Méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure | 26 |
| III.5.1.Méthode globale..... | 26 |
| III.5.2. Méthode des sous-structures..... | 27 |
| III.5.3. Méthodes hybrides | 29 |
| III.6. Modélisation de l'interaction sol-structure | 30 |
| III.6.1. Modélisation du sol par éléments ressorts..... | 30 |
| III.6.1.1. Méthode de Newmark-Rosenblueth..... | 31 |
| III.6.1.2. Méthode de Deleuze..... | 32 |
| III.6.2. Modélisation par des éléments finis..... | 34 |
| III.7.Conclusion | 34 |

CHAPITRE IV

MODELISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|--|----|
| IV.1 Introduction..... | 36 |
| IV.2.Présentation et caractéristiques des structures..... | 36 |
| IV.2.1.Présentation des structures..... | 36 |
| IV.2.2.Caractéristiques géométriques..... | 36 |
| IV.2.3.Caractéristiques mécaniques du béton | 38 |
| IV.2.4.Dimensionnement de la structure..... | 39 |
| IV.2.4.1.Planchers..... | 39 |
| IV.2.4.2.Poteaux et Poutres..... | 39 |
| IV.2.5.Charges appliquées..... | 39 |
| IV.2.5.1.Charges gravitaires..... | 39 |
| IV.2.5.2.Charges sismiques..... | 40 |
| IV.3.Méthode de l'analyse modale spectrale..... | 40 |
| IV.4.Spectre de réponse selon le RPA 99 (ver 2003)..... | 40 |
| IV.5.Modélisation de la structure..... | 42 |
| IV.6.Modélisation du sol (ressorts de sol)..... | 42 |
| IV.7.Résultats et interprétation sur les structures en béton arme..... | 44 |
| IV.7.1.Calcul des déplacements | 44 |
| IV.7.1.1 Déplacement maximal | 47 |
| IV.7.2.Effort tranchant..... | 48 |

| | |
|--|----|
| IV.7.2.1.Effort tranchant à la base..... | 50 |
| IV.7.3.Moment..... | 51 |
| Conclusions et recommandation | 54 |
| Références bibliographiques | 56 |
| Annexe | |

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

NOTION DE BASE SUR LES SEISMES

| | |
|--|----|
| Tableau 1-1: Coefficient d'accélération de zone sismique (rpa-version 2003) | 11 |
| Tableau 1-2: Classification des sites (rpa/version 2003) | 12 |

CHAPITRE III

INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|---|----|
| Tableau III.1: Les raideurs équivalentes pour un milieu semi –infini | 31 |
| Tableau III.2: Les coefficients de raideur en fonction des coefficients de transmittance f | 32 |
| Tableau III.3: Rayons équivalents pour une fondation rectangulaire de dimensions a et b | 32 |
| Tableau III.4: Coefficients de transmittance verticale f_v du sol | 33 |
| Tableau III.5: Coefficients de transmittance horizontale f_h du sol | 33 |
| Tableau III.6: Coefficients de transmittance en rotation f_r du sol | 33 |

CHAPITRE IV

MODELISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|--|----|
| Tableau IV.1: Caractéristiques géométriques de structure | 36 |
| Tableau IV.2: Les périodes caractéristiques des sites. | 40 |
| Tableau IV.3: Rigidité de ressorts du sol. | 43 |
| Tableau IV.4: Les déplacements avec et sans ISS de poteau de rive pour les quatre sites | 44 |
| Tableau IV.5: Déplacement maximal avec et sans ISS | 47 |
| Tableau IV.6: Les efforts tranchants avec et sans ISS de poteau de rive | 48 |
| Tableau IV.7: Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS | 50 |
| Tableau IV.8: Les moments avec et sans ISS de poteau de rive | 51 |

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

NOTION DE BASE SUR LES SEISMES

| | |
|--|----|
| Figure 1-1: L'origine et la distribution des ondes sismiques | 3 |
| Figure 1-2: Mouvement et caractéristiques d'un séisme | 4 |
| Figure 1-3: Mouvement des particules au passage d'une onde p | 5 |
| Figure 1-4: Modélisation des ondes p | 5 |
| Figure 1-5: Mouvement des particules au passage d'une onde s | 6 |
| Figure 1-6: Modélisation des ondes S | 6 |
| Figure 1-7: Mouvement des particules au passage d'une onde love | 7 |
| Figure 1-8: Mouvement des particules au passage d'une onde Rayleigh | 7 |
| Figure 1-9: Fonctionnement d'un sismographe. | 8 |
| Figure 1-10 : Enregistrement sismographique | 9 |
| Figure 1-11 : Zone sismique du territoire national | 10 |

CHAPITRE II

EFFETS DU SEISME SUR LES BATIMENTS

| | |
|--|----|
| Figure II.1: Eclatement de zones critiques, extrémités des poteaux et poutres | 13 |
| Figure II.2: Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismiques | 14 |
| Figure II.3: Construction d'une maison en voile béton armé | 14 |
| Figure II.4: Oscillations des constructions par les vibrations du sol | 15 |
| Figure II.5: Différents types de déformation d'un bâtiment | 16 |
| Figure II.6: Effondrement d'un bâtiment sous forme d'une galette | 17 |
| Figure II.7: Fissures en croix | 18 |
| Figure II.8: Etage souple | 18 |
| Figure II.9: Dommages dus à l'effet de poteau court en vide sanitaire et dû à la présence d'allèges en maçonnerie dans la structure principale en portiques | 19 |
| Figure II.10: L'effet de poteau court dû à la présence d'un palier d'escalier et la solution | 19 |
| Figure II.11: Ancrage déficient de l'armature transversale et recouvrement dans les zones sensibles | 20 |

| | |
|---|----|
| Figure II.12: Flambage de l'armature longitudinale a la base de voile et dans les colonnes | 20 |
| Figure II.13: Martèlement et effondrement | 21 |
| Figure II.14: Liquéfaction des sols | 22 |
| Figure II.15: Glissement de terrain | 22 |

CHAPITRE III

INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|---|----|
| Figure III.1: Schématisation de l'interaction sol-structure | 23 |
| Figure III.2: Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS. | 25 |
| Figure III.3: Illustration de la méthode globale. | 27 |
| Figure III.4: schématisation de la méthode sous-structures | 29 |
| Figure III.5: Modèle tenant en compte d'ISS | 30 |
| Figure III.6: Abaques donnant les coefficients de Newmark $\beta_z, \beta_{x,y}$ et β_ϕ | 31 |
| Figure III.7: Modélisation par des éléments finis | 34 |

CHAPITRE IV

MODELISATION DE L'INTERACTION SOL STRUCTURE

| | |
|---|----|
| Figure IV.1 : Vue en plan | 37 |
| Figure IV.2 : Vue en élévation. | 37 |
| Figure IV.3 : Planchers en corps creux (16+ 4). | 39 |
| Figure IV.4: Dimension des sections de béton des poutres et des poteaux de structure | 39 |
| Figure IV.5: Spectre de réponse de calcul « structure auto stable » des quatre sites. | 41 |
| Figure IV.6: Vue en 3d de structure sans prise en compte de l'ISS | 42 |
| Figure IV.7: Modélisation de structure avec prise en compte de l'ISS | 43 |
| Figure IV.8: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 1 | 45 |
| Figure IV.9: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 2 | 45 |
| Figure IV.10: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site3 | 46 |
| Figure IV.11: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site4 | 46 |
| Figure IV.12: Variation du déplacement en fonction du site avec et sans ISS | 47 |
| Figure IV.13: Comparaison des résultats pour le déplacement entre les différents sites (Sans et avec ISS) | 48 |

| | |
|--|----|
| Figure IV.14: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 1 | 49 |
| Figure IV.15: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 2 | 49 |
| Figure IV.16: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 3 | 50 |
| Figure IV.17: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 4 | 50 |
| Figure IV.18: Comparaison des résultats pour les efforts tranchants à la base entre les différents sites (Sans et avec ISS) | 51 |
| Figure IV.19: Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 1 | 52 |
| Figure IV.20: Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 2 | 52 |
| Figure IV.21: Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 3 | 53 |
| Figure IV.22: Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 4 | 53 |

TABLE DES NOTATIONS

- A** : Aire de la fondation superficielle carrés, Coefficient d'accélération de zone
- a** : Dimension parallèle à la direction du séisme
- b** : Dimension perpendiculaire à la direction du séisme
- C**: Matrice amortisseur
- E** : Module de Young
- Ep**: Module pressiométrique.
- f** : Fréquence du mode de vibration fondamental
- G** : Module de cisaillement dynamique du sol.
- K**: Matrice de raideur du système ; représente la matrice d'impédance de la fondation rigide.
- K_h**: Raideur horizontal.
- K_v** : Raideur vertical.
- K_φ** : Raideur de basculement.
- K_θ**: Raideur de rotation
- M** : Matrices de masse
- K** : Rigidité
- (.)** : La dérivée par rapport au temps
- P** : Les ondes primaire.
- S** : Les ondes secondaire
- PL**: Pression limite pressiométrique.
- Q** : Facteur de qualité.
- qc**: Résistance de pointe pénitrométrique.
- qu**: Contrainte ultime.
- R**: Le coefficient de comportement. Rayon de la fondation circulaire
- R₀** : Rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire
- S** : Les ondes de cisaillements.
- S_a** : Accélération spectrale associée au mode de vibration de période **T** du bâtiment.
- T₁, T₂** : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.
- U** : Déplacement
- U̇** : Vitesse

\ddot{U} : Accélération

V_s : Vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

ζ : Pourcentage d'amortissement critique.

$\beta_z, \beta_{x,y}, \beta_\phi$:Donnés par des abaques

η : Correction d'amortissement.

ν : Coefficient de poisson

ρ : Masse volumique du sol.

a_0 : Paramètre sans dimensions dépend de la fréquence

I : Vecteur contenant d'unité pour les directions soumises à l'accélération α

ω : Pulsation

$[K]$: La matrice d'impédance

K_v : Translation vertical

K_h :Translation horizontal

K_θ :Rotation

H, h : Hauteur de la structure

f_v : Transmittance verticale

f_h : Transmittance horizontale

f_r : Transmittance en rotation

Abréviations

NEHRP: National Earthquake Hazards Reduction Program

RPA 99: Code parasismique algérien

ISS: Interaction-sol-structure

IC : Interaction cinématique

II : Interaction inertielle

SRX: Spectre de réponse selon x

SRY: Spectre de réponse selon y

الخلاصة

السلوك الزلزالي لهياكل المباني يعتمد على طبيعة حركة الارض ، الخواص الميكانيكية والفيزيائية للمنشأة وللترربة. بالتالي هناك تفاعل بين الهيكل والوسط الخارجي. الخطوات الاكثر جذرية للقضاء على مشكلة التفاعل بين التربة والبنية هي باعتبار الهيكل جزء لا يتجزأ تماما من الارض الواقع عليها . هذه الفرضية صالحة عندما تكون التربة و الأساس قليلة التشوه بالنسبة الى الهيكل ، على سبيل المثال في حالة وجود بناء جامد على ارض صخرية. في هذا العمل نبين انه يمكن أن ندرس التغيرات الطارئة على المنشأ وذلك بدراسة ترحح المبنى و العزم وقوى القص الناتجة بوجود التفاعل والذي نلجأ إلى تمثيله بمجموعة من النواض أو عدمه وذلك بتغيير نوعية التربة المحددة بأطيف الاستجابة المبينة في القواعد الجزائرية لمقاومة الزلازل طبعة 2003 على استجابة المبنى. المفاهيم الاساسية : التفاعل المتبادل بين التربة والمبنى, الزلازل, طيف الاستجابة

RESUME

La réponse sismique des structures des bâtiments dépend de la nature du mouvement du sol et des propriétés mécaniques et physiques de la structure et du sol. Il y a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol structure est de considérer la structure parfaitement encastree dans le sol ; cette hypothèse est valable quand le sol et la fondation sont peu déformables vis-à-vis de la structure, par exemple dans le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux.

L'influence de l'interaction sol structure sur les bâtiments en béton armé est étudiée. L'analyse de la réponse sismique des structures à savoir le déplacement et le moment et l'évolution de l'effort tranchant développé à la base des structures avec et sans interaction montre l'importance de la prise en compte de ce phénomène au stade de la conception du projet pour différents types de sol comme préconisé par la réglementation en vigueur.

Mots –clefs : Interaction sol structure, séisme, spectres de réponse

ABSTRACT

The seismic response of buildings structures depends on the nature of the soil motion and mechanical and physical properties of the structure and the soil around de foundation. Thus, there is interaction between structure and external medium. The most radical procedure to eliminate the problem of this soil-structure interaction is to consider the structure perfectly embedded in the ground; this assumption is valid when the foundation and the soil are non-deformable, for example in the case of a rigid building on rock base.

The influence of soil-structure interaction on the reinforced concrete buildings is investigated. Analysis of seismic response of structures, namely the movement and moments and evolution of shear developed at the base of the structures with and without interaction demonstrates the importance of taking into account this phenomenon in the design stage of project for different types of soil as recommended by the regulations.

Key words: soil-structure interaction, seismic, response spectrums.

INTRODUCTION GENERALE

L'interaction sol-structure est une discipline de la mécanique appliquée s'intéressant au développement et à l'investigation des méthodes théoriques et pratiques pour l'analyse des structures soumises à des charges dynamiques en tenant compte du comportement du sol de la fondation. Les effets de l'interaction sol-structure (ISS) sur la réponse sismique n'ont pas été sérieusement pris en considération que jusqu'au tremblement de terre de 1971 à San Fernando et au début de la construction nucléaire en Californie. Les conséquences catastrophiques de plusieurs récents tremblements de terre dans différentes régions du monde ont posé un problème sérieux aux ingénieurs de structures de génie civil des bureaux d'études. Ce problème s'est focalisé dans la façon de tenir compte de l'effet de l'interaction sol-structure (ISS) sur le comportement sismique final des structures lorsqu'un tremblement de terre survient.

D'après la géotechnique, l'interaction sol-structure (ISS) se produit quand l'onde sismique se propage à travers le système sol-structure. Ce phénomène comprend la dispersion des ondes incidentes par la fondation, transmission d'onde incidente à la structure, et la radiation de l'énergie structurale de vibration de nouveau au sol, ainsi que l'effet d'ISS modifie la réponse du système qui dépend de la plupart du temps de la rigidité du sol et de la structure.

Depuis le séisme d'El Asnam de 1980, de nombreux travaux de recherche ont été menés dans le but d'atténuer les effets des séismes sur les constructions. Selon les règles RPA99 les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés des sols qui les constituent. A chaque type de sol est associé un spectre de réponse élastique calculé en fonction des caractéristiques du site considéré et de celle de la structure étudiée.

Problématique et objectif

La réponse des structures dépend de la nature du mouvement du sol, des propriétés dynamiques de l'ouvrage et de celles du sol, Il y a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La procédure la plus radicale pour éliminer le problème de cette interaction sol-structure est de considérer la structure parfaitement encastree dans le sol, hypothèse d'autant plus valable que le sol de fondation est peu déformable vis-à-vis de la structure, par exemple le cas d'un bâtiment rigide sur un sol rocheux. En effet, les déformations du sol au droit du bâtiment sont négligeables devant les déformations dues à l'action sismique.

Le problème d'interaction se pose particulièrement dans le cas de bâtiments massifs sur des sols meubles, il y a une intervention non négligeable du sol et une modification de la réponse de la structure.

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer la réponse des structures contreventées par des portiques auto stables en tenant compte de l'interaction sol-structure. L'analyse de la réponse sismique des structures à savoir le déplacement et le moment et l'évolution de l'effort tranchant développé à la base des structures avec et sans interaction montre l'importance de la prise en compte de ce phénomène au stade de la conception du projet pour différents types de sol. Le sol est modélisé par des ressorts discrets, moyennant le logiciel de calcul SAP2000. Où plusieurs catégories de site proposées par le code algérien (RPA99) sont prises en compte.

Méthodologie

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres, une introduction générale et des conclusions et recommandations futures.

- ✚ Le premier chapitre de cette étude est un rappel des phénomènes sismiques, il comprend quelques généralités sur les séismes, zonage du risque sismique (aléas sismiques) et la classification des catégories de sites adaptée par les règlements parasismique algériennes RPA2003.
- ✚ Le deuxième Chapitre présente l'effet du séisme sur les bâtiments. Différents type de structures en béton armé. Comportement dynamique des ouvrages. Types de deformation. effet des séismes sur les bâtiments.
- ✚ L'interaction sol-structure fait l'objet du troisième chapitre ; dans ce chapitre on montre l'importance de l'interaction sol-structure, Composantes de l'interaction. Formulation d'un problème d'interaction. la modélisation d'un problème d'interaction et les méthodes de prise en compte de ce phénomène.
- ✚ Le quatrième Chapitre est consacré à l'étude de l'influence de l'interaction sol structure en considérant deux hypothèses. La première concerne l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base de la structure sans ISS, la deuxième prend en compte l'effet de l'interaction sol-structure où le sol est modélisé par des ressorts discrets, moyennant le logiciel de calcul SAP2000. qui nous permet de déterminer l'effort tranchant le déplacement et le moment.
- ✚ Enfin le travail se termine par une conclusion générale résumant tous les résultats obtenus.

I.1.Introduction

Les tremblements de terre sont à ce jour la catastrophe naturelle la plus meurtrière. Cette catastrophe résulte d'une rupture brutale des roches provoquant de nombreuses secousses. Ce phénomène entraîne des conséquences inimaginables d'un point de vue humain, économique et environnemental. Aujourd'hui, l'homme doit apprendre à vivre avec un séisme, Pour cela, il doit connaître sa nature, son environnement et les moyens mis en œuvre pour atténuer toutes ces conséquences.

I.2. Définition

Un tremblement de terre est un ensemble de secousses et de déformations brusques de l'écorce terrestre qui découle de la libération brusque d'énergie accumulée par les déplacements des plaques tectoniques de la terre.

Les séismes ne sont pas la plupart du temps ressentis par les humains parce qu'ils sont trop faibles mais parfois, ils peuvent être dévastateurs.

I.3. Origine et actions des séismes

Un séisme est une libération brutale de l'énergie potentielle accumulée dans les roches par le jeu des mouvements relatifs des différentes parties de l'écorce terrestre. Lorsque les contraintes dépassent un certain seuil, une rupture d'équilibre se produit et donne naissance aux ondes sismiques qui se propagent dans toutes les directions et atteignent la surface du sol. Ce mouvement du sol excite les ouvrages par déplacement de leurs appuis sont plus ou moins amplifiés dans la structure. Le niveau d'amplification dépend essentiellement de la période de la structure et de la nature du sol [1].

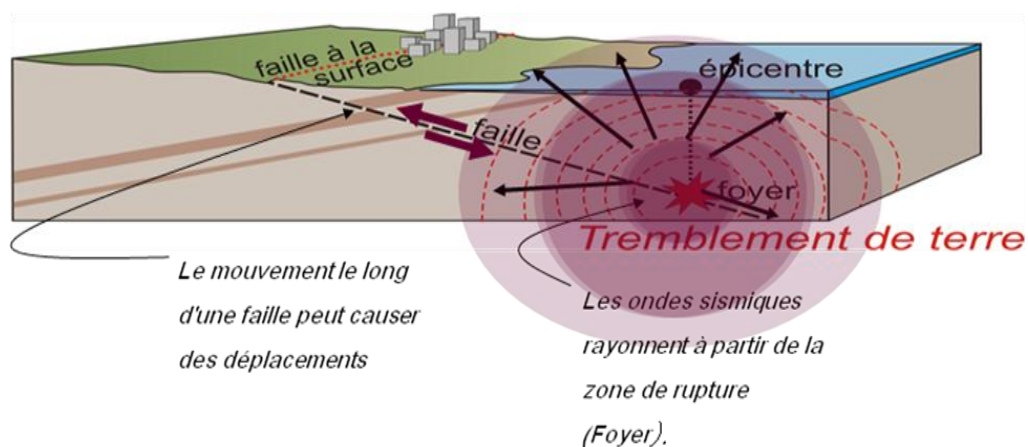


Figure 1-1 : L'origine et la distribution des ondes sismiques

I.4. Caractéristiques d'un séisme

- **Un foyer** : Point d'amorce de rupture en profondeur au niveau d'une faille.
- **Des ondes** :
 - Les ondes de fond
 - Les ondes de surface
- **Un épicentre** : Lieu d'intensité maximale à la verticale du foyer.
- **Une magnitude** : Quantification de l'énergie libérée au foyer.
- **Une intensité** : Importance des dégâts en surface [2].

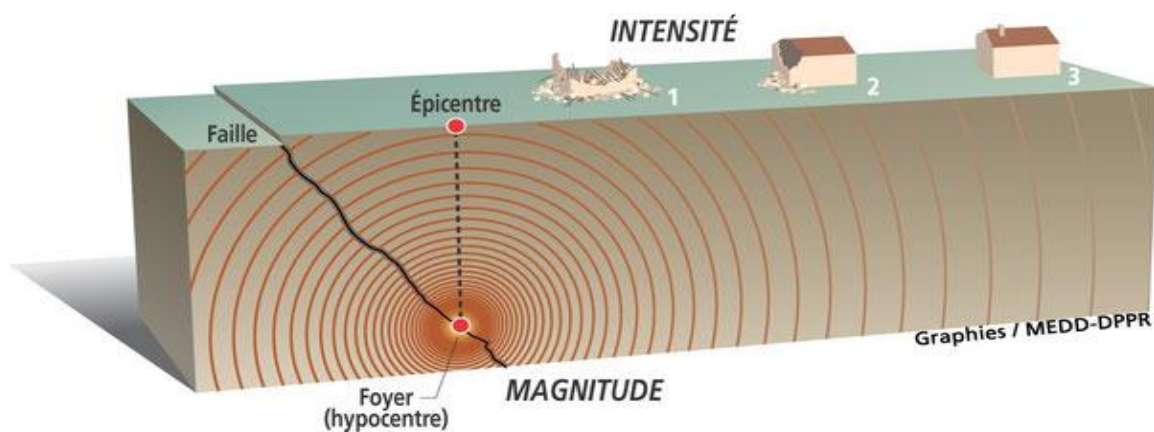


Figure 1-2 : Mouvement et caractéristiques d'un séisme

I.5. Nature et mode de propagation des ondes sismiques

Les propriétés élastiques des roches et des sols permettent à l'énergie libérée par la rupture des roches déformées de se propager à partir du foyer dans toutes les directions sous forme d'ondes. Dont le front forme idéalement une surface sphérique. Et qui traversent le globe de part en part. Il s'agit d'ondes de volume.

Comme lors de toute impulsion dans un milieu infini deux trains d'ondes se propageant à des vitesses différentes sont formés : Ondes de compression et ondes de distorsion. Les premières appelées ondes longitudinales compriment et dilatent successivement le milieu parcouru. Les secondes ondes transversales, font osciller les particules du sol perpendiculairement à la direction de la propagation. En un point, celle-ci est normale au front d'ondes ; on l'appelle rai sismique. On peut distinguer deux principaux types d'ondes sismiques [3] :

I.5.1. Ondes de volume

Celles qui se propagent à l'intérieur de la terre et qui comprennent les ondes s et les ondes p

- **Ondes primaires ou ondes longitudinales (P)**

Les ondes P (primaires) qui progressent en animant les sols traversés en compression / dilatation comme les spires d'un ressort. Les ondes P sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui se propagent dans tous les états de la matière (gazeux, liquide et solide). Les ondes P se déplacent en créant successivement des zones de compression et des zones de dilatation. Les particules se déplacent localement selon un mouvement " avant-arrière " dans la direction de la propagation de l'onde (figure 1-3).

