



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Guerguer Lamine & Bouchelaghem Mohammed

DOMAINE : Sciences et Technique

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : Structures

Thème

**Etude de l'influence de l'interaction sol-
structure sur la réponse sismique des
bâtiments en béton armé**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr.Benabed Benchaa	Pr	Président
Mme.Benmiloud Meriem	MAA	Examinatrice
Mme.Gotteicha Messaouda	MAA	Rapporteur
Mme.Bellakehal Hizia	MCA	Co-rapporteur

Promotion : Juin-2021

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier ALLAH, le tout puissant de nous avoir donné courage et volonté pour accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à présenter nos vifs remerciements à nos promotrices Mme Gotteicha Messaouda et Melle Bellakehal Hizia pour leurs patiences, leurs remarques et conseils, leurs disponibilité et bienveillance.

Qu'elles trouvent ici le témoignage de notre profonde gratitude.

Nous tenons à remercier également les membres de jury Mr Benabed Benchaa et Mme Benmiloud Meriem pour avoir Accepté d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de nos enseignants de la spécialité structures qui ont contribué à notre formation.

Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à vous tous

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon très cher père qui m'ont

Toujours soutenus durant toute ma vie,

que Dieu le tout puissant les protèges et les gardes.

Mes sœurs : Yasmina, Aïcha,

Mes amis à la cité universitaire : Mustapha, Nadir,

Aoumeur, Taha,

A toute la famille BOUCHELAGHEM

A toute la promotion 2021

Mohammed

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail à :

Ma très chère mère et mon très cher père qui m'ont

Toujours soutenus durant toute ma vie

que Dieu le tout puissant les protèges et les gardes.

Mes frères : Youcef, Salah, Fatima,

Souhila, Hamza, Rania

Mes amis à la cite universitaire : Zaki, Bahmed,

Tamer, A toute la famille Guerguer

A toute la promotion 2021

Lamine

Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Table des matières.....	IV
Liste des tableaux.....	VIII
Liste des figures.....	XI
Table des Notations.....	XV
الخلاصة	XVII
Résumé.....	XVIII
Abstract.....	XIX
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Chapitre I

Comportement sismique des structures

I.1. Introduction	4
I.2. Définition et origine de tremblement de terre	4
I.2.1. Foyer et épicentre.....	4
I.3. Caractéristiques d'un séisme	5
Accélérogramme.	5
Spectre de réponse :.....	5
I.4. Nature et mode de propagation des ondes sismiques.....	6
I.4.1. Ondes de volume.....	6
I.4.2. Ondes de surface	8
I.5. Echelles d'évaluation d'un séisme	9
I.5.1. Echelle de Marcellin	9
I.5.2. Echelle De Richter	9
I.6. Critères de classification	9
1.6.1. Zonage du risque sismique (aléas sismiques).....	9

I.6.2. Classification des ouvrages selon leur importance	10
I.6.3. Classification des sites	11
I.7. Nature et types des structures et leur comportement.....	12
I.7.1. Structures parfaitement raides ($T = 0$).....	12
I.7.2. Structures parfaitement souples ($T = \infty$)	13
I.8. Comportement dynamique des ouvrages	13
I.9. Effet des séismes sur les bâtiments	15
I.9.1. Effets directs.....	15
I.9.2. Effets indirects.....	20
I.10. Conclusion	21

Chapitre II

Interaction sol-structure (ISS)

II.1. Introduction.....	23
II.2. Effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures	23
II.3. Composantes de l'interaction.....	23
II.3.1 Interaction cinématique.....	24
II.3.2. Interaction inertielle.....	24
II.4. Mouvement du sol en champ libre.....	24
II.5. Méthodes d'analyse de l'Interaction Sol Structure	25
II.5.1 Méthodes globales	25
II.5.2. Méthode de sous-structure	27
II.5.3. Méthodes hybrides.....	29
II.5.4. Modélisation du sol par un système de ressort amortis	30
II.5.4.1 Méthode de Newmark-Rosenblueth	31
II.5.4.2 Méthode de Deleuze	32
II.6. Etat de l'art de l'ISS.....	33
II.7. Conclusion	34