- Vitesse : de l'ordre de 4 à 6 km/s Plus rapides que l'onde S , ce sont les premières enregistrées par les appareils, d'où leur dénomination.
- Périodes : de l'ordre de la seconde (de la fraction de seconde à quelques secondes)
- Longueur d'onde : de l'ordre de 4 à 6 km.

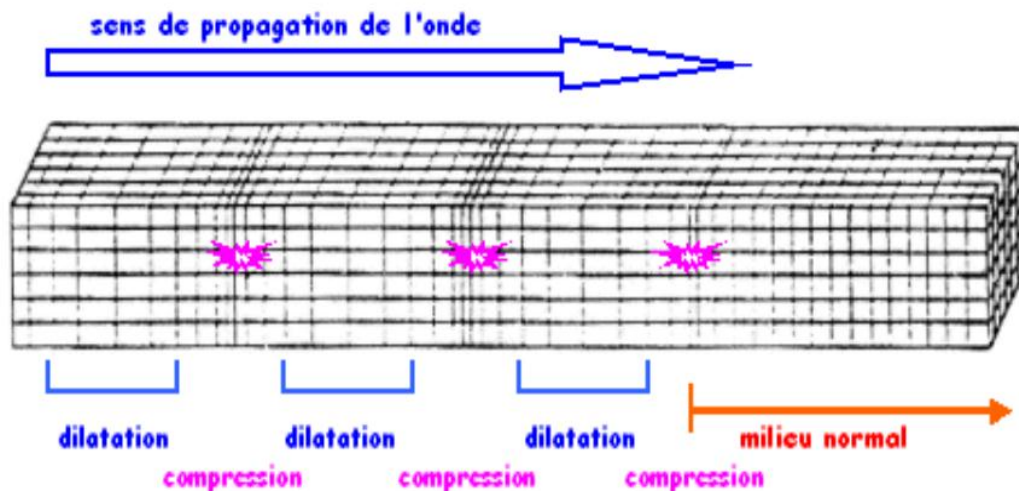


Figure 1-3 : Mouvement des particules au passage d'une onde P

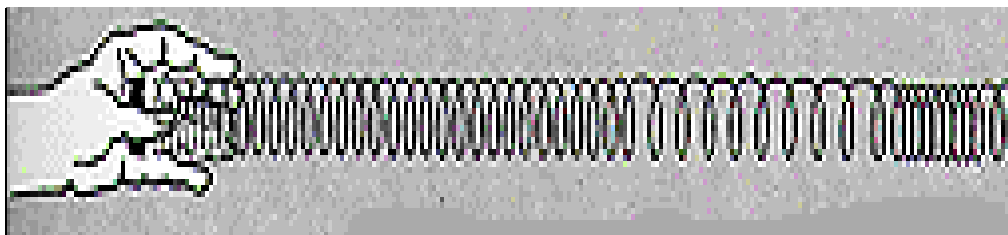


Figure 1-4 : Modélisation des ondes P

- **Onde secondaire ou ondes de cisaillements (S)**

Les ondes S sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides. Les particules oscillent localement dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (figure 1-5).

- Vitesse : 60% de celle des ondes P
- Périodes : de l'ordre de la seconde (de la fraction de seconde à quelques secondes)
- Longueur d'onde : de l'ordre de 4 à 6 km

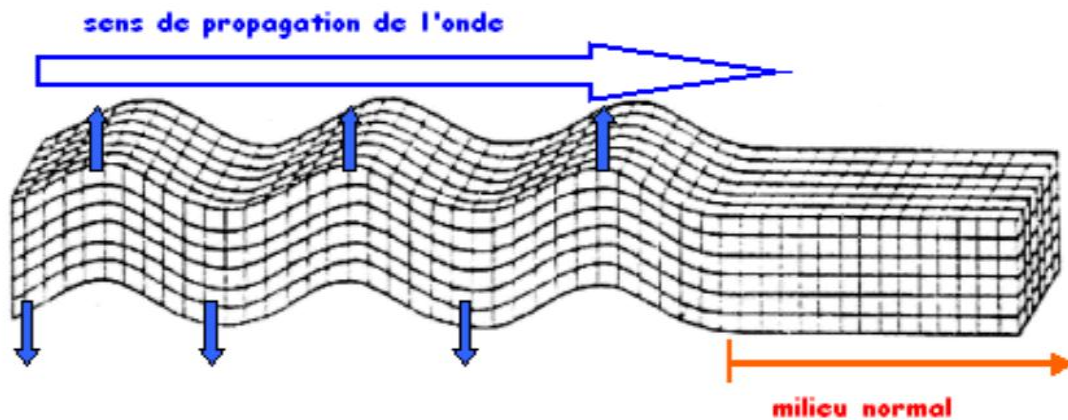


Figure 1-5 : Mouvement des particules au passage d'une onde S

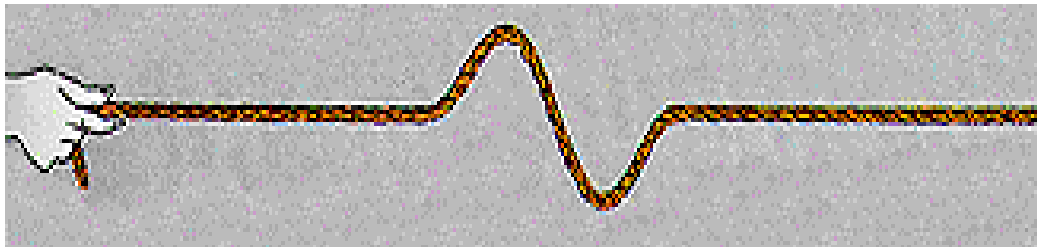


Figure 1-6 : Modélisation de l'onde S

I.5.2. Ondes de surface

Elles sont générées par l'arrivée des ondes de volume à la surface du globe. Plus le séisme est profond, moins elles sont puissantes. Elles concernent les couches superficielles des sols. Les ondes de love et de rayleigh ont un contenu fréquentiel qui concerne certaines structures, mais leur influence sur les constructions courantes est négligeable :

- Vitesse : de l'ordre de 1 à 2 km/s
- Périodes : de l'ordre de 20 s
- Longueur d'onde : de l'ordre de 20 à 40 km

- **Ondes sismiques de love**

Les ondes de love ou ondes L sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral (figure 1.7).

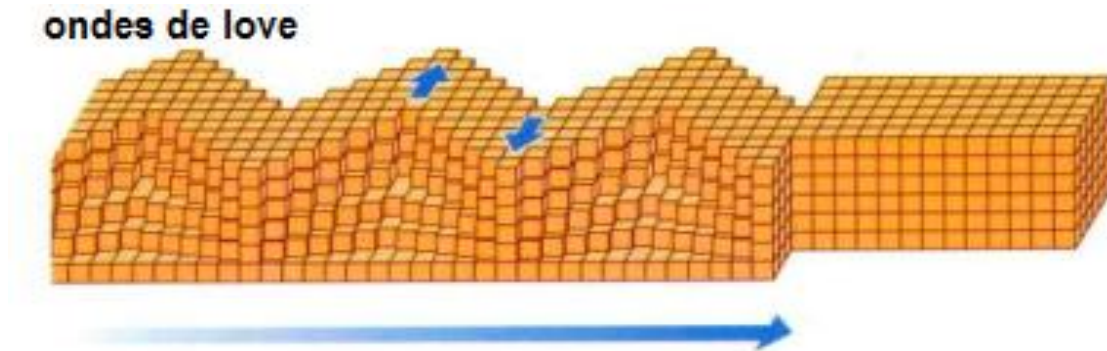


Figure 1-7 : Mouvement des particules au passage d'une onde love

- **Ondes sismiques rayleigh**

Les ondes de Rayleigh sont assimilables à une vague ; les particules du sol se déplacent selon une ellipse dans le plan vertical, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre (figure 1.8) [3].

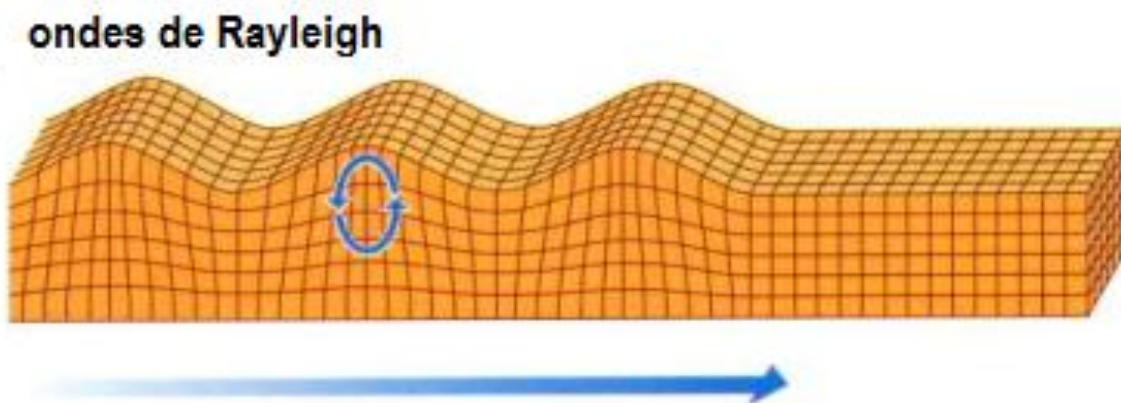


Figure 1-8 : Mouvement des particules au passage d'une onde rayleigh

I.6. Mesure des ondes sismiques

I.6.1. Sismographes

Le sismographe est un appareil très sensible. Lors d'un séisme, le mouvement enregistré est très simplifié par rapport au mouvement réel du sol. Pour connaître le mouvement sismique il faut enregistrer ses deux composantes horizontales et sa composante verticale.

Pour cela on utilise des sismographes à inertie dits « horizontaux » et des sismographes à inertie dits « verticaux » (figure 1.9) :

- Le sismographe horizontal est construit de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement du sol que dans une seule direction horizontale.
- Le sismographe vertical est conçu de telle sorte qu'il ne peut enregistrer le mouvement que dans la direction vertical.

Dans des stations d'observation sismographiques ,il faut au minimum, trois sismographes : 2 horizontaux et 1 vertical.

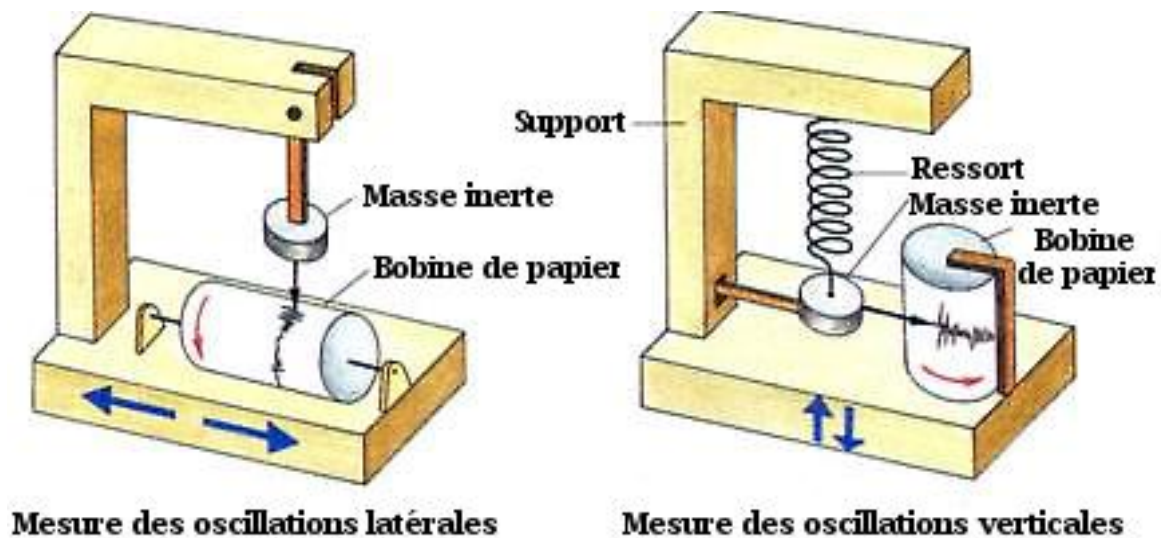


Figure 1-9 : Fonctionnement d'un sismographe.

I.6.2. Sismogramme

Un sismogramme est l'enregistrement obtenu à partir des sismographes. C'est une courbe qui varie en fonction de l'énergie libérée au foyer sous la forme d'ondes sismiques, de la distance foyer station sismographique, de la nature et la structure du milieu traversé par les ondes et enfin, du type de sismographe utilisé. Le fait que les ondes sismiques arrivent aux stations d'enregistrement comprend non seulement les ondes qui ont suivi le chemin le plus direct entre le foyer et la station mais aussi des ondes qui n'y sont parvenues qu'après une série [4].

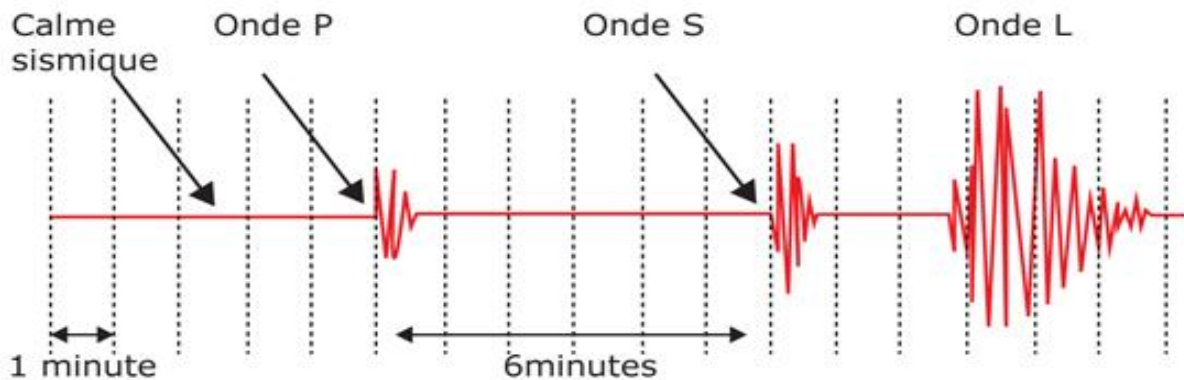


Figure 1-10 : Enregistrement sismographique

I.7. Echelles d'évaluation d'un séisme

Nous disposons de deux échelles pour évaluer les tremblements de terre :

I.7.1. Echelle de mercalli

A été développée en 1902 et modifiée en 1931. Elle indique l'intensité d'un séisme sur une échelle de I à XII. Cette intensité est déterminée par deux choses : l'ampleur des dégâts causés par un séisme et la perception qu'a eue la population du séisme. Il s'agit d'une évaluation qui fait appel à une bonne dose de subjectivité. De plus, la perception de la population et l'ampleur des dégâts vont varier en fonction de la distance à l'épicentre. On a donc avec cette échelle, une échelle variable géographiquement.

I.7.2. Echelle De Richter

A été instaurée en 1935. Elle nous fournit ce qu'on appelle la magnitude d'un séisme sur une échelle de 1 à 9 plus, calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée au foyer. Elle se mesure sur une échelle logarithmique ouverte ; à ce jour, le plus fort séisme a atteint 9,5 sur l'échelle de richter (survenu le 22 mai 1960 au chili) [4].

I.8.Zonage du risque sismique (aléas sismiques)

Le zonage du risque sismique. C'est-à-dire la division du territoire en «zones de sismicité» à l'intérieur desquelles l'aléa sismique peut être considéré comme uniforme. Constitue une base essentielle pour la définition de règles régissant les constructions résistantes aux séismes ; l'aléa sismique étant défini en site donné par la probabilité qu'au cours d'une période de référence (par exemple : probabilité annuelle), une secousse sismique atteigne une certaine intensité.

Les critères de classifications selon le « RPA 99, version 2003 » sont : les zones sismiques, l'importance des ouvrages, les sites, les systèmes de contreventement et la régularité des ouvrages. Le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante et dont la figure ci dessous représente la carte des zones sismiques de l'Algérie et le zonage global des différentes wilayas. L'annexe I du « RPA 99, version 2003 » donne la classification sismique par wilaya et par commune lorsque la wilaya est partagée entre deux zones sismiques différentes ou plus.

Zone0 : Sismicité négligeable.

Zone1 : Sismicité faible.

Zone2 : «a» et «b» : Sismicité moyenne.

Zone3 : Sismicité élevée.

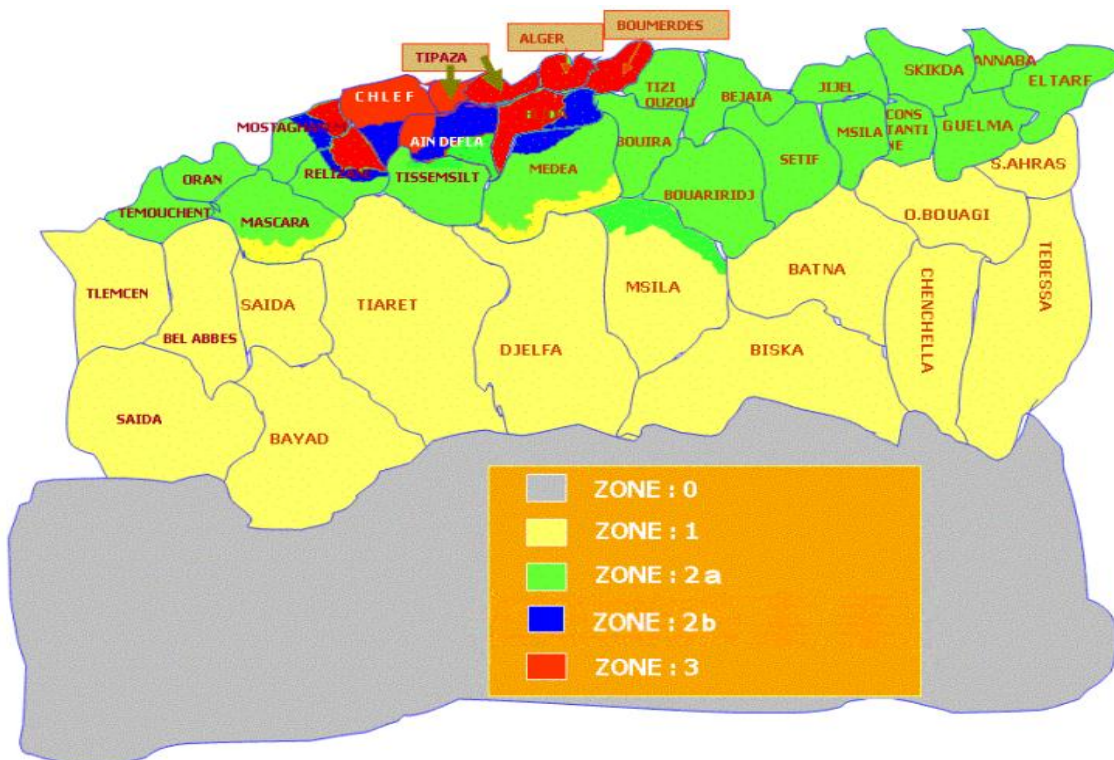


Figure 1-11 : Zone sismique du territoire national

Tableau 1-1 : Coefficient d'accélération de zone sismique (RPA-version 2003)

| Groupe | Les zones | | | | Classification des ouvrages selon leur importance |
|-----------|-----------|----------|----------|----------|---|
| | Zone I | Zone IIa | Zone IIb | Zone III | |
| 1A | 0.15 | 0.25 | 0.3 | 0.4 | Ouvrages d'importance vitale : sécurité - hôpitaux |
| 1B | 0.12 | 0.2 | 0.25 | 0.3 | Ouvrages de grande importance : scolaire et culte |
| 2 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25 | Ouvrages courants : habitations- bureaux |
| 3 | 0.07 | 0.1 | 0.14 | 0.18 | Ouvrages de faible importance : hangars |

- **Classification des ouvrages selon leur importance**

Le niveau minimal de protection sismique accordé à un ouvrage dépend de sa destination et de son importance vis à vis des objectifs de protection fixés par la collectivité, le « RPA 99 version 2003 » préconise 4 groupes :

Groupe 1A : Ouvrages d'importance vitale : sécurité-hôpitaux.

Groupe 1B : Ouvrages de grande importance : scolaire et culte.

Groupe 2 : Ouvrages courants : habitation-bureaux.

Groupe 3 : Ouvrages de faible importance : hangars.

- **Classification des sites**

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent.

Catégorie S1 (site rocheux) : Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement (v_s) à 800m/s.

Catégorie S2 (site ferme) : Dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile sur consolidée sur 10 m à 20 m d'épaisseur avec v_s 400 m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S3 (site meuble) : Dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide avec $v_s > 200$ m/s à partir de 10 m de profondeur.

Catégorie S4 (site très meuble) : Dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couches d'argile molle avec $v_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres.

Dépôts d'argile molle à moyennement raide avec $v_s < 200$ m/s dans les 20 premiers mètres [5].

Tableau 1-2 : Classification des sites (RPA/version 2003).

| Site | Type de sol | q_c (mpa) | P_L (Mpa) | E_p (Mpa) | q_u (Mpa) |
|------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| S1 | Rocheux(a) | - | >5 | >100 | >10 |
| S2 | Ferme | >15 | >2 | >20 | >0.4 |
| S3 | Meuble | 1.5-15 | 01-02 | 05-20 | 01 - 0.4 |
| S4 | Très Meuble | <1.5 | <1 | <5 | <0.1 |

q_c : résistance de pointe pénitrométrique.

P_L : pression limite pressiométrique.

E_p : module pressiométrique.

q_u : contrainte ultime.

V_s : vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

I.9. Conclusion

Ce chapitre a pour but de mettre en évidence le phénomène sismique et l'importance des zones sujettes à des séismes d'importance moyenne à grande est également mise en avant afin de parvenir à une démarche cohérente pour la conception d'un ouvrage stable.

II.1.Introduction

Un séisme est un événement violent et imprévisible qui sollicite les structures d'une manière très différente de celle des actions usuelles. Si les structures n'ont pas été conçues pour cette éventualité et construites correctement, des sollicitations sismiques importantes peuvent les endommager fortement jusqu'à entraîner leur ruine. Les conséquences sont souvent catastrophiques. L'effondrement des bâtiments par exemple entraîne des pertes humaines et économiques les dégâts infligés au bâti se répercutent lourdement au niveau socioéconomique de toute la région concernée. Dans ce contexte l'ingénieur en structures joue un rôle central pour réduire les conséquences d'un événement sismique. On dit couramment que ce ne sont pas le séisme mais les bâtiments qui tuent avant de penser à éviter ou à limiter les dégâts. Il faut commencer par comprendre comment les structures se comportent durant un séisme.

II.2.Différents type de structures en béton armé

II.2.1.Structure en portique (poteau-poutre)

Les structures en portique sont des structures pour les quelles charges dynamiques horizontales passent par les mêmes éléments de la structure que les charges statiques verticales.

L'ossature en portique en béton armé (contreventement par portique) conçue et réalisée de manière habituelle et très vulnérable aux séismes, en cas de séisme fort le béton qui se trouve dans les zones les plus sollicitées de la structure (nœuds) éclate [7].



Figure II.1 : Eclatement de zones critiques (extrémités des poteaux et poutres)

II.2.2. Structure mixte (portique + voile)

La meilleure façon de rendre les bâtiments en poteaux-poutres parasismiques est de les contreventer par des voiles en béton armé. Les voiles deviennent ainsi la structure principale, dont le rôle est de résister aux forces horizontales [8].

La (figure II.2) présente deux immeubles voisins, à l'origine semblables mais inégaux face aux secousses sismiques. Le premier montre un comportement excellent et le second est complètement en ruine.



Figure II.2 : Comportement de deux immeubles voisins face aux secousses sismiques

II.2.3. Voiles en béton armé

Les voiles sont couramment utilisés dans les édifices élancés en béton armé compte tenu de leur comportement, considéré satisfaisant vis-à-vis des forces latérales (le séisme). Leur grande résistance et leur rigidité contribuent à contrôler les déplacements globaux et à minimiser les déplacements inter-étages excessifs. Reprenant la plus grande partie des efforts latéraux, ils améliorent le comportement des structures et jouent un rôle primordial pour la sécurité. [9]



Figure II.3 : Construction d'une maison en voile béton armé

II.3. Comportement dynamique des ouvrages

Lors des tremblements de terre, les constructions subissent des oscillations horizontales, verticales et de torsion provoquées par des mouvements du sol d'assise qui génèrent des efforts en flexion et en cisaillement dans leurs éléments constructifs (figure II.4).

Il n'existe pas de "charges sismiques" à proprement parler bien que pour les besoins du calcul des forces d'inertie soient associées aux déformations imposées à l'ouvrage [10].

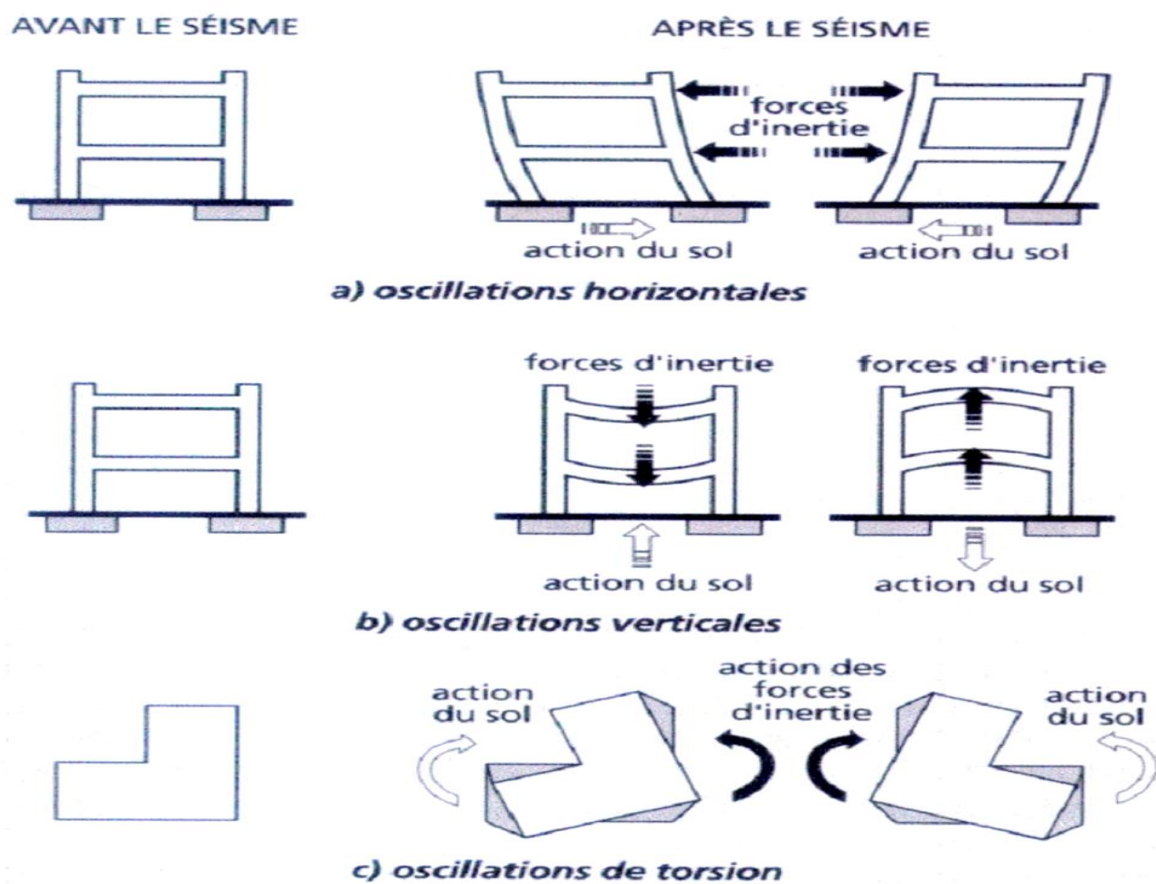


Figure II.4 : Oscillations des constructions par les vibrations du sol

II.4. Types de déformation

Un solide n'est jamais parfaitement rigide. Les bâtiments sous l'action d'un séisme subissent donc des déformations. Certaines sont élastiques, c'est-à-dire qu'elles sont proportionnelles aux forces qui les provoquent et disparaissent une fois que les secousses se sont arrêtées. Il s'agit de déformations réversibles. D'autres, au contraire sont plastiques ou

post-élastiques. Il existe en effet une limite au-delà de laquelle les déformations cessent d'être élastiques et deviennent permanentes. On parle de limite d'élasticité.

On distingue plusieurs types de déformations selon les contraintes exercées

- **Traction** : les matériaux sont soumis à deux forces opposées et s'étirent
- **Flexion** : les matériaux sont soumis à deux forces opposées ; un côté s'allonge sous l'effet d'une traction et l'autre côté se raccourcit sous l'effet d'une compression
- **Cisaillement** : les matériaux sont soumis à deux forces opposées ; une diagonale s'allonge sous l'effet d'une traction et l'autre se raccourcit sous l'effet d'une compression [11].

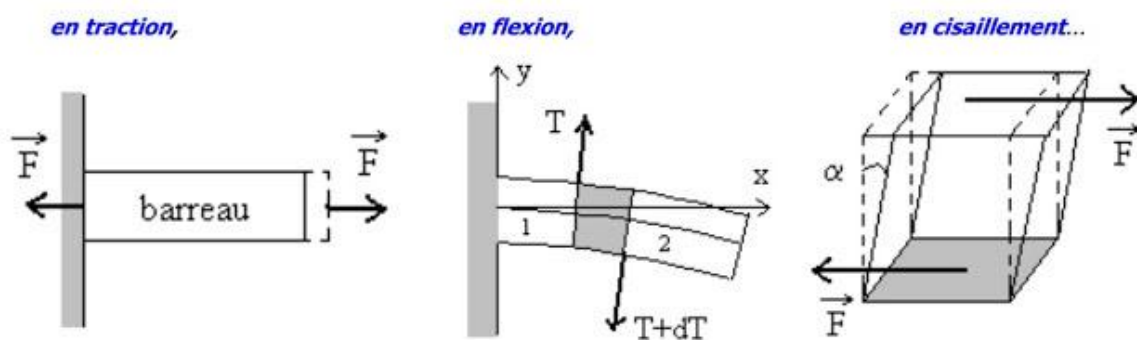


Figure II.5 : Différents types de déformation d'un bâtiment

II.5. Effet des séismes sur les bâtiments

Il existe une grande variété de modes de ruine pour un même type apparent de construction. Le fait qu'une construction soit détruite d'une façon ou d'une autre ou ne soit pas détruite n'est pas l'effet du hasard, si nous analysons comment la construction a été conçue, nous pouvons expliquer les phénomènes en cause :

II.5.1. Effets directs

Les mouvements verticaux, horizontaux ou les mouvements de cisaillement provoqués par un séisme ont une conséquence directe sur les bâtiments. Ceux-ci, s'ils ne parviennent pas à absorber l'énergie mécanique qui leur est transmise et finissent par se déformer, se fissurer, voire s'effondrer.

Toute fois, toutes les constructions ne réagissent pas de la même manière sous l'action d'une force identique. Les déformations dépendent des éléments composant la construction, des matériaux utilisés, de la nature des liaisons entre ces éléments, ainsi que de leur masse

(dont dépendent les forces d'inertie), il est donc important d'étudier ces dégâts afin de construire des bâtiments qui peuvent résister aux séismes.

Ainsi on peut classer les dégâts typiques des tremblements de terre dans les catégories suivantes :

II.5.1.1. Effondrement en galette

Pour résister aux sollicitations sismiques, la stabilisation latérale de la structure est primordiale elle requiert des éléments verticaux présentant une certaine rigidité et une résistance suffisante. Ces éléments peuvent être des cadres (portiques), des refends (voiles) ou des contreventements. Cependant même dans des régions une forte sismicité, un grand nombre de bâtiments est doté d'une stabilisation latérale nettement insuffisante. Voire inexistante la sanction de cette lacune est implacable et se traduit souvent par un effondrement général de la structure (figure II.6).



Figure II.6 : Effondrement d'un bâtiment sous forme d'une galette

II.5.1.2. Fissures en croix

Elles montrent le caractère cyclique (mouvement de va-et-vient) et la direction principalement horizontale des sollicitations sismiques. Les mouvements horizontaux entraînent une rupture oblique (45°) dans les murs verticaux fragiles. On parle de traction diagonale perpendiculaire à la compression principale issue du cisaillement. La forme en croix provient du fait que l'action sismique ne s'exerce pas uniquement dans une seule direction, mais qu'elle s'inverse plusieurs fois. Ces fissures apparaissent principalement dans

les murs en briques, qui présentent une faible résistance à la traction. Cela peut conduire éventuellement à l'effondrement total du bâtiment.

Les fissures en croix dans les éléments en maçonnerie sont caractéristiques d'action sismique. Les fissures naissent des tractions diagonales perpendiculaires à la compression principale (figure II.7) [12].



Figure II.7 : Fissures en croix

II.5.1.3. Etage souple

C'est le dégât sismique le plus répandu, seulement un étage est concerné par l'effondrement contrairement à l'effondrement en galette qui concerne plusieurs étages, ceci se produit lorsque les éléments de stabilisation sont interrompus à un étage très souvent. Le rez-de-chaussée des bâtiments est réservé à des commerces et doit donc offrir un espace maximal pour cette raison. L'architecte renonce aux murs porteurs et les remplace par de simples colonnes. L'étage devient alors trop flexible. Les déformations locales se concentrent aux extrémités de l'étage, entraînant souvent l'effondrement de la structure. [13]



Figure II.8 : Etage souple

II.5.1.4. Poteau courte

Dans un bâtiment dont les planchers sont en béton armé; les efforts horizontaux dus aux séismes se distribuent sur les éléments de structure verticaux en de leur rigidité latérale. Si, dans une structure en portiques, certains poteaux sont plus courts (comme ceux du vide sanitaire) ou si leur capacité de déformation est limitée par la présence d'allèges en maçonnerie, de paliers d'escalier intermédiaires, de mezzanines, de rampes ou d'autres éléments, ils sont beaucoup plus rigides que les autres poteaux. Ils sont donc nettement plus sollicités et peuvent être détruits par cisaillement. On parle de l'effet de « poteau court » (figure II.9 à II.10). L'effet de poteau court dû à la présence d'un palier d'escalier. la Solutions ajouter voiles en fond de la cage d'escalier ou voiles latéraux (meilleure solution) (figure II.10) [14].



Figure II.9 : Dommages dus à l'effet de poteau court en vide sanitaire et dû à la présence d'allèges en maçonnerie dans la structure principale en portiques

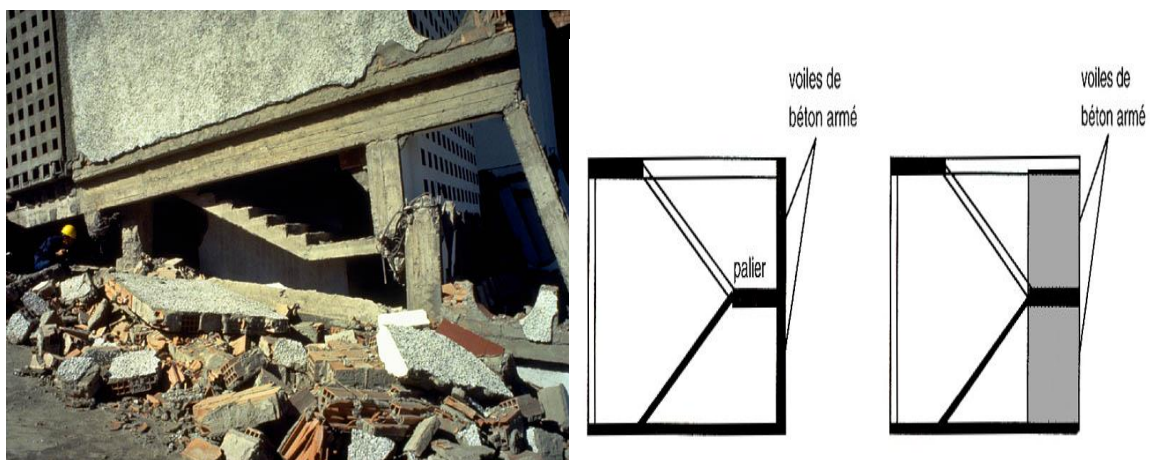


Figure II.10 : L'effet de poteau court dû à la présence d'un palier d'escalier et la solution

II.5.1.5. Dommages dus aux détails d'armature

Pour les éléments en béton armé. Quelques lacunes récurrentes dans la conception ou la réalisation des détails d'armature provoquent des dégâts sismiques typiques. Ces erreurs classiques sont les suivantes :

- ✚ Ancrage déficient de l'armature transversale
- ✚ Espacement excessif de l'armature de stabilisation
- ✚ recouvrement dans les zones sensibles de fortes déformations plastiques

Dans les éléments en béton armé, détails constructifs sont souvent déficients. Les crochets d'angle des étriers à 90° ne sont pas suffisamment ancrés lorsque le béton de couverture a éclaté, les recouvrements fragilisent les zones sensibles où de fortes déformations plastiques vont se concentrer (figure II.11), les étriers trop espacés n'empêchent pas le flambage de l'armature longitudinale à la base de voile et on dans les colonnes (figure II.12). [13]



Figure II.11 : Ancrage déficient de l'armature transversale et recouvrement dans les zones sensibles



Figure II.12 : Flambage de l'armature longitudinale à la base de voile et dans les colonnes

II.5.1.6. Martèlement

Étant donné que les bâtiments sont sujets à des déformations horizontales importantes durant un séisme, deux bâtiments voisins peuvent entrer en collision si l'espace qui les sépare est insuffisant. Le martèlement (entrechoquement) des bâtiments constitue un dégât sismique typique en zone urbaine, le danger est particulièrement important si les bâtiments sont de hauteurs différentes car ils n'oscillent pas de concert, en raison de leur caractéristiques dynamiques différentes (fréquences fondamentales), augmentant les possibilités de collision. Les dégâts engendrés par la collision entraînent souvent dans ce cas l'effondrement des bâtiments. [12]



Figure II.13 : Martèlement et effondrement

II.5.2. Effets indirects

II.5.2.1 Liquéfaction

Le phénomène de liquéfaction intervient dans le cas des sols chargés en eau. Les ondes sismiques vont avoir pour conséquence de faire augmenter la pression de l'eau dans le sol jusqu'à lui faire perdre sa cohésion. Le sol va ainsi se comporter comme un liquide qui ne pourra plus supporter les charges auxquels il est soumis. Lors des séismes, on observe ainsi souvent des « volcans » de sable de tailles variables. Dans des cas extrêmes, les constructions peuvent être déstabilisées et parfois littéralement s'enfoncer dans le sol [3]



Figure II.14 : Liquéfaction des sols

II.5.2.2. Mouvements gravitaires (glissements)

Ces mouvements peuvent prendre différentes formes : glissements de terrains, chutes de blocs, coulées de boues, le passage de l'onde sismique fragilise le milieu qui peut être déstabilisé aussitôt. Cette déstabilisation peut également survenir après la secousse (quelques heures à quelques années) lorsque celle-ci n'aura fait qu'endommager le milieu. [15]



Figure II.15 : Glissement de terrain

II.6. Conclusion

Tous les problèmes de comportement dynamique inhérents aux choix architecturaux doivent être pris en charge, soit par modification de l'architecture ou soit en découplant les parties d'ouvrage et soit en trouvant des solutions au niveau de la structure.

III.1. Introduction

Dans le calcul sismique des structures, l'excitation est définie par un ou plusieurs enregistrements d'accélération souvent mesurées à la surface du sol en l'absence de toute construction. Ces enregistrements donnent les accélérogrammes en champs libre. En présence d'un bâtiment ou d'une quelconque autre construction, les mouvements au voisinage des fondations peuvent différer de ceux existant en champ libre. En effet, les forces au contact entre la structure et sa fondation perturbent le mouvement du sol, et le moment d'encastrement à la base provoque la rotation de celle-ci. Ce phénomène est désigné par "Interaction Sol - Structure" ou "ISS".

L'interaction entre le sol et la structure peut être mise en évidence à l'aide d'un modèle simple dans lequel la structure est représentée par une poutre console de raideur correspondant aux voiles ou poteaux sollicités en cisaillement contenant des masses correspondant principalement à celle des planchers. Ce système a donc plusieurs degrés de liberté. L'interaction avec le sol peut être représentée par des ressorts agissant à la translation ou à la rotation reliés à une base mobile se déplaçant suivant le mouvement sismique imposé.

Le mouvement d'un point O de la base mobile est celui qui est défini en champ libre par un accélérogramme, tandis que le mouvement de la fondation du bâtiment, calculé au point P, dépend de la masse de la structure et de la raideur des ressorts qui représentent le sol. Ces deux mouvements diffèrent donc, leur écart étant d'autant plus accentué que le sol est plus déformable (figure III.1) [16].

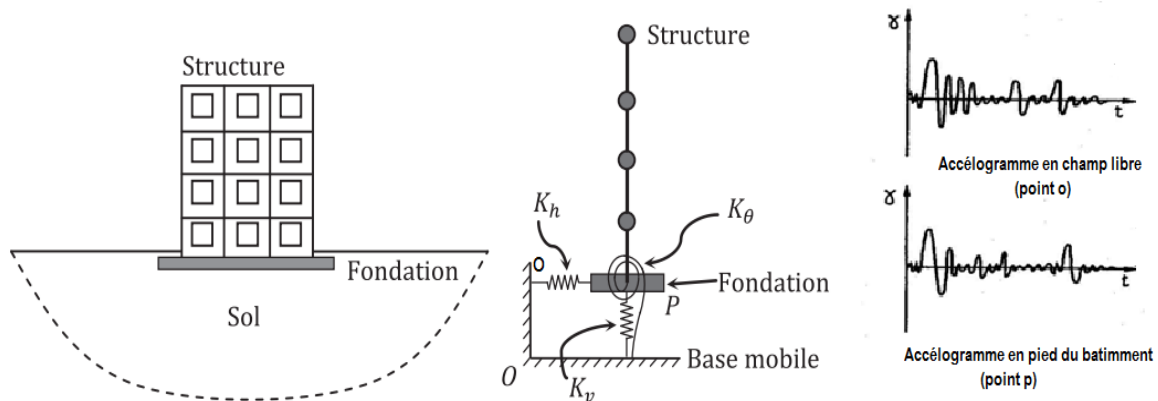


Figure III.1: Schématisation de l'interaction sol-structure

III.2. Composantes de l'interaction

Il existe deux types d'interaction dont on doit tenir compte dans le dimensionnement des structures et fondations, dénommés interaction inertielle et interaction cinématique.

III .2.1. Interaction inertielle

L'inertie développée dans une structure vibrante donne lieu à des forces de cisaillement et des moments à la base. Ces forces génèrent des déplacements et des rotations à l'interface sol-fondation. Ces déplacements et rotations naissent à cause de la flexibilité dans le système sol-fondation, ce qui contribue de manière significative à la flexibilité de la structure globale et l'augmentation de la période de la structure.






De plus, ces déplacements engendrent une dissipation d'énergie sous forme d'amortissement radiatif ou hystérétique du sol, qui peut affecter d'une manière significative l'amortissement du système global. Comme ces effets sont liés à l'inertie de la structure, ils sont appelés Effets de l'interaction inertielle.

III.2.2. Interaction cinématique

Le mouvement de la fondation et le mouvement du sol en champ libre diffèrent entre eux à cause de l'Interaction Cinématique. Dans cette interaction, une fondation rigide posée au-dessus ou au-dessous de la surface du sol provoque des mouvements de la fondation différents du mouvement en champ libre à cause de la différence de rigidité. [17]

II .3. Formulation d'un problème d'interaction

L'analyse complète d'un problème d'interaction doit prendre en compte:

-  La variation des caractéristiques du sol avec la profondeur.
-  Le comportement non linéaire du sol.
-  Le caractère tridimensionnel du problème.
-  Le schéma complexe de propagation des ondes qui engendrent le mouvement.
-  L'interaction avec les structures avoisinantes.

Pour les études de l'interaction sol – structure, le modèle d'ondes sismiques généralement considéré est celui d'onde de volume se propagent verticalement à partir d'un bed –rock horizontal supposé rigide [18].

III .4. Mouvement du sol en champ libre

Le mouvement sismique est défini par un accélérogramme ou par un spectre de réponse. Ce mouvement est très influencé par les conditions géotechniques locales. L'étude d'un site doit suivre les principes suivants: [19]

- ✚ Définition du mouvement à la surface du sol.
- ✚ Niveau d'accélération réaliste pouvant être transmis par le sol.
- ✚ Caractéristique fréquentielle du mouvement compatible avec les caractéristiques physiques du site.
- ✚ Variation de l'accélération avec la profondeur dans des limites raisonnables.

La figure III.2 montre les spectres de réponses calculés à partir des enregistrements en champ libre et dans la structure à un même endroit. L'interaction sol structure est marquée par une atténuation des accélérations spectrales pour les fréquences supérieures.