Chapitre III

Modélisation de l'interaction sol structure

III.1. Introduction	36
III.2. Modélisation de la structure	36
III.3. Modélisation du sol	36
III.4. Présentation et caractéristiques des structures	37
III.4.1. Présentation des structures	37
III.4.2. Caractéristiques géométriques.....	37
III.5. Dimensionnement des structures	41
III.5.1. Planchers Les planchers sont réalisés en corps creux (16+ 4).....	41
III.5.2. Poteaux et Poutres	41
III.5.3. Fondations	41
III.6. Charges appliquées III.6.1. Charges gravitaires	43
III.6.2. Charges sismiques	43
III.7. Modélisation.....	45

Chapitre IV

Résultats numériques et étude paramétrique

IV.1. Introduction.....	50
IV.2. Influence de l'interaction sol-structure sur la période fondamentale	50
IV.3. Influence de l'interaction sol-structure sur les déplacements relatifs	58
IV.4. Influence de l'interaction sol-structure sur les déplacements absolus.....	66
IV.5. Influence de l'interaction sol-structure sur les efforts tranchants à la base.....	73
IV.6. Influence de l'interaction sol-structure sur les moments aux appuis des poteaux.....	80
IV.7. Influence de l'interaction sol-structure sur les moments aux appuis des poutres	85
IV.8. Influence de l'ISS sur le déplacement des structures contreventées	91
IV.8.1. Déplacement relative.....	92

IV.8.2. Effort tranchant à la base.....	93
Conclusion générale	94
RECOMMANDATIONS	95
Références bibliographiques	96

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Comportement sismique des structures

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

Chapitre II

Interaction sol-structure (ISS)

Tableau II. 1 : Les raideurs équivalentes pour un milieu semi –infini.....	31
Tableau II. 2 : Les coefficients de raideur en fonction des coefficients de transmittance f. ..	32
Tableau II. 3 : Rayons équivalents pour une fondation rectangulaire de dimensions a et b. .	33

Chapitre III

Modélisation de l'interaction sol structure

Tableau III. 1 : Caractéristiques géométriques.....	37
Tableau III. 2 : Dimensions des semelles.....	42
Tableau III. 3 : Les périodes caractéristiques des sites.....	43
Tableau III. 4 : Raideurs équivalentes pour un milieu semi –infini.....	46
Tableau III. 5 : Caractéristiques des différentes catégories de site.....	47
Tableau III. 6 : Raideurs de ressorts du sol utilisés.....	47

Chapitre IV

Résultats numériques et étude paramétrique

Tableau IV. 1 : Périodes propres calculées sans ISS (2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N).....	50
Tableau IV. 2 : Périodes propres avec ISS de site S1.....	51

Tableau IV.3 : Comparaison de la période fondamentale des structures avec et sans ISS de site S1.	52
Tableau IV. 4 :Périodes propres avec ISS de site S2.	53
Tableau IV. 5 : Comparaison de la période fondamentale des structures avec et sans ISS de site S2.	53
Tableau IV. 6 :Périodes propres avec ISS de site S3.	54
Tableau IV.7 : Comparaison de la période fondamentale avec et sans ISS de site S3.....	55
Tableau IV. 8 :Périodes propres avec ISS de site S4.	56
Tableau IV. 9 : Comparaison de la période fondamentale avec et sans ISS de site S4.....	56
Tableau IV. 10 :Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S1.....	59
Tableau IV. 11 :Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S2.....	60
Tableau IV. 12 : Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S3.....	61
Tableau IV. 13 : Déplacement relatif avec et sans ISS de Site S4.....	62
Tableau IV. 14 :Déplacements absolus avec et sans ISS de Site S1.....	66
Tableau IV. 15 : Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S2.....	67
Tableau IV. 16 :Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S3.....	68
Tableau IV. 17 : Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S4.....	69
Tableau IV. 18 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS ; Site 1.....	73
Tableau IV. 19 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S2.....	74
Tableau IV. 20 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S3.....	75
Tableau IV. 21 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S4.....	76
Tableau IV. 22 : Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S1.	80
Tableau IV. 23 : Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S2.	81
Tableau IV. 24 :Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S3.	82
Tableau IV. 25 : Moment aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S4.	83
Tableau IV. 26 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S1.	86
Tableau IV. 27 :Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S2.	87
Tableau IV. 28 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S3.	88