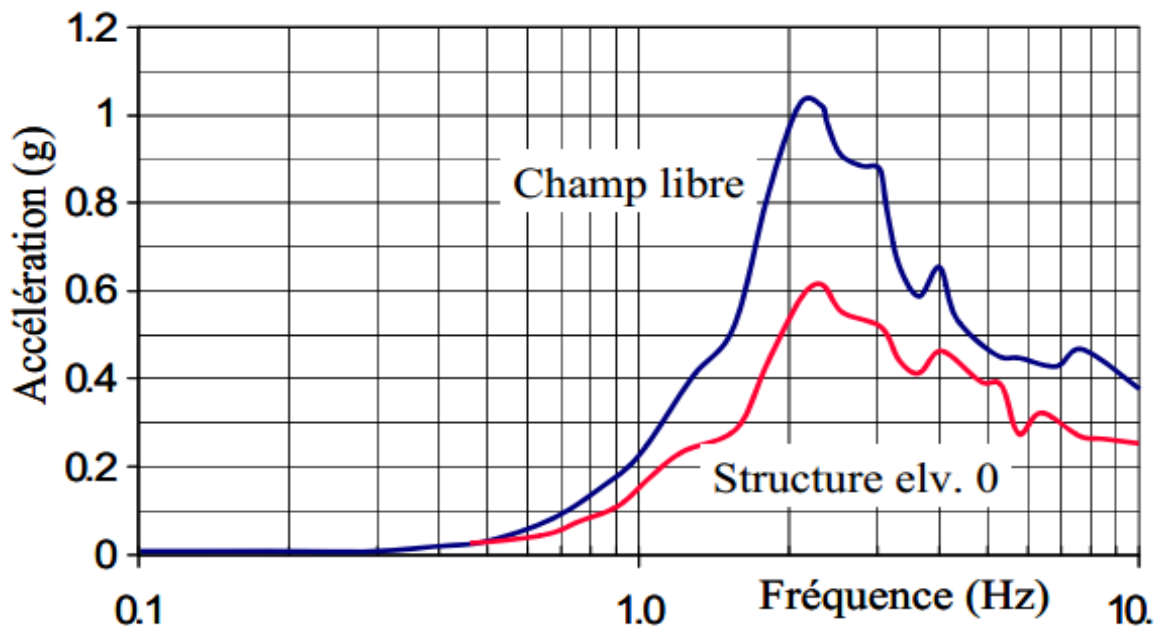


Figure III.2: Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS

On constate bien, qu'il y'a une différence entre le mouvement en champ libre et le mouvement imposé à la fondation. Cette différence est due à la présence de la fondation et plus précisément à la différence de rigidité entre la fondation et le sol. Cette différence est d'autant plus faible que si le sol est rocheux [20].

III.5.Méthodes de prise en compte de l'interaction sol structure

Il existe trois grandes méthodes classiques pour tenir compte de l'interaction sol-structure dans une analyse dynamique :

- a) Méthodes globales.
- b) Méthodes de sous-structure.
- c) Méthodes hybrides.

III.5.1.Méthode globale

La méthode globale est une méthode efficace mais complexe en particulier à cause de son temps de calcul. Elle consiste à résoudre directement l'équation de l'équilibre dynamique régissant le comportement du système sol – fondation - structure:

$$\underline{M}\ddot{U} + \underline{C}\dot{U} + \underline{K}U = \underline{-M}Ia \quad [3.1]$$

Où U, \dot{U}, \ddot{U} représentent les vecteurs de déplacement, vitesse et accélération, successivement, du système dans un repère Galiléen (fixe par rapport à la terre). I est un vecteur contenant d'unité pour les directions soumises à l'accélération a . $M, C,$ et K sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité du système, respectivement. Le symbole(.) représente la dérivée par rapport au temps.

La résolution directe de ce système d'équations utilise les algorithmes classiques de la méthode des éléments finis.

La figure III.3 schématise la méthode globale. Le sol est souvent représenté comme un milieu continu modélisable par éléments finis. Aux limites entre la fondation et la structure et aux bords du maillage on place des frontières de transmission [20].

Cependant, plusieurs difficultés se posent quant à l'utilisation de ces méthodes :

- 1) La première difficulté est que cette résolution requiert une bonne connaissance des lois de comportements des matériaux et des frontières entre les différentes parties du système, un système est géométriquement complexe ou contient la non-linéarité dans le sol ou dans les matériaux et rend la résolution difficile par cette méthode globale.
- 2) La deuxième difficulté est la différence de dimension qui existe entre la structure et le massif de sol supportant la fondation.

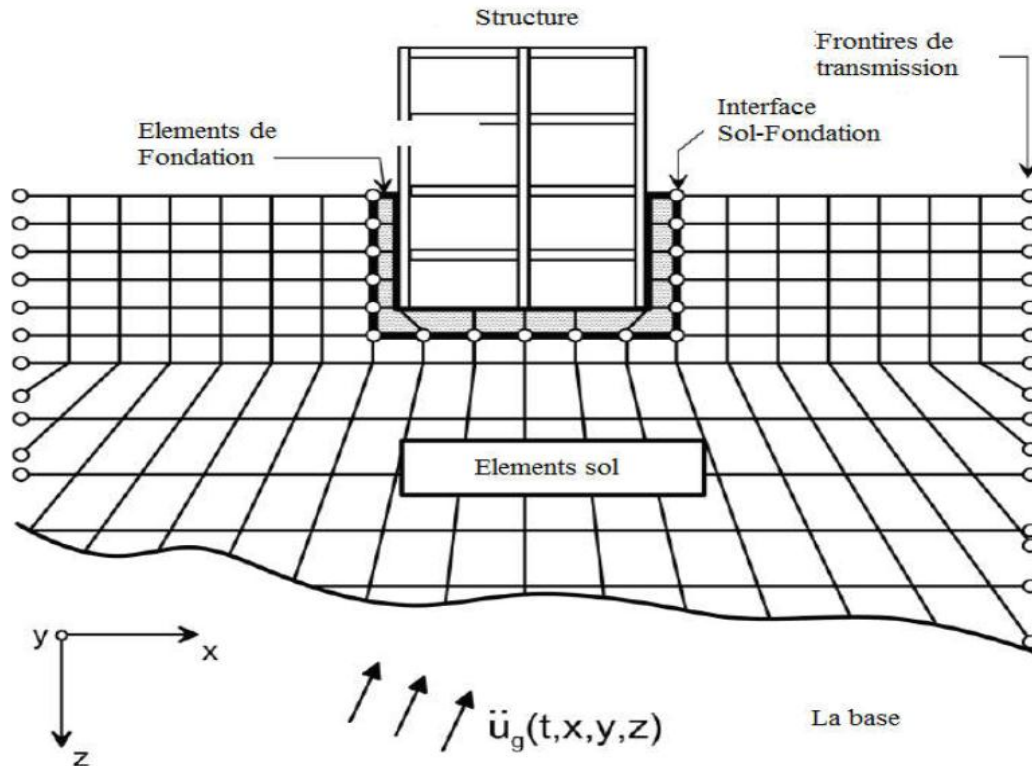


Figure III.3 : Illustration de la méthode globale

Avec cette méthode, la prise en compte de l'ISS nécessite un très grand nombre d'éléments ce qui implique un coût du point de vue temps. Il est d'ailleurs assez difficile de définir de manière précise la frontière de ce massif de sol. En effet, une onde frappant cette frontière peut numériquement se réfléchir et venir solliciter une nouvelle fois la structure, alors qu'en réalité, on suppose que cette onde se propage à l'infini et emmène avec elle une partie de l'énergie loin de la structure et du sol (amortissement radiatif). Des frontières absorbantes devront donc être ajoutées aux bords du massif de sol pour tenir compte de cet amortissement; ce qui rend cette méthode rarement utilisée[21].

III.5.2. Méthode des sous-structures

La méthode des sous-structures est fondée sur le principe de la décomposition du problème en étapes successives dont le traitement est plus simple et ensuite sur la superposition des solutions. Les étapes successives, schématisées sur la (figure III.4) sont les suivantes :

1) Initialement, on considère la sous-structure comportant le profil géotechnique et la fondation sans masse. On suppose que l'interface sol-fondation est infiniment rigide. On applique un mouvement à la base du profil géotechnique afin de calculer la réponse \ddot{u} du

système au niveau de l'interface rigide sol fondation. La présence de la fondation rigide modifie le mouvement que l'on obtiendrait en champ libre. Cette modification est connue sous le nom d'interaction cinématique (IC). L'effet de l'interaction cinématique est important surtout dans le cas des fondations profondes massives, comme les caissons. [Beltrami et al. 2006]. Dans la plupart des cas, l'interaction cinématique conduit à une réponse \ddot{u} qui est plus petite que la réponse en champ libre mais qui contient une composante de rotation [Mylonakis et al, 2006].

2) Dans la seconde étape, on calcule la réponse du système global (sol + fondation + structure) lorsqu'il est soumis à l'action du champ \ddot{u} calculé à l'étape précédente. La différence entre le champ obtenu, réponse du système global et le champ \ddot{u} représente l'interaction inertielle qui provient de l'action des forces d'inertie. Pour les fondations superficielles (avec ou sans encastrement), l'évaluation de l'interaction inertielle s'effectue en deux étapes supplémentaires qui sont présentées sur la figure III.4. Tout d'abord, on évalue les impédances dynamiques de la fondation, assemblées dans la matrice d'impédance [K]. Cette matrice représente la réponse dynamique (en termes de forces) de la fondation sans masse, posée sur le massif de sol pesant et soumise à une sollicitation de type harmonique d'amplitude unitaire, caractérisée par sa pulsation ω . Ensuite, on évalue la réponse de la structure soumise au champ \ddot{u} déterminé dans l'étape de l'IC, en considérant qu'elle est reliée à des ressorts correspondants aux impédances dynamiques de la fondation.

Les impédances dynamiques de la fondation sont calculées pour chaque degré de liberté de la fondation (trois translations et trois rotations). Mylonakis et al. (2006) présentent une compilation révisée d'expressions et de méthodes pour l'évaluation des impédances dynamiques de plusieurs configurations de fondations. L'article de Gazetas (1991) et l'ouvrage de Sieffert et Cerveart (1992) constituent les travaux de référence pour la détermination des impédances dynamiques des fondations.

Cette figure III.4 représente la schématisation de la méthode sous-structures, (a) est le problème de l'interaction Sol -Structure et (b), la décomposition du problème de l'ISS en interaction cinématique (IC) et interaction inertielle (II), (c) la décomposition en deux étapes : détermination des impédances dynamique de la fondation et calcul de la structure reliée aux ressorts qui correspondent aux impédances déterminée [22].

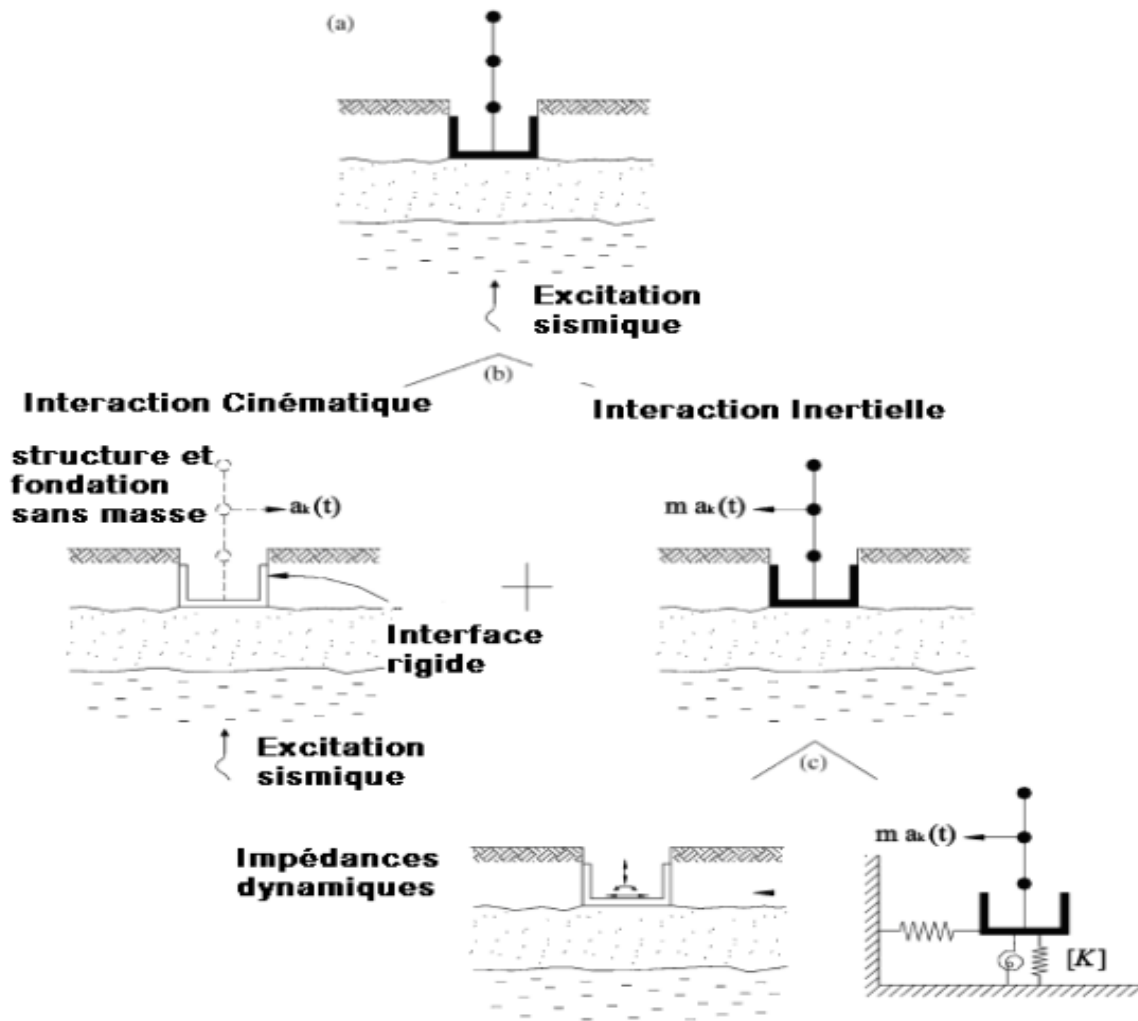


Figure III.4: schématisation de la méthode sous-structures

III.5.3. Méthodes hybrides

Les méthodes hybrides constituent une troisième famille de méthodes qui réunissent les avantages des méthodes directes et des méthodes de sous-structures. Elles ont pour objectif de diviser le système en deux sous-domaines : un champ lointain et un champ proche.

- Le champ lointain reste suffisamment éloigné de la fondation pour qu'il ne soit pas influencé par l'interaction sol-structure, et donc qu'il puisse être considéré comme élastique. Il peut être modélisé par des méthodes adaptées aux problèmes linéaires, par exemple, les impédances dynamiques.
- Le champ proche, à proximité de la fondation, inclut toutes les hétérogénéités et non linéarités du système. Il s'intègre dans le modèle de la superstructure et peut être traité par une méthode directe, par exemple la méthode des éléments finis [23].

III.6. Modélisation de l'interaction sol-structure

III.6.1. Modélisation du sol par éléments ressorts

Le comportement du sol a été tout d'abord modélisé par des ressorts de sol définissant les réactions élastiques de ce dernier à l'égard des composantes de déplacement statique de la fondation. Les ressorts de sol ont été déterminés pour la fondation circulaire selon la méthode de (Deleuze,1967) et (Newmark-Resenblueth,1971), et la méthode simplifiée de (V.Davidovici,1999), Pour les autres types de fondations superficielles, on peut déterminer les rigidités d'après la méthode de (Cevaer-Sieffert,1967).

Comme il été indiqué précédemment le sol est représenté par des ressorts reliant un ou plusieurs nœuds à une base rigide, voir figure III.5.

Notre étude se fait sur un type de fondation qui est une semelle rectangulaire, donc le sol sera modélisé par des ressorts horizontaux, des ressorts verticaux et de rotations. La raideur de ces ressorts est calculée par les formules de (Newmark-Resenblueth,1971)

La méthode des ressorts de sol est basée sur une réaction élastique on ne tient pas compte de la masse de sol participant au mouvement [24].

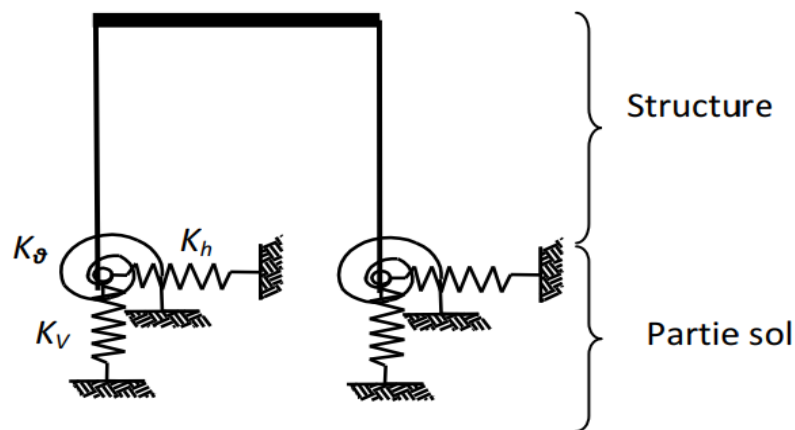


Figure III.5 : Modèle tenant en compte de l'ISS

III.6.1.1. Méthode de Newmark-Rosenblueth

Cette méthode est indépendante de la fréquence, donc avec des coefficients constants. Elle permet d'estimer et de contrôler les valeurs des raideurs, des amortissements du sol et des fréquences propres de la structure, Pour obtenir meilleur ajustement dans la bande des basses et moyennes fréquences, qui sont celles présentant le plus intérêt dans le cas des séismes, le tableau III.1 ci-dessous présente les trois raideurs de sol. Les valeurs des coefficients sans

dimension, β_z , $\beta_{x,y}$ et β_ϕ pour une fondation rectangulaire, dépendant de la proportion des géométries de la fondation (a/b) et sont données par l'abaque (figure III.6) [25].

Tableau III.1 : Les raideurs équivalentes pour un milieu semi –infini

| Mouvement | Semelle rigide rectangulaire |
|-------------|---|
| Vertical | $K_v = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta_z \sqrt{A}$ |
| Horizontal | $K_h = 2(1 + \nu) \cdot G \cdot \beta_{x,y} \sqrt{A}$ |
| Balancement | $K_\phi = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta_\phi \cdot a^2 b$ |

A : Aire de la fondation. ($A=a \times b$), a et b longueurs et largeurs de la fondation.

G : Module de cisaillement dynamique du sol [N/m^2]

ν : Coefficient de poisson

$\beta_z, \beta_{x,y}$ et β_ϕ sont donnés par des abaques suivants

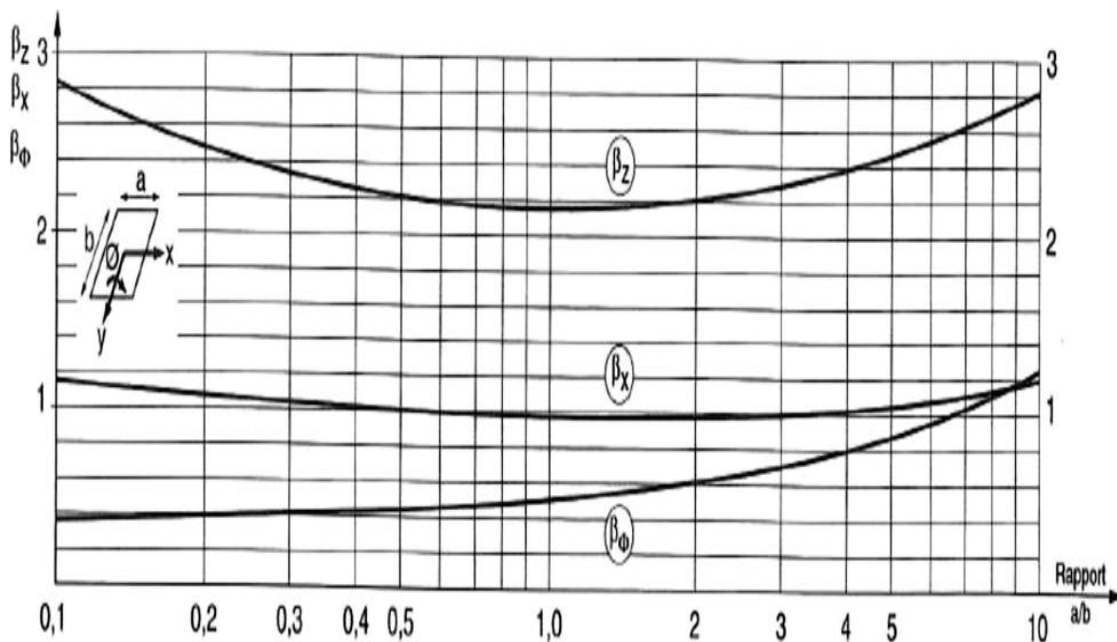


Figure III.6 : Abaques donnant les coefficients de Newmark $\beta_z, \beta_{x,y}$ et β_ϕ

III.6.1.2. Méthode de Deleuze

Cette méthode peut être appliquée dans le cas où les fondations, circulaires ou assimilées, peuvent être considérées comme superficielles et suffisamment rigides. Le sol est représenté par un système de ressorts qui relie le ou les nœuds représentatifs de la fondation de l'ouvrage au repère de sol en champ libre. La modélisation de l'ISS par ressorts concentrés est plus simple pour l'analyse dynamique d'ensemble (hypothèse du radier rigide) mais nécessite par la suite une modélisation spécifique du radier.

La modélisation de l'ISS par ressorts répartis est plus complexe mais les efforts obtenus sont directement exploitables pour le dimensionnement du radier. Les coefficients de raideur sont calculés pour chaque direction sismique en fonction des coefficients de transmittance f (tableau II.5, II.6, II.7) par les expressions suivantes [26] :

Tableau III.2 : Les coefficients de raideur en fonction des coefficients de transmittance f

| Translation vertical | Translation horizontal | Rotation |
|---|---|--|
| $K_V = GR_0 \frac{f_{V1}}{f_{V1}^2 + f_{V2}^2}$ | $K_h = GR_0 \frac{f_{h1}}{f_{h1}^2 + f_{h2}^2}$ | $K_\theta = GR_0 \frac{f_{r1}}{f_{r1}^2 + f_{r2}^2}$ |

Pour les fondations rectangulaires ayant les dimensions a et b , les rayons équivalents sont indiqués dans le tableau III.3 suivant

Tableau III.3 : Rayons équivalents pour une fondation rectangulaire de dimensions a et b

| Vertical | Horizontal | Rotation | Torsion |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|--|
| $R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$ | $R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$ | $R = \sqrt[4]{\frac{a^3b}{3\pi}}$ | $R = \sqrt[4]{\frac{ab(a^2 + b^2)}{6\pi}}$ |

Les coefficients de transmittance f_v , f_h , f_r ont été établis par Deleuze avec les hypothèses suivantes :

- Le sol est un solide semi-infini, élastique et homogène, isotrope et limité par un plan
- La réaction de sol sous la fondation est linéaire. La surface d'appui n'est donc pas plane, elle est donnée par la résolution du second problème de Boussinesq. Les déplacements du nœud de la fondation sont assimilés à ceux du centre d'inertie de la fondation, la rotation de la fondation est celle du plan moyen de la surface d'appui ;
- L'amortissement géométrique correspond au rayonnement des ondes dans le sol.

Tableau III.4: Coefficients de transmittance verticale f_v du sol

| a_0 | $v=0.01$ | | $v=0.25$ | | $v=0.5$ | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | f_{v1} | f_{v2} | f_{v1} | f_{v2} | f_{v1} | f_{v2} |
| 0.00 | 0.2675 | 0.0000 | 0.2026 | 0.0000 | 0.1351 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.2533 | -0.0518 | 0.1928 | -0.0365 | 0.1285 | -0.0258 |
| 0.50 | 0.2356 | -0.0985 | 0.1818 | -0.0698 | 0.1211 | -0.0495 |
| 0.75 | 0.2032 | -0.1355 | 0.1604 | -0.0971 | 0.1066 | -0.0695 |
| 1.00 | 0.1629 | -0.0160 | 0.1332 | -0.1165 | 0.0878 | -0.0888 |
| 1.50 | 0.1202 | -0.1709 | 0.1034 | -0.1270 | 0.0669 | -0.0935 |
| 1.25 | 0.0799 | -0.1691 | 0.0743 | -0.1290 | 0.0457 | -0.0969 |
| 1.75 | 0.0459 | -0.1570 | 0.0484 | -0.1236 | 0.0259 | -0.0949 |
| 2.00 | 0.0206 | -0.1381 | 0.0274 | -0.1128 | 0.0090 | -0.0887 |

Tableau III.5 : Coefficients de transmittance horizontale f_h du sol

| a_0 | $v=0.01$ | | $v=0.25$ | | $v=0.5$ | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | f_{h1} | f_{h2} | f_{h1} | f_{h2} | f_{h1} | f_{h2} |
| 0.00 | 0.2688 | 0.0000 | 0.2364 | 0.0000 | 0.2026 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.2636 | -0.0404 | 0.2324 | -0.0323 | 0.1995 | -0.0259 |
| 0.50 | 0.2491 | -0.0779 | 0.2215 | -0.0625 | 0.1910 | -0.0502 |
| 0.75 | 0.2267 | -0.1099 | 0.2045 | -0.0890 | 0.1778 | -0.0718 |
| 1.00 | 0.1988 | -0.1346 | 0.1833 | -0.1103 | 0.1610 | -0.0894 |
| 1.25 | 0.1684 | -0.1520 | 0.1597 | -0.1257 | 0.1424 | -0.1025 |
| 1.50 | 0.1377 | -0.1590 | 0.1354 | -0.1349 | 0.1231 | -0.1108 |
| 1.75 | 0.1087 | -0.1596 | 0.1118 | -0.1384 | 0.1043 | -0.1146 |
| 2.00 | 0.0829 | -0.1542 | 0.0899 | -0.1369 | 0.0866 | -0.1144 |

Tableau III.6 : Coefficients de transmittance en rotation f_r du sol

| a_0 | $v=0.01$ | | $v=0.25$ | | $v=0.5$ | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | f_{r1} | f_{r2} | f_{r1} | f_{r2} | f_{r1} | f_{r2} |
| 0.00 | 0.4280 | 0.0000 | 0.3242 | 0.0000 | 0.2161 | 0.0000 |
| 0.25 | 0.4361 | -0.0018 | 0.3295 | -0.0001 | 0.2197 | -0.0007 |
| 0.50 | 0.4587 | -0.0137 | 0.3445 | -0.0085 | 0.2299 | -0.0053 |
| 0.75 | 0.4874 | -0.0435 | 0.3642 | -0.0270 | 0.2437 | -0.0170 |
| 1.00 | 0.5128 | -0.0941 | 0.3831 | -0.0590 | 0.2577 | -0.0376 |
| 1.25 | 0.5252 | -0.1632 | 0.3952 | -0.1039 | 0.2683 | -0.0670 |
| 1.50 | 0.5160 | -0.2434 | 0.3949 | -0.1578 | 0.2719 | 0.1033 |
| 1.75 | 0.4801 | -0.3240 | 0.3782 | -0.2147 | 0.2655 | -0.1434 |
| 2.00 | 0.4177 | -0.3931 | 0.3439 | -0.2674 | 0.2477 | 0.1829 |

Avec :

a : dimension parallèle à la direction du séisme.

b : dimension perpendiculaire à la direction du séisme.

R₀ : rayon du cercle équivalent d'une fondation circulaire (voir tableau III.3).

ρ : masse volumique du sol.

G : module de cisaillement dynamique du sol.

f : fréquence du mode de vibration fondamental dans la direction de séisme considéré, défini à l'aide d'un calcul modal préliminaire avec les coefficients et masses de sol de Roseblueth;

$$a_0 = 2\pi R_0 \sqrt{\frac{\rho}{G}} \text{ paramètre des tableaux III.4, III.5, III.6}$$

III.6.2. Modélisation par des éléments finis

Pour mieux prendre en compte les propriétés dynamiques du sol, on peut remplacer par des éléments finis les ressorts du modèle. Le sol est alors représenté par des couches successives d'éléments empilés sur une base qui représente le soubassement rocheux (figure III.7). Chaque couche est caractérisée par un module d'élasticité, un coefficient de Poisson, une masse volumique et un coefficient d'amortissement. Les programmes de calcul actuellement disponibles utilisent des modèles plans et comportent des éléments spéciaux de bordure qui permettent de se dispenser de modéliser une grande largeur de terrain [27].

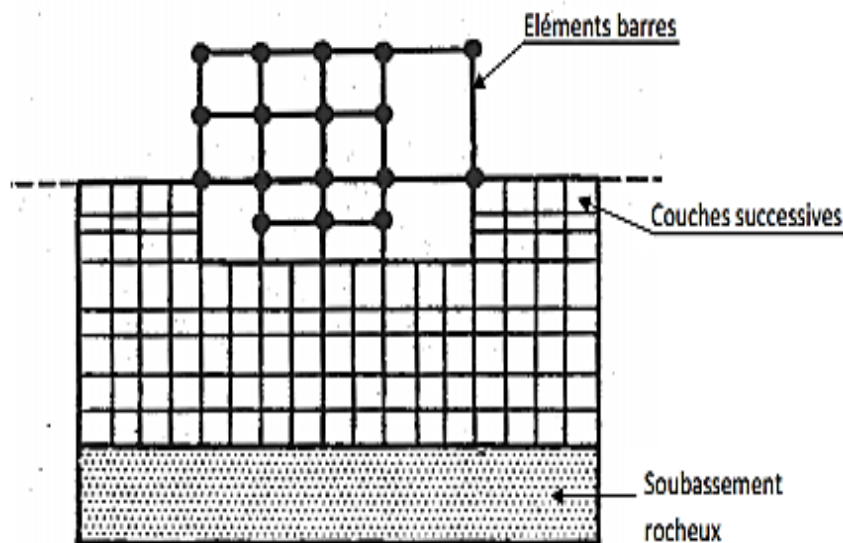


Figure III.7: Modélisation par des éléments finis

III.7. Conclusion

On a tenté dans ce chapitre de mettre au clair le phénomène de l'interaction sol structure. Composantes et formulation d'un problème d'interaction .on a exposé quelques méthodes de prise en compte de l'ISS et modélisation de l'interaction sol-structure.

IV.1 Introduction

Ce travail consiste à calculer la réponse de la structure (sans et avec ISS) pour différents types de sites (rocheux; ferme; meuble; très meuble), en considérant deux hypothèses relatives à la nature des appuis à la base de la structure. Les réponses sismique avec et sans interaction sol-structure seront étudiées et comparées les efforts tranchant et les moments fléchissent et les déplacements de structure dans le deux cas (sans et avec ISS) dans un premier cas en considérant l'hypothèse de l'encastrement ou nous traiterons la modélisation d'un bâtiment étagé (quatre niveau) sans tenir compte de l'effet d'interaction sol-structure dans les différents sites par l'utilisation de spectre de réponse de chaque site, en deuxième cas la même structure sera modélisée en tenant compte de l'effet d'interaction sol-structure où le sol est modélisé par des ressorts, respectivement pour les quatre sites.

IV.2.Présentation et caractéristiques des structures

IV.2.1.Présentation des structures

Les structures considérées pour l'étude sont des structures en (R+3), régulières en plan et en élévation à usage d'habitation, dans la région de Oulad addi Igbala dans la wilaya de m'sila est classée dans le groupe d'usage 2 et supposée être implantée en zone de moyenne sismicité (zone IIa).La structure repose sur des semelles superficielles en béton armé de section carrée ($a \times b = 1.4 \times 1.4$) m^2 .Le sol est supposé homogène avec un comportement élastique linéaire.

IV.2.2.Caractéristiques géométriques

La structure étudiée représente vue en plan. Cette vue comporte 04 travées dans le sens x-x et trois travées dans le sens y-y, elle est illustrée dans la (figure IV.1) et vue en élévation (figure IV.2), les caractéristiques géométriques de l'ouvrage sont récapitulées dans le tableau IV.1 suivant :

Tableau IV.1 : caractéristiques géométriques de structure.

| Les caractéristiques géométriques | Valeur (m) |
|-----------------------------------|------------|
| Longueur totale | 18 |
| Largeur totale | 10 |
| Hauteur totale | 12 |
| Hauteur d'étage | 3,00 |

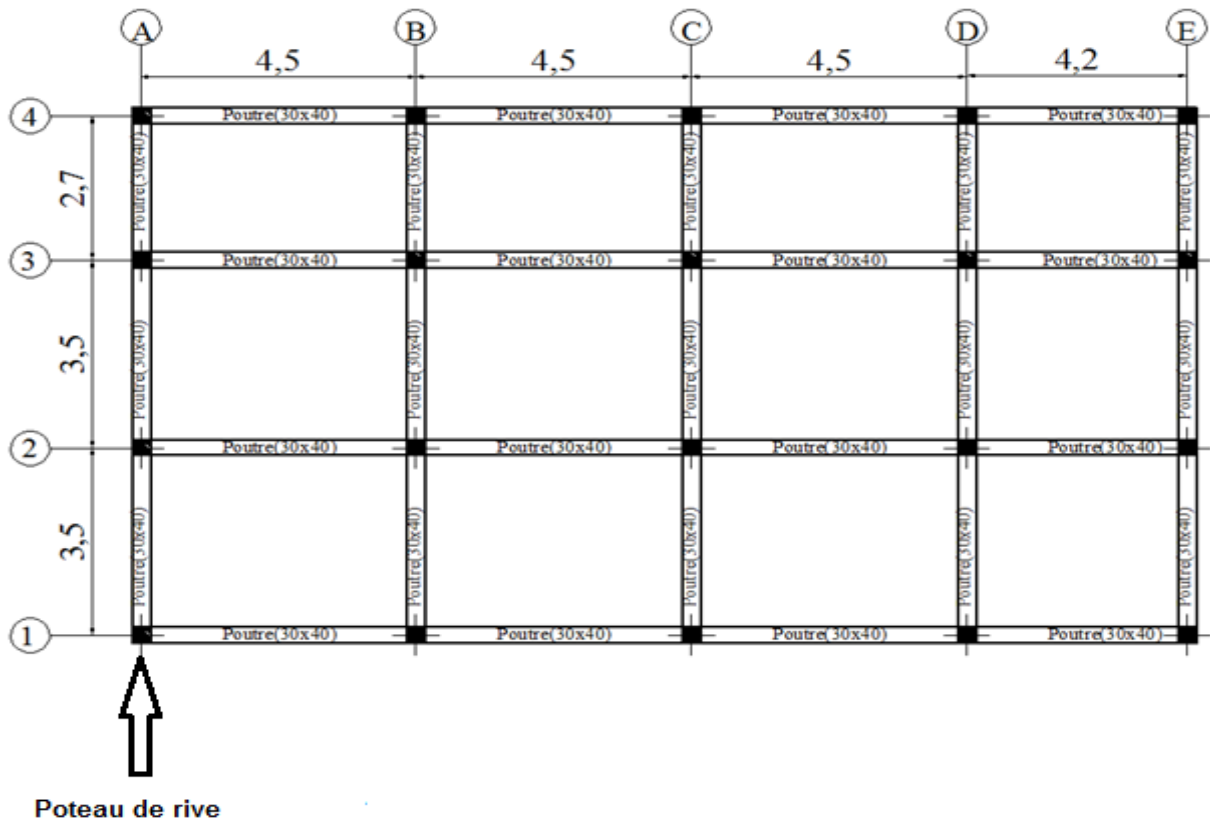


Figure IV.1 : Vue en plan.

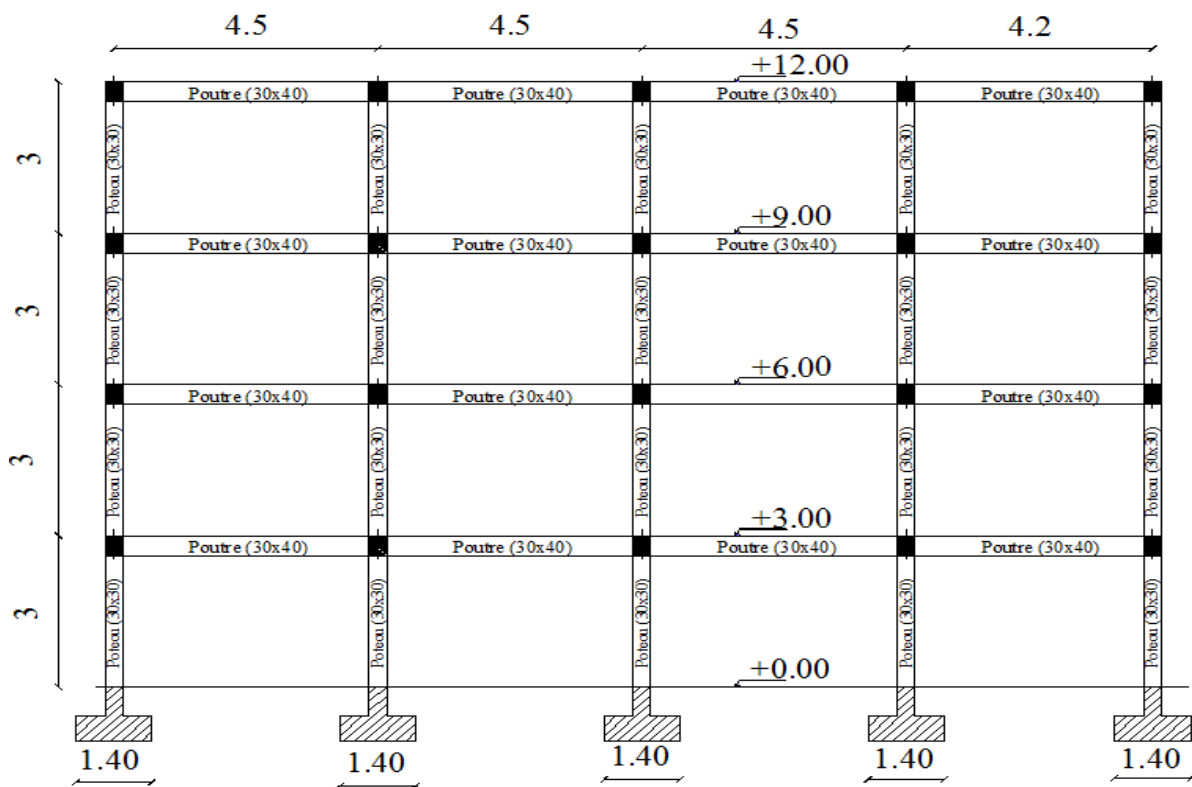


Figure IV.2 : Vue en élévation.

IV.2.3. Caractéristiques mécaniques du béton

Le béton est un matériau obtenu par un mélange adéquat de granulats (sable, gravier) le liant hydraulique (ciment) et de l'eau. Il présente de bonne résistance en compression, de l'ordre de 20 à 40 MPA pour le béton ordinaire. Par contre, son comportement est fragile vis-à-vis de la traction.

a) Résistance caractéristique du béton à la compression

Un béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à l'âge 28 jours exprimé en MPA, pour le présent projet on adopte. $f_{c28}=25$ MPA.

b) Module d'élasticité

C'est le rapport entre la contrainte appliquée et la déformation relative, il est définissable que dans la phase élastique où il y a proportionnalité des contraintes et déformations.

✚ Module de déformation longitudinale

- Le module de déformation longitudinal instantané E_{ij} est :

$$E_{ij}=11000 \sqrt[3]{f_{c28}} \text{ it donc } E_{ij}= 32164.2 \text{ MPA.} \quad (4.1)$$

- Le module de déformation longitudinal différé E_{vj} est :

$$E_{vj}=3700 \sqrt[3]{f_{c28}} \text{ soit donc } E_{vj}= 10819 \text{ MPA.} \quad (4.2)$$

✚ Module de déformation transversale

La valeur du module d'élasticité transversale est donnée par :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4.3)$$

E : Module de Young

ν : Coefficient de poisson

c) Le coefficient de poisson

C'est le rapport entre la déformation relative transversale et la déformation relative longitudinale et vaut :

✚ $\nu = 0$: Le calcul des sollicitations en considérant le béton fissuré (ELU)

- ✚ $\nu = 0.2$: Le calcul des déformations en considérant le béton non fissuré (ELS).

IV.2.4. Dimensionnement de la structure

IV.2.4.1. Planchers

Sont réalisés en corps creux (16+ 4)

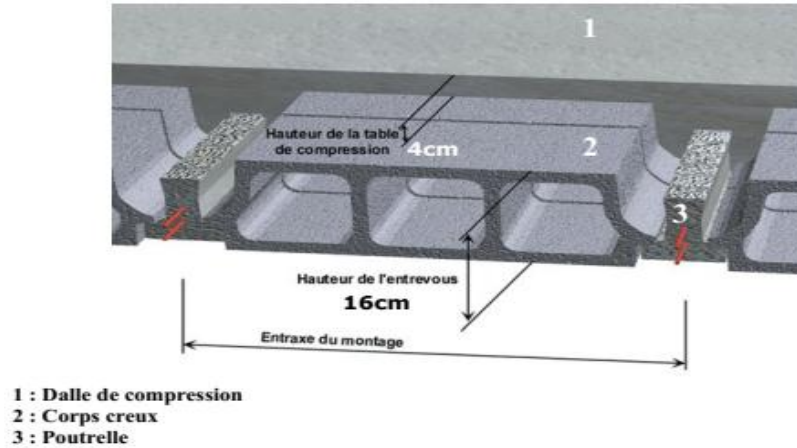


Figure IV.3 : Planchers en corps creux (16+ 4).

IV.2.4.2. Poteaux et Poutres

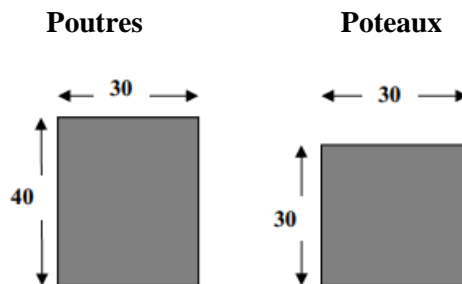


Figure IV.4: Dimension des sections de béton des poutres et des poteaux de structure.

IV.2.5. Charges appliquées

IV.2.5.1. Charges gravitaires

On rappelle que les structures considérées sont à usage d'habitation à planchers à corps creux de type (16+4) ; les charges gravitaires sont évaluées comme suit :

- ✚ Les charges permanentes (G) du plancher terrasse sont évaluées à 5.6 KN/m^2 et celles du plancher courant à 4.8 KN/m^2 .
- ✚ Les charges d'exploitation (Q) du plancher terrasse sont de 1 KN/m^2 et celles du plancher courant à 1.5 KN/m^2 .

IV.2.5.2.Charges sismiques

Les charges sismiques agissant sur les structures étudiées sont les forces latérales appliquées aux différents niveaux des structures.

Les forces sismiques globales agissant sur l'ensemble de chaque bâtiment sont calculées sur la base d'une analyse modale spectrale de ce dernier à l'aide de logiciel SAP2000 et on utilisant comme action sismique le spectre de réponse de calcul défini dans le RPA99/version 2003.

IV.3.Méthode de l'analyse modale spectrale

Dans la pratique, elle constitue la méthode principale de calcul la mieux adaptée aux moyens actuels; de plus, de manière plus ou moins explicite, elle se trouve à la base des méthodes simplifiées. Il s'agit de mettre en évidence les modes propres du mouvement libre (caractéristique de la structure) et d'introduire le spectre de dimensionnement qui fournit la valeur de la réponse maximale à un instant donné. Du point de vue du génie parasismique, la réponse maximale d'une structure, au cours d'un séisme, importe plus que la chronologie détaillée du mouvement dans le temps. Donc, l'analyse modale spectrale désigne la méthode de calcul des effets maximaux d'un séisme sur une structure et comporte les étapes suivantes:

- ✚ Recherches des modes propres ; ainsi que la sélection des modes utiles et prise en compte éventuellement du pseudo-mode.
- ✚ Calcul de la réponse modale.
- ✚ Combinaisons des réponses modales.
- ✚ Cumul des effets des composantes du mouvement sismique

IV.4.Spectre de réponse selon le RPA 99 (ver 2003)

A chaque catégorie de site est associé un spectre de réponse en accélération, en considérant les périodes caractéristiques T_1 et T_2 de chaque catégorie de site dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 : les périodes caractéristiques des sites.

| Site | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| T ₁ (sec) | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| T ₂ (sec) | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 0,70 |

La forme du spectre élastique normalisé en accélération en fonction de la période T se calcule à l'aide des relations suivantes:

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left[1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \left(\frac{Q}{R} \right) - 1 \right) \right] & \rightarrow 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & \rightarrow T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & \rightarrow T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_3}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & \rightarrow T \geq 0.3s \end{cases}$$

S_a : Accélération spectrale associée au mode de vibration de période **T** du bâtiment.

A: Coefficient d'accélération de zone.

η: Correction d'amortissement.

ζ: Pourcentage d'amortissement critique.

R: Le coefficient de comportement.

Q : Facteur de qualité.

T₁, T₂ : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

La modification de l'action sismique est prise en compte donc par la forme du spectre de réponse, Il est indispensable alors, de connaître la nature du sol de fondation avant de choisir le spectre de réponse à utiliser dans les calculs.

La réponse de la structure est évaluée en considérant les quatre spectres de calcul associés aux différentes catégories de site (S1, S2, S3 et S4) figure IV.5.

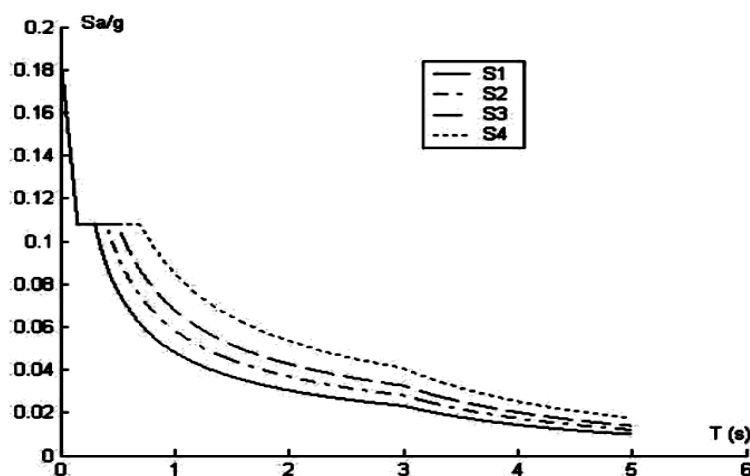


Figure IV.5 : Spectre de réponse de calcul « structure auto stable » des quatre sites.

IV.5. Modélisation de la structure

Dans le cas sans I.S.S, on utilisera l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base. Il s'agit donc du modèle utilisé classiquement pour les bâtiments courants. On considère une loi de comportement linéaire élastique. La réponse de la structure est évaluée en considérant les quatre spectres de calcul associés aux différentes catégories de site (S1; S2; S3; S4)

La structure est supposée être localisée en zone sismique IIa et de groupe d'usage 2, $A = 0.15$, coefficient de comportement de la structure $R = 3.5$, Facteur de qualité $Q = 1.2$.