Tableau IV. 29 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S4.
..... 89

Tableau IV. 30 :Déplacements relatives de la structures 10N contreventée et non
contreventée, avec et sans ISS _ Site S4. 92

Tableau IV. 31 : Effort tranchant à la base de la structures 10N contreventée et non
contreventée, avec et sans ISS _ Site S4. 93

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Comportement sismique des structures

Figure I. 1: L'origine et la distribution des ondes sismiques.	5
Figure I. 2: Mouvement des particules au passage d'une onde P.....	7
Figure I. 3 : Mouvement des particules au passage d'une onde S.....	7
Figure I. 4 : Mouvement des particules au passage d'une onde de love.	8
Figure I. 5: Mouvement des particules au passage d'une onde de Rayleigh.....	9
Figure I. 6: Zone sismique du territoire national.	10
Figure I. 7 : Types de structures a) Oscillateur parfaitement raide ; b) Oscillateur parfaitement souple.	13
Figure I. 8 : Comportement des structures sous l'action sismique : a)réponse en cisaillement (murs porteurs), b) réponse en flexion (portiques).....	14
Figure I. 9 : Réponses d'un ouvrage rigide aux mouvements provoqués par l'action sismique.	14
Figure I. 10: Martèlement et effondrement.	16
Figure I. 11 : Effondrement d'un bâtiment sous forme d'une galette.....	16
Figure I. 12 : Fissures en croix.....	17
Figure I. 13: Etage souple.....	18
Figure I. 14 : Dommages dus à l'effet de poteau court (séismes d'El Asnam, Algérie 1980).	19
Figure I. 15: déficient de l'armature transversale(a) et Flambage de l'armature longitudinale a la base de voile(b).....	19
Figure I. 16 : Liquéfaction des sols.	20
Figure I. 17: Glissement de terre.	21

Chapitre II

Interaction sol-structure (ISS)

Figure II. 1: Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS. (13).....	25
Figure II. 2 : Modélisation de l'ISS par la méthode globale. [10]	26
Figure II. 3 : schématisation de la méthode sous-structures.	29

Figure II. 4: méthode hybride. [15].....	30
Figure II. 5: Abaques donnant les coefficients de Newmark β_z , β_X . yet β_φ	32

Chapitre III

Modélisation de l'interaction sol structure

Figure III. 1: Vue en plan.....	38
Figure III. 2: Vue en élévation de la structure 2N.	38
Figure III. 3: Vue en élévation de la structure 4N.	39
Figure III. 4: Vue en élévation de la structure 6N.	39
Figure III. 5: Vue en élévation de structure 8N.	40
Figure III. 6: Vue en élévation de la structure 10N.	40
Figure III. 7: Planchers en corps creux (16+ 4).	41
Figure III. 8 : Dimensions des sections de béton des poutres et des poteaux des structures.	41
Figure III. 9: Disposition des semelles dans les structures.	42
Figure III. 10 : Vue en 3d de structure 6N sans prise en compte de l'ISS.....	45
Figure III. 11: Modélisation de structure 6N avec prise en compte de l'ISS.....	48

Chapitre IV

Résultats numériques et étude paramétrique

Figure IV. 1 : Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S1.	52
Figure IV. 2 : Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S2.	54
Figure IV. 3: Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S3.	55
Figure IV. 4 : Variation de la période fondamentale en fonction de niveaux d'étage_ site S4.	57
Figure IV. 5: Variation de l'écart entre les périodes fondamentales (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.	57
Figure IV. 6: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_ site S1.....	59
Figure IV. 7: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_ site S2.....	60

Figure IV. 8: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.....	61
Figure IV. 9: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.....	63
Figure IV.10: Variation de déplacement relative en fonction de type de site _ Sans ISS.	64
Figure IV. 11: Variation de déplacement relative en fonction de type de site _ Avec ISS. ...	64
Figure IV. 12 : Variation de l'écart entre les déplacements relatifs (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.	65
Figure IV. 13: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.....	67
Figure IV. 14 : Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.....	68
Figure IV. 15: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.....	69
Figure IV. 16: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.....	70
Figure IV.17: Variation de déplacement absolu en fonction de type de site _ Sans ISS.....	71
Figure IV. 18 : Variation de déplacement absolu en fonction de type de site _ Avec ISS.....	71
Figure IV.19: Variation de l'écart entre les déplacements absolus (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.	72
Figure IV.20 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.....	74
Figure IV. 21 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.....	75
Figure IV.22: Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.....	76
Figure IV. 23 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.....	77
Figure IV. 24 : Variation de l'effort tranchant à la base en fonction de type de site _ Sans ISS.	78
Figure IV. 25 : Variation de l'effort tranchant à la base en fonction de type de site _ Avec ISS.	78
Figure IV. 26: Variation de l'écart entre les efforts tranchant à la base (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.	79