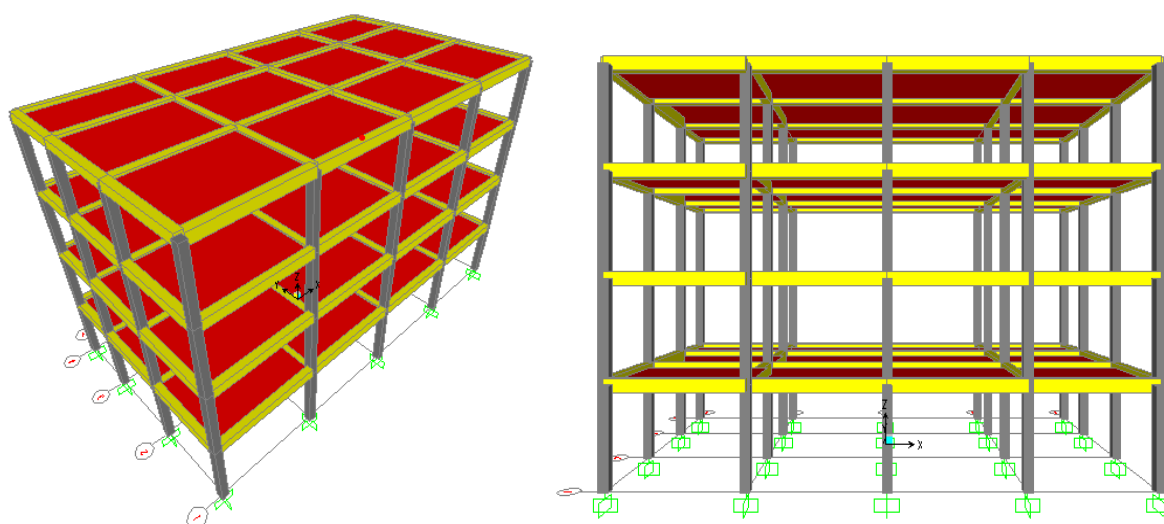


Figure IV.6 : Vue en 3d de structure sans prise en compte de l'ISS

IV.6. Modélisation du sol (ressorts de sol)

Le même modèle de la structure déjà utilisé est repris avec prise en compte de l'interaction sol- structure (I.S.S), Le sol est supposé homogène avec un comportement élastique linéaire.

Le modèle ressorts de sol définit la réaction élastique de sol à l'égard des composantes de déplacement et de rotation de la fondation, Plusieurs formulations de calcul des raideurs du ressort de sol sont proposées. Parmi celle-ci les formules de Newmark-Resenblueth .Les coefficients de rigidité de ces ressorts relatifs aux fondations rectangulaires sont exprimés par les formules dans le Tableau III.1.Les valeurs des raideurs des ressorts de sol sont calculées à l'aide de relations données dans le Tableau IV.3.

Les valeurs des coefficients sans dimension, β_z , $\beta_{x,y}$ et β_ϕ du tableau 5.2 sont données par les abaques spécifiques en fonction du rapport des dimensions de la fondation (b/a) et la direction de l'action sismique considérée Newmark-Resenblueth (Figure III.6) .

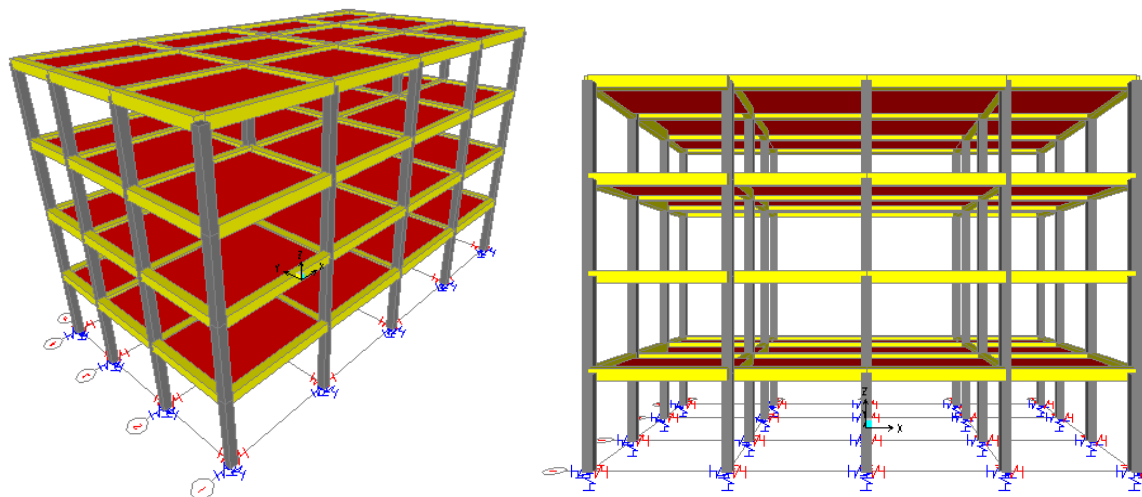


Figure IV.7 : Modélisation de structure avec prise en compte de l'ISS

Tableau IV.3 : Rigidité de ressorts du sol.

| Sites | | Site1 | Site2 | Site3 | Site4 |
|---|---------------|-----------|----------|--------|-------------|
| Type de sol | | rocheux | Ferme | Meuble | Très meuble |
| Module de Young E(Mpa) | | 150 | 50 | 15 | 4 |
| Coefficient de poisson ν | | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.5 |
| Module de cisaillement dynamique G [KN/m ²] | | 57692.30 | 19230.76 | 5000 | 1333.33 |
| Paramètre sans dimension | $\beta_{x,y}$ | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | β_z | 2.16 | 2.16 | 2.16 | 2.16 |
| | β_ϕ | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| Raideurs des ressorts de sol (KN/m) | K_h | 210000 | 70000 | 21000 | 5600 |
| | K_v | 249230.77 | 83076.92 | 30240 | 8064 |
| | K_ϕ | 113076.92 | 37692.30 | 13720 | 3658.66 |

IV.7. Résultats et interprétation sur les structures en béton armé

Les résultats obtenus dans cette étude en termes d'efforts tranchants et les moments, déplacement latéral aux sommets des portiques pour la structure étudiée sont présenté comme suit :

IV.7.1. Calcul des déplacements :

Les résultats obtenus sont calculés par SAP2000

Tableau IV.4: Les déplacements avec et sans ISS de poteau de rive pour les quatre sites.

| Combinaison | | SRX | | | | | | | |
|-------------------|-------------|--------------|------------|-------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------------|
| | | Sans ISS | | | | Avec ISS | | | |
| Sites | | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) |
| Déplacements (cm) | Hauteur (m) | | | | | | | | |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.004 | 0.015 | 0.053 | 0.204 |
| | 3 | 0.150 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.178 | 0.271 | 0.423 | 0.818 |
| | 6 | 0.322 | 0.365 | 0.365 | 0.365 | 0.351 | 0.483 | 0.663 | 1.143 |
| | 9 | 0.451 | 0.511 | 0.511 | 0.511 | 0.480 | 0.639 | 0.839 | 1.393 |
| | 12 | 0.519 | 0.589 | 0.589 | 0.589 | 0.549 | 0.727 | 0.945 | 1.576 |

➤ Commentaires

Les déplacements à chaque étage sont représentés sur la figure IV.8, IV.9, IV.10, IV.11, d'après cette figures on constate que :

- ✚ Dans les deux cas sans et avec ISS le déplacement de la structure augmente en fonction de la hauteur dans les quatre sites mais dans le cas avec ISS la plus par de celui-ci dans le cas sans ISS
- ✚ Le déplacement à la base dans le cas sans ISS est nul
- ✚ Le déplacement à la base dans le cas avec ISS augmente en fonction de site
- ✚ Dans site rocheux les deux cas sans et avec ISS presque la même

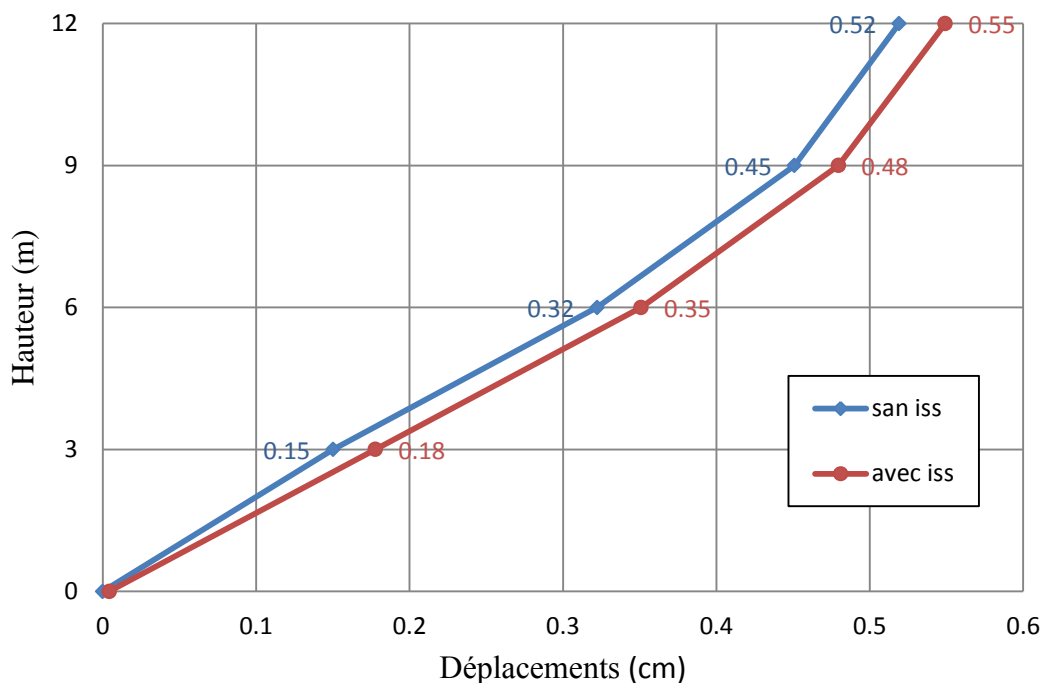


Figure IV.8: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 1

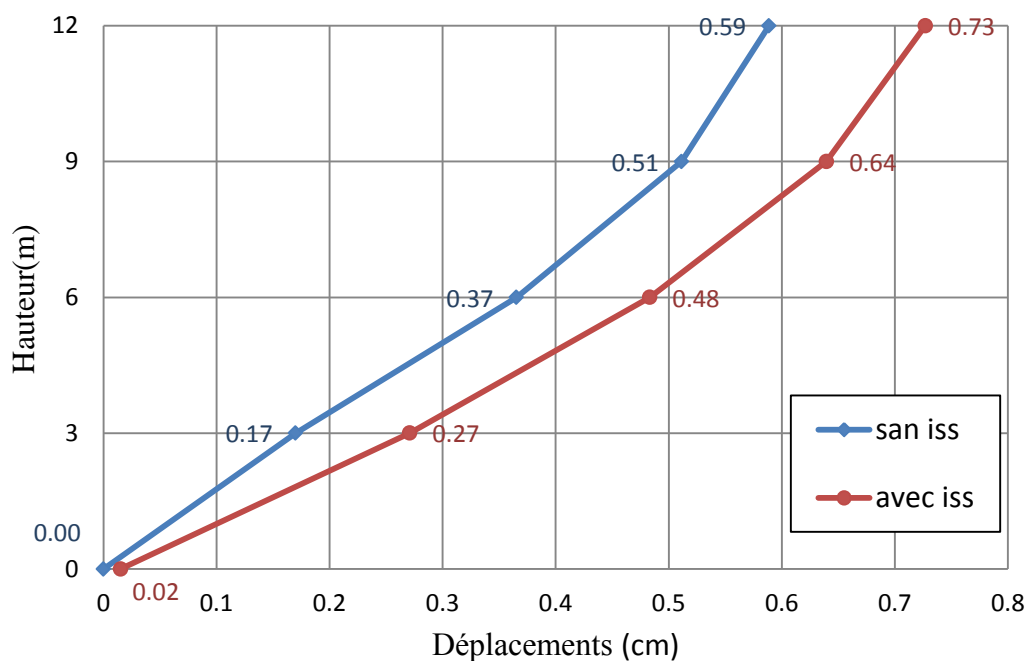


Figure IV.9: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 2

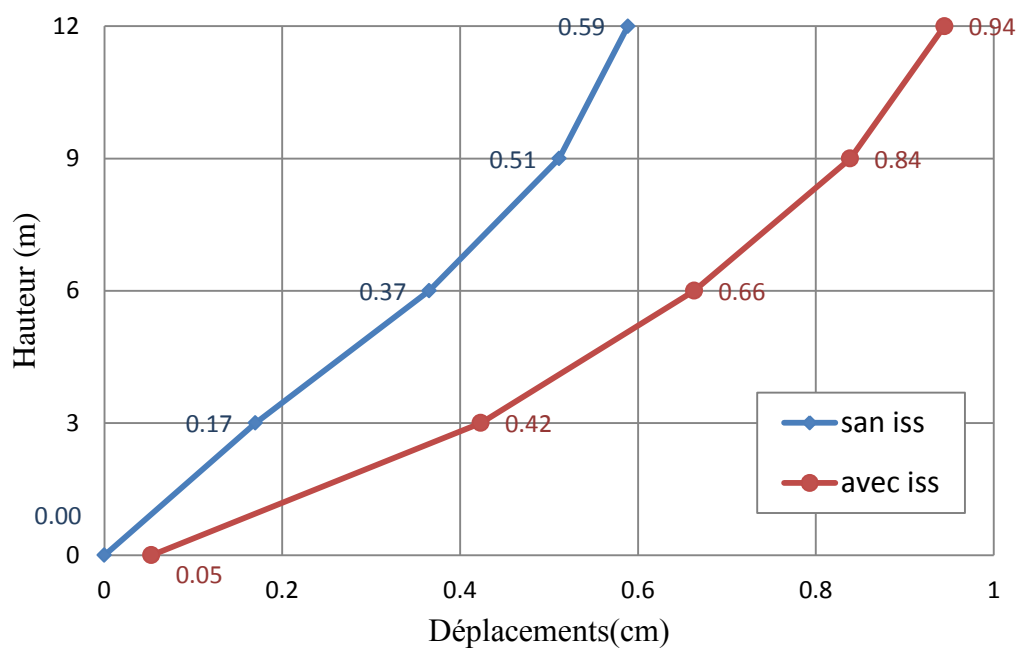


Figure IV.10: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 3

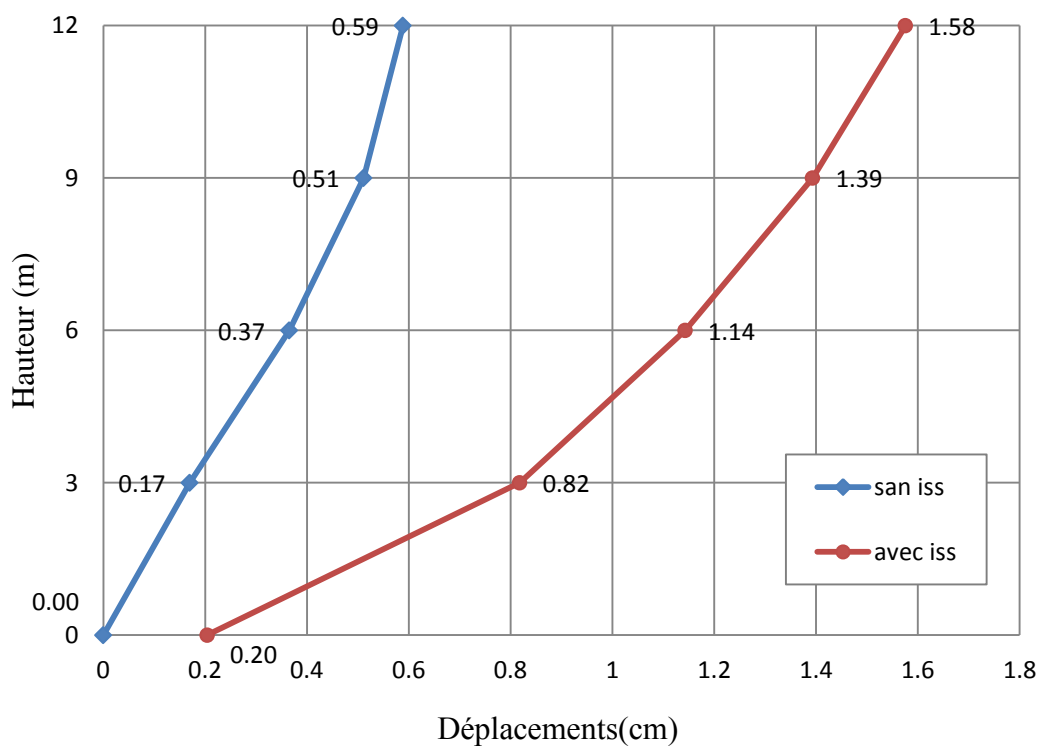


Figure IV.11: Déplacements horizontale de poteau de rive sans et avec interaction du site 4

IV.7.1.1 Déplacement maximal

Les déplacements maximal avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.5:

Tableau IV.5:Déplacement maximal avec et sans ISS

| Les sites | Déplacements (cm) | | | |
|-------------------------------------|-------------------|------------|-------------|------------------|
| | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) |
| Sans ISS | 0.52 | 0.59 | 0.59 | 0.59 |
| Avec ISS | 0.55 | 0.73 | 0.94 | 1.58 |
| comparaison S _{ISS} / S | 1.06 | 1.23 | 1.60 | 2.68 |

➤ Commentaires

- ✚ Dans le cas sans ISS le déplacement de la structure augmente pour les sites 1 et 2 à partir du site 2 l'effet de site est nul (Figure IV.12).
- ✚ Dans le cas avec ISS le déplacement de la structure augmente en fonction de sites
- ✚ Dans le cas avec ISS, le déplacement subit une augmentation notable due à l'interaction pour les sites 3 et 4 ;
- ✚ On observe une augmentation de celle-ci plus le sol est déformable ;
- ✚ La comparaison entre les sites sans ISS et avec ISS montre que le déplacement maximal augmente de 6% pour le site 1, 23% pour le site 2, 60% pour le site 3 et de 168% pour le site 4.

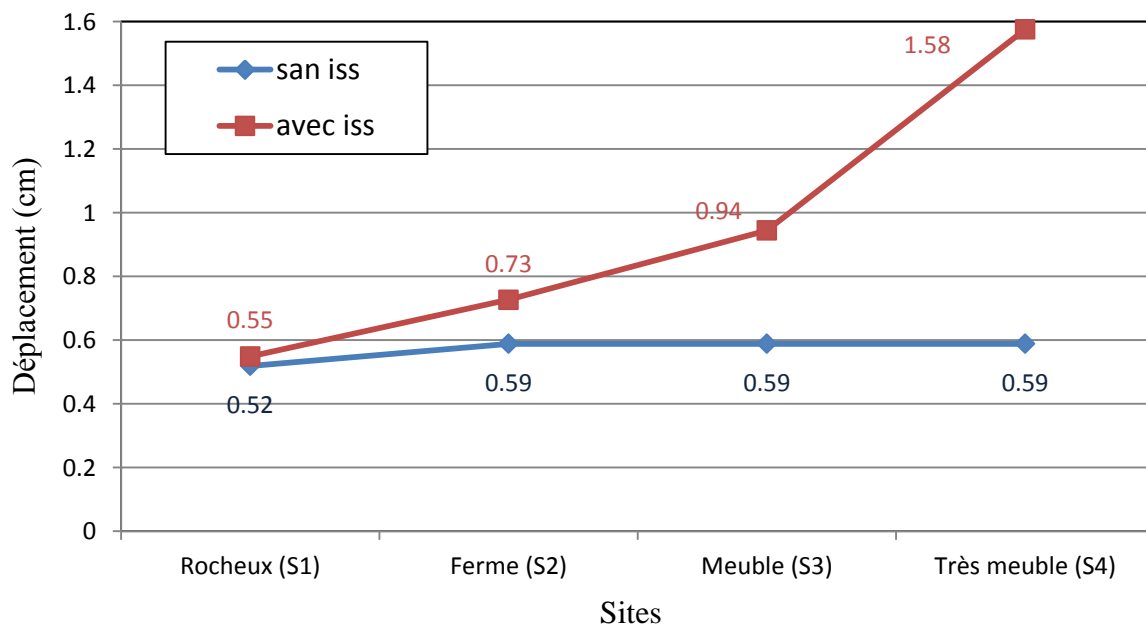


Figure IV.12: Variation du déplacement en fonction du site avec et sans ISS

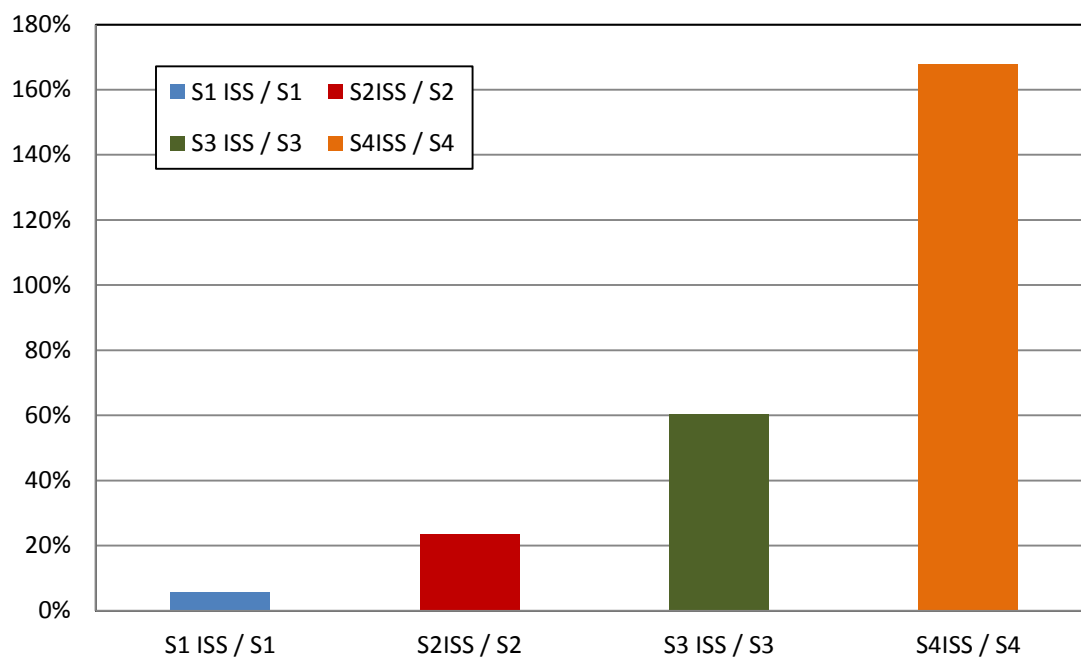


Figure IV.13: Comparaison des résultats pour le déplacement entre les différents sites (Sans et avec ISS)

IV.7.2.Effort tranchant

Les efforts tranchants avec et sans ISS sont donnés pour les quatre sites donne le tableau IV.6:

Tableau IV.6: Les efforts tranchants avec et sans ISS de poteau de rive

| Combinaison | | SRX | | | | | | | |
|------------------------|-------------|--------------|------------|-------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------------|
| | | Sans ISS | | | | Avec ISS | | | |
| Sites | | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) |
| Effort tranchants (Kn) | Hauteur (m) | | | | | | | | |
| | 0 | 8.96 | 10.14 | 9.81 | 10.14 | 8.91 | 10.57 | 11.09 | 11.36 |
| | 3 | 8.96 | 10.14 | 9.81 | 10.14 | 8.91 | 10.57 | 11.09 | 11.36 |
| | 3 | 6.76 | 7.67 | 7.42 | 7.67 | 6.41 | 7.09 | 6.59 | 5.55 |
| | 6 | 6.76 | 7.67 | 7.42 | 7.67 | 6.41 | 7.09 | 6.59 | 5.55 |
| | 6 | 5.09 | 5.75 | 5.56 | 5.75 | 4.83 | 5.34 | 5.04 | 4.54 |
| | 9 | 5.09 | 5.75 | 5.56 | 5.75 | 4.83 | 5.34 | 5.04 | 4.54 |
| | 9 | 2.47 | 2.77 | 2.66 | 2.77 | 2.25 | 2.26 | 1.84 | 1.28 |
| 12 | 2.47 | 2.77 | 2.66 | 2.77 | 2.25 | 2.26 | 1.84 | 1.28 | |

➤ **Commentaires**

Les figures montrent la distribution des efforts tranchants de poteau de rive sans et avec interaction obtenus de la structure dans les quatre sites après cette figure on constate que :

- ✚ Dans les sites rocheux les deux cas sans et avec ISS presque les mêmes
- ✚ Dans les deux cas sans et avec ISS les efforts tranchants de la structure diminuent en fonction de la hauteur dans les quatre sites
- ✚ Effort tranchant à la RDC dans le cas avec ISS est plus grand que c'est dans le cas sans ISS
- ✚ Dans les autres étages effort tranchant dans le cas sans ISS est plus grand que c'est dans le cas avec ISS

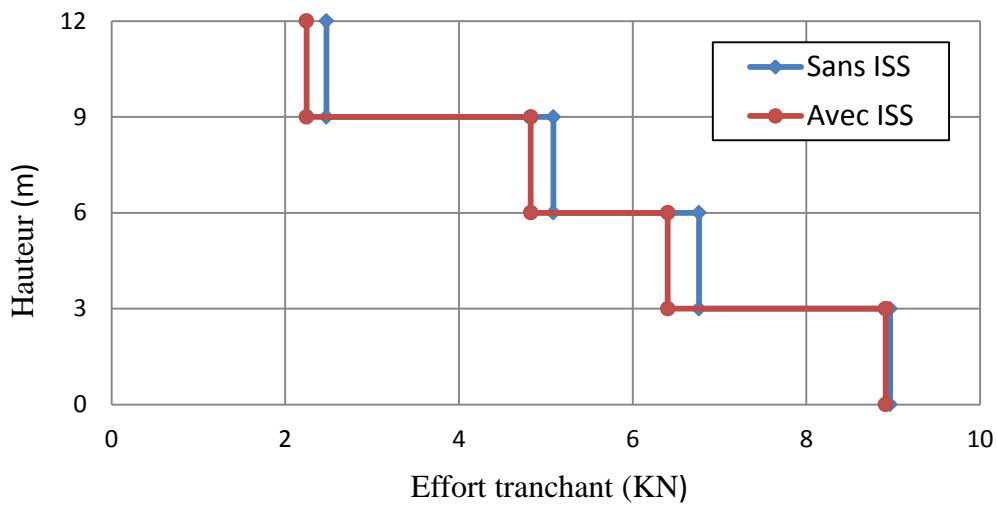


Figure IV.14: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 1

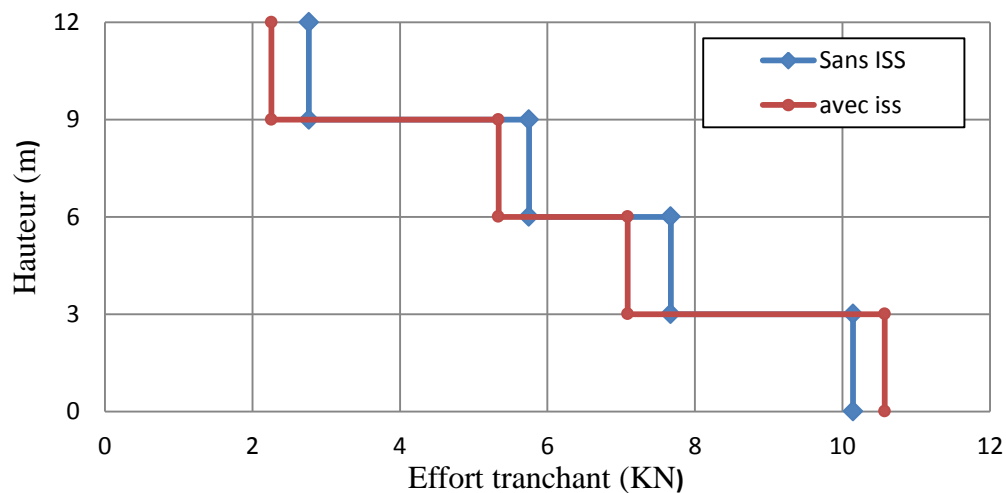


Figure IV.15: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 2

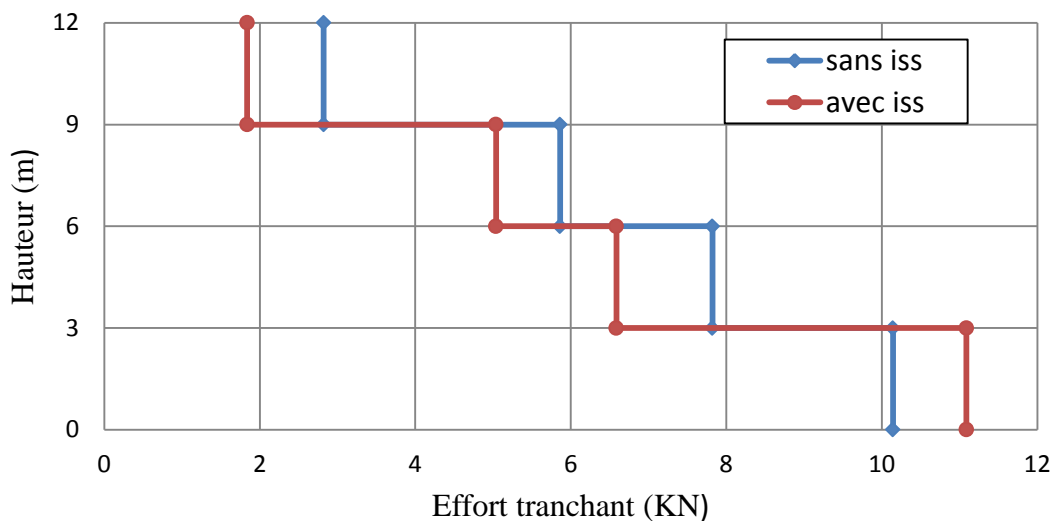


Figure IV.16: Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 3

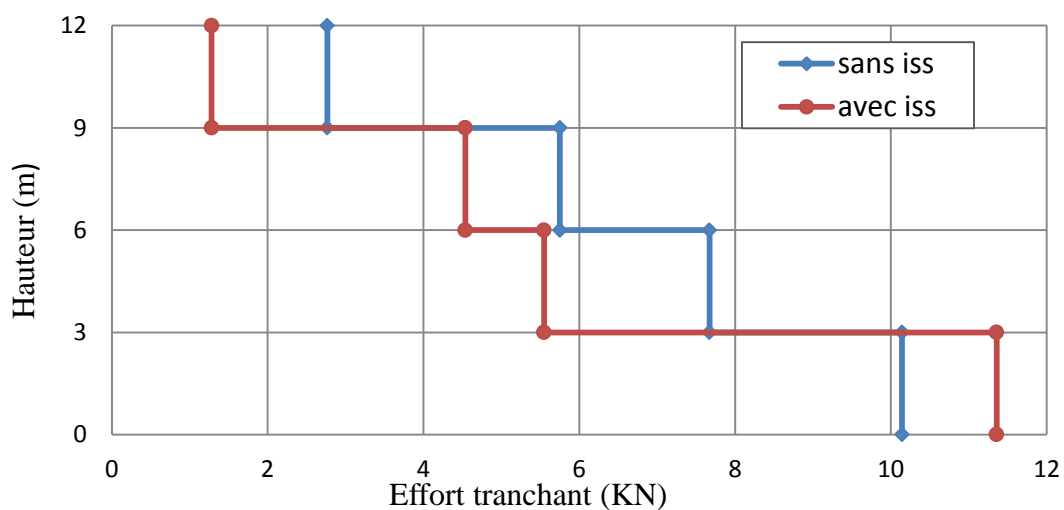


Figure IV.17 : Effort tranchant de poteau de rive sans et avec interaction du site 4

IV.7.2.1. Effort tranchant à la base

Les efforts tranchant à la base avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.7.

Tableau IV.7 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS.

| les sites | Effort tranchant à la base (KN) | | | |
|----------------------------------|---------------------------------|------------|-------------|------------------|
| | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) |
| Sans ISS | 46.578 | 52.66 | 53.298 | 52.66 |
| Avec ISS | 44.778 | 50.52 | 49.098 | 45.446 |
| Comparaison S / S _{ISS} | 1.040 | 1.042 | 1.086 | 1.159 |

➤ Commentaires

- ✚ La comparaison de l'effort tranchant entre sans ISS et avec ISS dans les quatre sites montre que à la base diminue de 4% pour le site 1, 4% pour le site 2, 9% pour le site 3 et de 16% pour le site 4;

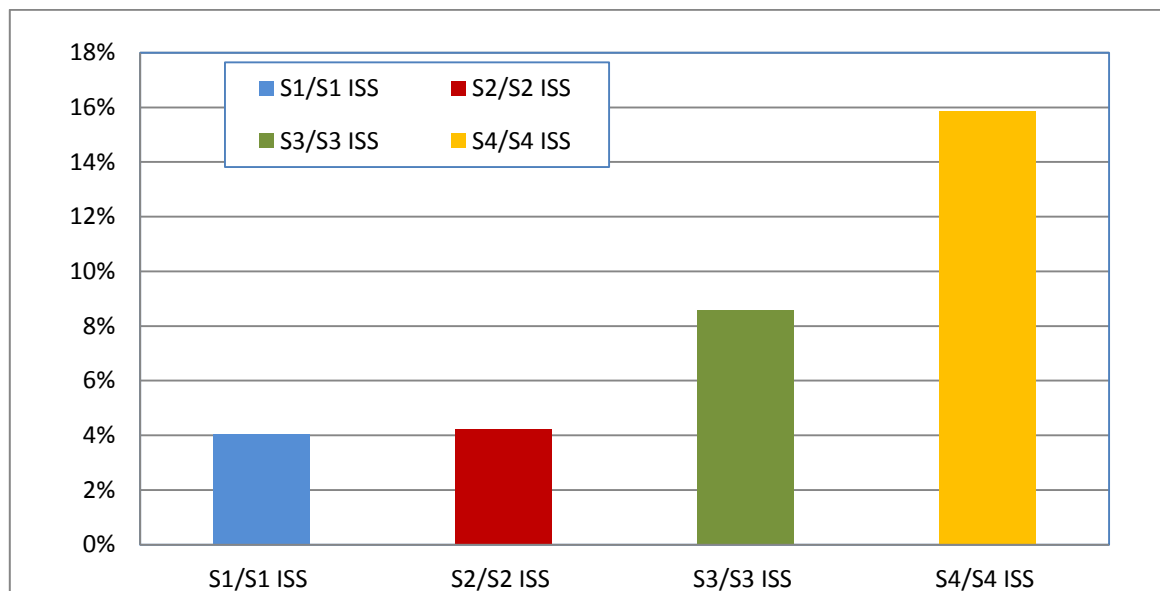


Figure IV.18 : Comparaison des résultats pour les efforts tranchants à la base entre les différents sites (Sans et avec ISS)

IV.7.2.Moment

Les moments avec et sans ISS sont donnés pour les quatre sites dans le tableau IV.8:

Tableau IV.8: Les moments avec et sans ISS de poteau de rive

| Combinaison | SRX | | | | | | | | |
|---------------|--------------|------------|-------------|------------------|--------------|------------|-------------|------------------|-------|
| | Sans ISS | | | | Avec ISS | | | | |
| Sites | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) | Rocheux (S1) | Ferme (S2) | Meuble (S3) | Très meuble (S4) | |
| moment (KN.m) | Hi | | | | | | | | |
| | 0 | 16.07 | 18.19 | 17.60 | 18.19 | 15.20 | 16.44 | 14.01 | 8.24 |
| | 1.5 | 2.63 | 2.98 | 2.89 | 2.98 | 1.84 | 0.62 | 2.63 | 8.81 |
| | 3 | 10.82 | 12.24 | 11.82 | 12.24 | 11.54 | 15.28 | 19.25 | 25.84 |
| | 3 | 9.74 | 11.05 | 10.68 | 11.05 | 9.08 | 9.77 | 8.53 | 6.17 |
| | 4.5 | 0.53 | 0.57 | 0.55 | 0.57 | 0.63 | 0.93 | 1.40 | 2.19 |
| | 6 | 10.56 | 11.98 | 11.58 | 11.98 | 10.14 | 11.50 | 11.24 | 10.49 |
| | 6 | 6.91 | 7.79 | 7.52 | 7.79 | 6.53 | 7.15 | 6.66 | 5.91 |
| | 7.5 | 0.80 | 0.90 | 0.87 | 0.90 | 0.78 | 0.91 | 0.93 | 0.91 |
| | 9 | 8.37 | 9.47 | 9.15 | 9.47 | 7.97 | 8.88 | 8.46 | 7.70 |
| | 9 | 2.93 | 3.26 | 3.13 | 3.26 | 2.63 | 2.57 | 1.99 | 1.25 |
| | 10.5 | 0.81 | 0.92 | 0.89 | 0.92 | 0.77 | 0.85 | 0.79 | 0.71 |
| 12 | 4.50 | 5.05 | 4.87 | 5.05 | 4.12 | 4.22 | 3.54 | 2.61 | |

➤ **Commentaires**

- ✚ Dans le site rocheux et le site ferme, les deux cas sans et avec ISS sont presque les mêmes
- ✚ Dans le site meuble et le site très meuble, les deux cas sans et avec ISS Variable entre eux
- ✚ Dans les deux cas sans et avec ISS, les moments de la structure diminuent en fonction de la hauteur dans les quatre sites

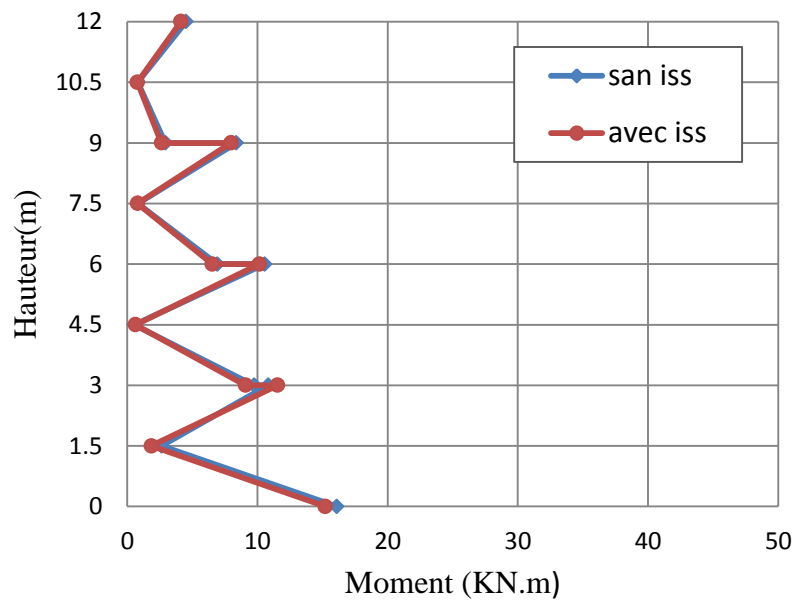


Figure IV.19 : Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 1

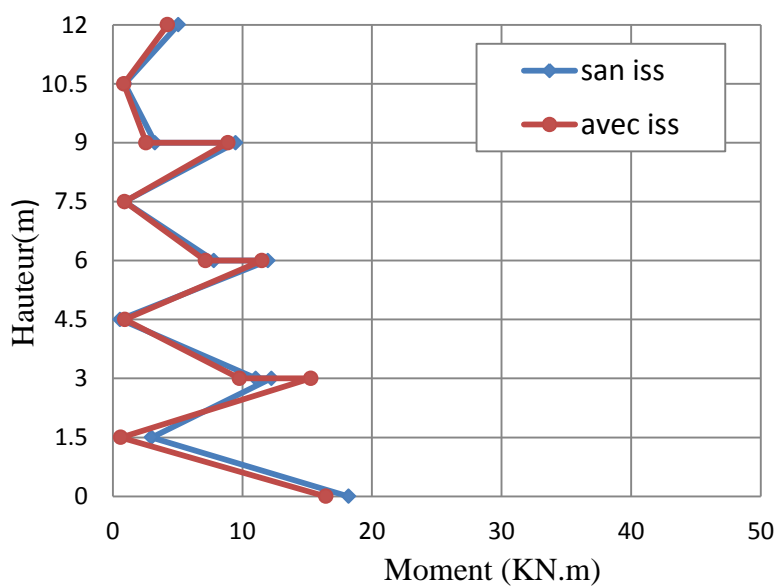


Figure IV.20 : Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 2

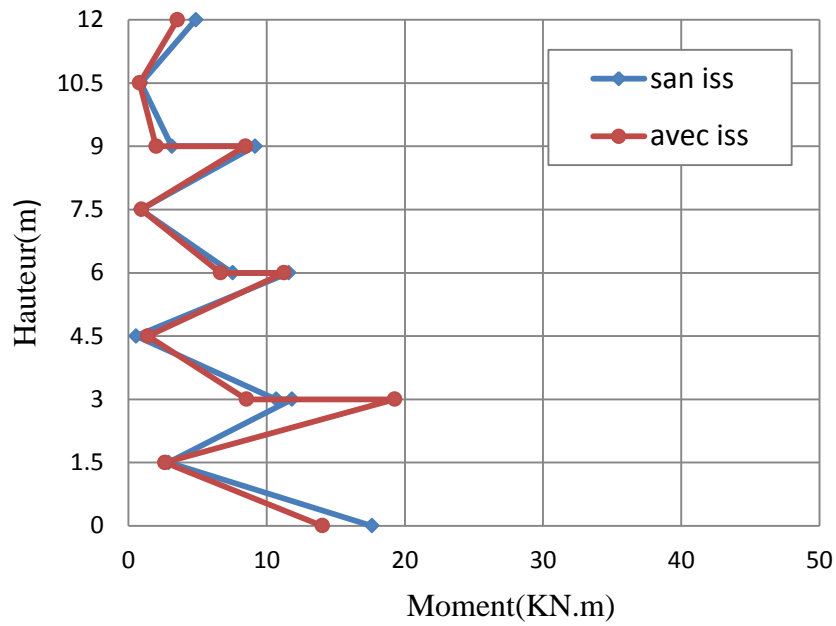


Figure IV.21 : Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 3

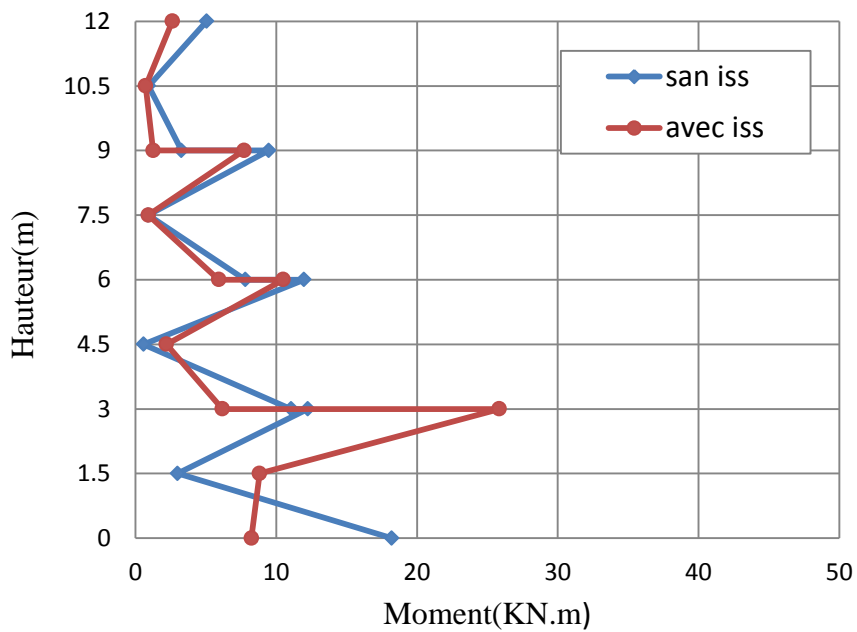


Figure IV.22 : Moment de poteau de rive sans et avec interaction du site 4

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusion générales

Au cours du travail élaboré dans le cadre de mon mémoire de master, nous me suis rendu compte que l'analyse de l'interaction sol-structure est très importante sur la réponse sismique d'une structure en béton armée car elle peut être nuisible comme bénéfique par rapport à l'hypothèse dominante de la base fixe (structure encastree a la base).

Il est confirmé que la réponse de la structure dépend non seulement de ses caractéristiques dynamiques, de l'excitation sismique mais aussi des caractéristiques du milieu extérieur entourant la base de la structure, autrement dit l'interaction entre la structure, la fondation et le sol.

Par conséquent, l'effet de l'action du sol sur le comportement de la structure lors d'un séisme joue un rôle primordial et ne peut être négligé ni dissocié du calcul de la réaction totale de la construction face à un séisme. Ainsi, plusieurs modèles mathématiques tenant compte de l'interaction sol-structure (ISS) ont vu le jour, chacun basé sur des hypothèses propres et bien spécifiques. L'objet de notre présent travail a consisté sur la compréhension des aspects les plus importants de l'ISS en considérant des portiques représentant la structure de bâtiment implanté sur des sols rigides et élastiques dont ces derniers sont modélisés par des ressorts simples (type Newmark-Resenbleuth) qui caractérisent la déformation linéaire de celui-ci selon trois directions (horizontale, vertical et balancement)

Dans l'étude élaborée on a considéré que le sol est homogène. Le sol est modélisé par des ressorts.

La démarche pour la prise en compte de l'ISS comprend les étapes :

- ✚ Le calcul de manière approchée des raideurs de sol avec les méthodes Newmark – Resenbleuth
- ✚ Le calcul des déplacements
- ✚ Le calcul des déplacements maximal
- ✚ Le calcul de l'effort tranchant
- ✚ Le calcul de l'effort tranchant total à la base.
- ✚ Le calcul de moment

Nous avons observé à travers comparaison entre les deux cas sans et avec ISS dans les quatre sites, Une légère différence de déplacement et effort tranchant et moment dans le site 1 et site 2 à partir du site 2 grand augmentation dans cette différence.

Les résultats présentés dans cette étude avec les hypothèses considérées ont montré que la modélisation d'une structure avec tenir compte l'effet ISS sont les plus fiables car leur dépendance des caractéristiques des sols est trop importante.

Alors que la modélisation d'une structure encadrée (sans tenir compte l'effet ISS) n'est pas à recommander car elle donne des résultats trop conservatifs

Où il peut être modélisé sol ferme et très ferme sans l'interaction sol-structure (ISS) mais sol meuble est très meuble il ne peut pas être modélisé sans l'interaction sol-structure il est modélisé avec l'interaction sol-structure

D'un point de vue du règlement parasismique algérien l'effet de site est pris en compte à travers les spectres de réponse de dimensionnement spécifiques à chacun des sites.

Recommandations futures

Ce travail de recherche s'est voulu être un départ pour les futurs étudiants désirant entamer des recherches sur le phénomène d'interaction sol-structure. Ce phénomène étant très complexe et non couvert dans les études de graduations rend la tâche de son assimilation difficile. Mais vue son importance dans la pratique, nous avons tenté d'apporter des éclaircissements pour les futurs jeunes chercheurs d'autant plus l'actualisation de beaucoup de règlements parasismiques tient compte de plus en plus de l'ISS. Aussi, les recherches qui se font ces dernières années sur ce problème visent à apporter des approches aisées à la prise en compte de l'ISS dans la pratique et même pour les structures ordinaires. Ils essayent de maintenir au minimum les complexités mathématiques pour rendre le problème plus accessible aux non-experts dans le domaine de mathématiques et propagation des ondes.

L'estimation des effets de l'interaction l'ISS sur la réponse sismique des structures a été tentée ici pour des structures à un seul degré de liberté. Il est possible que le futur chercheur étudie les effets de l'ISS et son impact sur le comportement dynamique des structures pour des structures à plusieurs degrés de liberté, pour tenir compte de l'intervention des modes supérieurs. Aussi, il est envisageable d'étudier l'interaction sol-structure non linéaire ou encore dans les milieux hétérogènes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Frank S : " les séismes"
- [2] François M « Origine et localisation des séismes »
- [3] Balandier P, Sismologie appliquée à l'usage des architectes et ingénieurs, Cahier 4, Collection Conception parasismique, 2004
- [4] <http://bhernand.chez.com/jeunes.html>, consulter le: le 02/02/2018
- [5] <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/seismes.html>, consulter le 09/02/2018
- [6] Règles parasismiques algériennes RPA99/ Version 2003.
- [7] Alem T, Influence des dimensions du bâtiment sur la valeur de la période (cas des structures auto-stable), Mémoire de magister, université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Novembre 2009.
- [8] Milan Z, Conception parasismique des bâtiments, Tome 4, Septembre 2010.
- [9] Hemas M, Modélisation par macro éléments du comportement non linéaire des ouvrages en béton armés sous action sismique, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France, 2010.
- [10] Construction moderne : " Éléments d'une conception architecturale parasismique"
- [11] Balandier P, Le séisme et les bâtiments, document d'information à l'usage des constructeurs, Direction départementale de l'équipement de la Guadeloupe- Direction régionale de l'environnement de Guadeloupe, volume 3.
- [12] Pierino L , Marc B, Génie parasismique: conception et dimensionnement des bâtiments,2008.
- [13] Pierino L , Séismes et construction: éléments pour non-spécialistes,2008.
- [14] Milan Z: "Construire parasismique (Risque sismique ; conception parasismique des bâtiments, réglementation)"
- [15]http://www.irsln.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/3Quels_sont_les_effets_des_seismes.aspx, consulter le: mars 2018
- [16] Alain C, Victor D, Calcul dynamique des structures en zone sismique, Editions Eyrolles, 3^{ème} éditions, Paris, 1984.

- [17] Jendoubi A, effet de l'interaction dynamique linéaire et non-linéaire sol-structure : application aux pylônes de transport d'énergie, Thèse de doctorat, université de Sherbrooke (Québec), Canada ,Juillet 2015.
- [18] Benlaala N , Influence de l'interaction sol structure sur la réponse sismique des bâtiments, Mémoire de magister, Département de Génie civil et hydraulique , université Mohamed Khider– Biskra,
- [19] Alain P, Dynamique des structures, Ecole des Ponts paris, Département Génie Civil et Construction, 2010.
- [20] Dridje M A ,Etude de la réponse Sismique des Structures en tenant compte de l'Interaction Sol- Structure , Mémoire de magister, Département de Génie Civil ,Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2012.
- [21] NEHPR. "Soil-Structure Interaction for Building Structures", Consultants Joint Venture A partnership of the Applied Technology Council and the Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering,2012.
- [22] Louay K, Influence de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des bâtiments analyse dans les domaines linéaire et non linéaire, Thèse doctorat, Département de Génie Civil, université de Lille science et technologie, Lille, 2009.
- [23] Messiod S, étude de l'interaction sol-fondation 3d sous sollicitations sismiques, Thèse de doctorat , Département de Génie Civil ,Université 20 Août 1955-Skikda.
- [24] Miloudi M, Ramdani F Z, étude dynamique non linéaire de l'interaction sol-structure , Mémoire de master, Département de Génie Civil, Université de Tlemcen,2014
- [25] Newmark, Rosenblueth "Fundamentals of earthquake engineering". Prentice-Hall: Englewood Cliffs, Nj, 1971
- [26] Deleuze G, " Réponse à un mouvement sismique d'un édifice pose sur un sol élastique " Annale de l'ITBTP n° 234, Paris. 1967.
- [27] Tamahloult M, influence de l'interaction sol-structure sur la réponse dynamique des structures des bâtiments, Mémoire de magister ,Département de Génie Civil, Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur, Université Hassiba Benbouali, Chlef., 2010.

Annexe A

A .1.Déplacements

Les déplacements avec et sans ISS de poteau de rive et poteau central selon x et y pour les quatre sites

| | | Hauteur(m) | Déplacement (cm) | | | |
|---------------------|-------------|------------|------------------|----------|-----------------|----------|
| | | | poteaux de rive | | poteaux central | |
| | | | Selon x | selon y | Selon x | selon y |
| Très meuble (S4) | sans ISS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0,15007 | 0,141701 | 0,15112 | 0,151089 |
| | | 6 | 0,322237 | 0,300441 | 0,323684 | 0,318861 |
| | | 9 | 0,450922 | 0,420295 | 0,452754 | 0,445426 |
| | | 12 | 0,51916 | 0,485398 | 0,521288 | 0,514673 |
| | avec ISS | 0 | 0,004246 | 0,004218 | 0,005196 | 0,005492 |
| | | 3 | 0,177661 | 0,169613 | 0,17868 | 0,179203 |
| | | 6 | 0,350927 | 0,333542 | 0,352112 | 0,350829 |
| | | 9 | 0,479541 | 0,458156 | 0,481045 | 0,481345 |
| | | 12 | 0,549198 | 0,529888 | 0,550921 | 0,556944 |
| Meuble (S3) | sans ISS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0,169922 | 0,15778 | 0,170915 | 0,167794 |
| | | 6 | 0,365261 | 0,334768 | 0,36657 | 0,354595 |
| | | 9 | 0,511381 | 0,468476 | 0,51305 | 0,495632 |
| | | 12 | 0,588699 | 0,541017 | 0,590625 | 0,572585 |
| | avec ISS | 0 | 0,015123 | 0,014914 | 0,018496 | 0,018962 |
| | | 3 | 0,270838 | 0,261362 | 0,271568 | 0,272195 |
| | | 6 | 0,483159 | 0,469993 | 0,483624 | 0,488088 |
| | | 9 | 0,639472 | 0,630597 | 0,640152 | 0,654556 |
| | | 12 | 0,727023 | 0,730377 | 0,727771 | 0,758307 |

| | | | | | | |
|--------------|----------|----|----------|----------|----------|----------|
| Ferme (S2) | sans ISS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0,169922 | 0,15778 | 0,170915 | 0,167794 |
| | | 6 | 0,365261 | 0,334768 | 0,36657 | 0,354595 |
| | | 9 | 0,511381 | 0,468476 | 0,51305 | 0,495632 |
| | | 12 | 0,588699 | 0,541017 | 0,590625 | 0,572585 |
| | avec ISS | 0 | 0,052965 | 0,052711 | 0,064163 | 0,064386 |
| | | 3 | 0,423369 | 0,426873 | 0,42315 | 0,437378 |
| | | 6 | 0,663143 | 0,690764 | 0,662061 | 0,706681 |
| | | 9 | 0,838655 | 0,90074 | 0,837632 | 0,921505 |
| | | 12 | 0,944558 | 1,048699 | 0,943442 | 1,073121 |
| Rocheux (S1) | sans ISS | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | | 3 | 0,169922 | 0,15778 | 0,170915 | 0,167794 |
| | | 6 | 0,365261 | 0,334768 | 0,36657 | 0,354595 |
| | | 9 | 0,511381 | 0,468476 | 0,51305 | 0,495632 |
| | | 12 | 0,588699 | 0,541017 | 0,590625 | 0,572585 |
| | avec ISS | 0 | 0,204193 | 0,199107 | 0,240606 | 0,231428 |
| | | 3 | 0,81816 | 0,900666 | 0,814674 | 0,909043 |
| | | 6 | 1,143064 | 1,371635 | 1,137997 | 1,383584 |
| | | 9 | 1,393491 | 1,784464 | 1,38843 | 1,800499 |
| | | 12 | 1,575733 | 2,137574 | 1,570558 | 2,157287 |

A .2.Effort tranchant :

Les efforts tranchant avec et sans ISS de poteau de rive et poteau central selon x et y pour les quatre sites

| | | Hauteur (m) | Effort tranchant (KN) | | | |
|--------------|----------|----------------|-----------------------|---------|-----------------|---------|
| | | | poteaux de rive | | poteaux central | |
| | | | selon x | selon y | selon x | selon y |
| Rocheux (S1) | sans ISS | 0 | 8,964 | 8,969 | 10,952 | 11,745 |
| | | 3 | 8,964 | 8,969 | 10,952 | 11,745 |
| | | 3 | 6,764 | 6,903 | 10,21 | 11,186 |
| | | 6 | 6,764 | 6,903 | 10,21 | 11,186 |
| | | 6 | 5,087 | 5,163 | 7,702 | 8,487 |
| | | 9 | 5,087 | 5,163 | 7,702 | 8,487 |
| | | 9 | 2,474 | 2,516 | 4,2 | 4,803 |
| | | 12 | 2,474 | 2,516 | 4,2 | 4,803 |
| | avec ISS | 0 | 8,912 | 8,853 | 10,905 | 11,527 |
| | | 3 | 8,912 | 8,853 | 10,905 | 11,527 |
| | | 3 | 6,405 | 6,578 | 10,313 | 11,237 |
| | | 6 | 6,405 | 6,578 | 10,313 | 11,237 |
| | | 6 | 4,827 | 4,951 | 7,768 | 8,514 |
| | | 9 | 4,827 | 4,951 | 7,768 | 8,514 |
| 9 | | 2,245 | 2,383 | 4,388 | 5,018 | |
| 12 | | 2,245 | 2,383 | 4,388 | 5,018 | |
| Ferme (S2) | sans ISS | 0 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 7,671 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 7,671 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 5,75 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 5,75 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 2,766 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | | 12 | 2,766 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | avec ISS | 0 | 10,573 | 10,427 | 12,931 | 13,257 |
| | | 3 | 10,573 | 10,427 | 12,931 | 13,257 |
| | | 3 | 7,089 | 7,446 | 12,559 | 13,299 |
| | | 6 | 7,089 | 7,446 | 12,559 | 13,299 |
| | | 6 | 5,338 | 5,645 | 9,376 | 9,951 |
| | | 9 | 5,338 | 5,645 | 9,376 | 9,951 |
| 9 | | 2,26 | 2,678 | 5,499 | 5,993 | |
| 12 | | 2,26 | 2,678 | 5,499 | 5,993 | |

| | | | | | | |
|------------------|----------|----|--------|--------|--------|--------|
| Meuble (S3) | sans ISS | 0 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 7,822 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 7,822 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 5,863 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 5,863 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 2,821 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | | 12 | 2,821 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | avec ISS | 0 | 11,088 | 11,037 | 13,432 | 13,481 |
| | | 3 | 11,088 | 11,037 | 13,432 | 13,481 |
| | | 3 | 6,586 | 7,446 | 13,592 | 13,986 |
| | | 6 | 6,586 | 7,446 | 13,592 | 13,986 |
| | | 6 | 5,038 | 5,762 | 10,032 | 10,285 |
| | | 9 | 5,038 | 5,762 | 10,032 | 10,285 |
| | | 9 | 1,837 | 2,732 | 6,24 | 6,351 |
| | | 12 | 1,837 | 2,732 | 6,24 | 6,351 |
| Très meuble (S4) | sans ISS | 0 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 10,143 | 9,983 | 12,381 | 13,039 |
| | | 3 | 7,671 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 7,671 | 7,694 | 11,569 | 12,446 |
| | | 6 | 5,75 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 5,75 | 5,745 | 8,698 | 9,41 |
| | | 9 | 2,766 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | | 12 | 2,766 | 2,782 | 4,697 | 5,279 |
| | avec ISS | 0 | 11,357 | 11,086 | 13,383 | 12,883 |
| | | 3 | 11,357 | 11,086 | 13,383 | 12,883 |
| | | 3 | 5,548 | 6,943 | 14,504 | 14,079 |
| | | 6 | 5,548 | 6,943 | 14,504 | 14,079 |
| | | 6 | 4,537 | 5,66 | 10,544 | 10,146 |
| | | 9 | 4,537 | 5,66 | 10,544 | 10,146 |
| | | 9 | 1,281 | 2,717 | 7,016 | 6,458 |
| | | 12 | 1,281 | 2,717 | 7,016 | 6,458 |

A .3. Moment

Les moments avec et sans ISS de poteau de rive et poteau central selon x et y pour les quatre sites

| | | Hauteur (m) | moment (KN,m) | | | |
|--------------|----------|-------------|-----------------|---------|-----------------|---------|
| | | | Poteaux de rive | | Poteaux central | |
| | | | selon x | selon y | selon x | selon y |
| Rocheux (S1) | sans ISS | 0 | 16,0738 | 15,6753 | 18,0846 | 18,8647 |
| | | 1,5 | 2,6327 | 2,2252 | 1,6598 | 1,2506 |
| | | 3 | 10,8192 | 11,2314 | 14,7716 | 16,37 |
| | | 3 | 9,7393 | 10,0313 | 15,0992 | 16,6519 |
| | | 4,5 | 0,5254 | 0,3992 | 0,3078 | 0,2171 |
| | | 6 | 10,5633 | 10,683 | 15,5338 | 16,9078 |
| | | 6 | 6,9084 | 7,1507 | 11,0725 | 12,3825 |
| | | 7,5 | 0,7967 | 0,6364 | 0,5317 | 0,3926 |
| | | 9 | 8,3662 | 8,3457 | 12,0391 | 13,0811 |
| | | 9 | 2,929 | 3,1241 | 5,7097 | 6,7255 |
| | | 10,5 | 0,8097 | 0,6631 | 0,602 | 0,488 |
| | | 12 | 4,504 | 4,4282 | 6,8912 | 7,6848 |
| | avec ISS | 0 | 15,2032 | 14,8089 | 16,9484 | 17,5013 |
| | | 1,5 | 1,8431 | 1,5361 | 0,5978 | 0,2352 |
| | | 3 | 11,5363 | 11,7526 | 15,768 | 17,0806 |
| | | 3 | 9,0815 | 9,4525 | 15,2123 | 16,727 |
| | | 4,5 | 0,6278 | 0,4823 | 0,3406 | 0,2228 |
| | | 6 | 10,1446 | 10,2865 | 15,7286 | 16,9869 |
| | | 6 | 6,5279 | 6,8441 | 11,1775 | 12,4357 |
| | | 7,5 | 0,7803 | 0,6224 | 0,5195 | 0,3759 |
| | | 9 | 7,965 | 8,0151 | 12,1312 | 13,1082 |
| | | 9 | 2,6275 | 2,9587 | 5,9774 | 7,0364 |
| | | 10,5 | 0,7666 | 0,6274 | 0,6137 | 0,498 |
| | | 12 | 4,1165 | 4,1928 | 7,1881 | 8,0197 |

| | | | | | | |
|------------|----------|------|---------|---------|---------|---------|
| Ferme (S2) | sans ISS | 0 | 18,1942 | 17,4506 | 20,4483 | 20,9461 |
| | | 1,5 | 2,9834 | 2,4791 | 1,8794 | 1,3906 |
| | | 3 | 12,2369 | 12,4983 | 16,6953 | 18,1707 |
| | | 3 | 11,0459 | 11,1819 | 17,1098 | 18,5285 |
| | | 4,5 | 0,568 | 0,4292 | 0,3278 | 0,2254 |
| | | 6 | 11,976 | 11,9057 | 17,5994 | 18,8115 |
| | | 6 | 7,7926 | 7,9485 | 12,4934 | 13,722 |
| | | 7,5 | 0,898 | 0,7063 | 0,5984 | 0,4336 |
| | | 9 | 9,4685 | 9,2912 | 13,6043 | 14,5111 |
| | | 9 | 3,2575 | 3,4465 | 6,376 | 7,3848 |
| | | 10,5 | 0,9164 | 0,7382 | 0,6803 | 0,5414 |
| | | 12 | 5,0499 | 4,9027 | 7,7162 | 8,4521 |
| | avec ISS | 0 | 16,4427 | 16,0155 | 18,0308 | 18,2679 |
| | | 1,5 | 0,6172 | 0,4247 | 1,3691 | 1,625 |
| | | 3 | 15,2791 | 15,2671 | 20,7636 | 21,504 |
| | | 3 | 9,7727 | 10,515 | 18,4486 | 19,7704 |
| | | 4,5 | 0,9313 | 0,7064 | 0,4509 | 0,2577 |
| | | 6 | 11,5049 | 11,8282 | 19,2301 | 20,1293 |
| | | 6 | 7,1494 | 7,782 | 13,4913 | 14,5299 |
| | | 7,5 | 0,9071 | 0,7166 | 0,6024 | 0,4259 |
| | | 9 | 8,8754 | 9,1587 | 14,6382 | 15,3239 |
| | | 9 | 2,5673 | 3,3177 | 7,5023 | 8,4038 |
| | | 10,5 | 0,8466 | 0,7082 | 0,752 | 0,59 |
| | | 12 | 4,2211 | 4,7186 | 8,9969 | 9,5759 |

| | | | | | | |
|-------------|----------|------|---------|---------|---------|---------|
| Meuble (S3) | sans ISS | 0 | 17,6036 | 17,4506 | 20,4483 | 20,9461 |
| | | 1,5 | 2,8939 | 2,4791 | 1,8794 | 1,3906 |
| | | 3 | 11,8245 | 12,4983 | 16,6953 | 18,1707 |
| | | 3 | 10,6817 | 11,1819 | 17,1098 | 18,5285 |
| | | 4,5 | 0,5457 | 0,4292 | 0,3278 | 0,2254 |
| | | 6 | 11,5819 | 11,9057 | 17,5994 | 18,8115 |
| | | 6 | 7,5228 | 7,9485 | 12,4934 | 13,722 |
| | | 7,5 | 0,8701 | 0,7063 | 0,5984 | 0,4336 |
| | | 9 | 9,1523 | 9,2912 | 13,6043 | 14,5111 |
| | | 9 | 3,1288 | 3,4465 | 6,376 | 7,3848 |
| | | 10,5 | 0,8877 | 0,7382 | 0,6803 | 0,5414 |
| | | 12 | 4,8667 | 4,9027 | 7,7162 | 8,4521 |
| | avec ISS | 0 | 14,0138 | 14,0773 | 14,8706 | 15,222 |
| | | 1,5 | 2,6284 | 2,4977 | 5,2791 | 5,0088 |
| | | 3 | 19,2527 | 19,0397 | 25,4268 | 25,2251 |
| | | 3 | 8,5325 | 10,1817 | 19,8169 | 20,7234 |
| | | 4,5 | 1,3964 | 1,0334 | 0,6124 | 0,3162 |
| | | 6 | 11,2367 | 12,1636 | 20,961 | 21,2375 |
| | | 6 | 6,6639 | 7,9334 | 14,4473 | 15,0101 |
| | | 7,5 | 0,9268 | 0,7339 | 0,6194 | 0,439 |
| | | 9 | 8,4565 | 9,3569 | 15,65 | 15,8474 |
| | | 9 | 1,987 | 3,3883 | 8,543 | 8,9133 |
| | | 10,5 | 0,7949 | 0,7163 | 0,8198 | 0,6164 |
| | | 12 | 3,5351 | 4,8088 | 10,1782 | 10,1414 |

| | | | | | | |
|------------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Très meuble (S4) | sans ISS | 0 | 18,1942 | 17,4506 | 20,4483 | 20,9461 |
| | | 1,5 | 2,9834 | 2,4791 | 1,8794 | 1,3906 |
| | | 3 | 12,2369 | 12,4983 | 16,6953 | 18,1707 |
| | | 3 | 11,0459 | 11,1819 | 17,1098 | 18,5285 |
| | | 4,5 | 0,568 | 0,4292 | 0,3278 | 0,2254 |
| | | 6 | 11,976 | 11,9057 | 17,5994 | 18,8115 |
| | | 6 | 7,7926 | 7,9485 | 12,4934 | 13,722 |
| | | 7,5 | 0,898 | 0,7063 | 0,5984 | 0,4336 |
| | | 9 | 9,4685 | 9,2912 | 13,6043 | 14,5111 |
| | | 9 | 3,2575 | 3,4465 | 6,376 | 7,3848 |
| | | 10,5 | 0,9164 | 0,7382 | 0,6803 | 0,5414 |
| | | 12 | 5,0499 | 4,9027 | 7,7162 | 8,4521 |
| | | avec ISS | 0 | 8,2356 | 9,0345 | 8,25 |
| | 1,5 | | 8,8066 | 7,6297 | 11,8283 | 10,1991 |
| | 3 | | 25,8407 | 24,2462 | 31,9017 | 29,5141 |
| | 3 | | 6,1676 | 8,9453 | 20,8969 | 20,7528 |
| | 4,5 | | 2,1905 | 1,5289 | 0,8793 | 0,4167 |
| | 6 | | 10,491 | 11,8978 | 22,6173 | 21,4869 |
| | 6 | | 5,9134 | 7,8059 | 15,1985 | 14,7947 |
| | 7,5 | | 0,9094 | 0,7051 | 0,6254 | 0,441 |
| | 9 | | 7,7017 | 9,1763 | 16,4348 | 15,645 |
| | 9 | | 1,2467 | 3,3847 | 9,6447 | 9,0763 |
| | 10,5 | | 0,7088 | 0,6966 | 0,8795 | 0,6131 |
| | 12 | 2,6133 | 4,7668 | 11,4024 | 10,2994 | |

تذکرہ
معارف



پیشانی

پیشانی و پیشانی



CHAPITRE : 01

Notion de base sur les séismes

CHAPITRE : 02

Effets du séisme sur les bâtiments

CHAPITRE : 03

Interaction sol structure

CHAPITRE : 04

Modélisation de l'interaction sol structure

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

CONCLUSION

ET

RECOMMENDATIONS