Figure IV. 27 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.....	81
Figure IV. 28 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.....	82
Figure IV. 29 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.....	83
Figure IV. 30 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.....	84
Figure IV. 31 : Variation de l'écart entre les moments maximum aux appuis de poteaux (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.....	85
Figure IV. 32 : Variation des moments appuis des poutres (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.....	87
Figure IV. 33 : Variation des moments aux appuis des poutres (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.....	88
Figure IV. 34 : Variation des moments appuis (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.....	89
Figure IV. 35 : Variation des moments appuis (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.....	90
Figure IV. 36 : Variation de l'écart entre les moments maximum aux appuis de poteaux (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.....	91
Figure IV. 37 : Disposition des voiles des structures avec et sans ISS.	92

LISTE DES NOTATIONS

A : Aire de la fondation superficielle carrée, 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.

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.

P : Les ondes primaire.

S : Les ondes secondaire.

Q : Facteur de qualité.

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.

V_s: Vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

ζ: Pourcentage d'amortissement critique.

β_z, β_{x,y}, β_θ :Donnés par des abaques.

η: Correction d'amortissement.

ν : Coefficient de poisson.

ρ : Masse volumique du sol.

a₀ : Paramètre sans dimensions dépend de la fréquence.

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

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

RPA 99: Code parasismique algérien.

ISS: Interaction-sol-structure.

IC : Interaction cinématique.

II : Interaction inertielle.

الخلاصة

ترتبط الاستجابة الزلزالية للهياكل بالحركات الزلزالية للأرض والخصائص الميكانيكية والفيزيائية للهياكل والأرضية، ولذلك فأن هناك حتما تأثير متبادل بين الهيكل والبيئة الخارجية. تكمن الإشكالية هنا في كيفية تحليل هذا التفاعل بين الأرضية والبناء ومدى تأثيره على الاستجابة الديناميكية للهياكل.

يتضمن هذا العمل دراسةً حول التفاعل أرضية بناء على السلوك الزلزالي للهياكل من نوعية البنايات. تم نمذجة التربة بواسطة نوابض. يوضح هذه الدراسة تحليل الاستجابة الزلزالية للهياكل، على العناصر التالية: الدور الأساسي، الإزاحة، العزم وقوة القص للحالتين (مع وبدون التفاعل) أهمية الأخذ بالاعتبار لهذه الظاهرة في مرحلة تصميم المشروع وذلك حسب الأنواع المختلفة من التربة حسب ما أوصت به المقاييس المعمول بها.

الكلمات المفتاحية: تفاعل بناية الأرضية، الزلزال، أطيف الاستجابة، النمذجة، الروبوت

Résumé

La réponse sismique d'une structure est liée aux mouvements sismiques 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 complexité du problème d'interaction sol structure réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments, le sol et la structure. Le présent travail comporte une analyse numérique de l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des structures de type bâtiments. Le sol est modélisé à l'aide des éléments de ressorts.

L'analyse de la réponse sismique des structures à savoir la période fondamentale, le déplacement, 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 –clés : Interaction sol structure, séisme, spectres de réponse, Modélisation, Robot.

Abstract

The seismic response of a structure is related to the seismic motions of the ground and to the mechanical and physical properties of the structure and the soil. Therefore, there is interaction between the structure and the external environment. The complexity of the soil-structure interaction problem consists in the integration and coupling of the two elements, soil and structure. This work involves a numerical analysis of the effect of the soil-structure interaction on the seismic behavior of building-type structures. The soil is modeled using the spring elements.

The analysis of the seismic response of the structures, namely the fundamental period, the displacement, the moment and the evolution of the shear force developed at the base of the structures with and without interaction shows the importance of taking this phenomenon into account at the project design stage for different types of soil as recommended by the current regulations.

Keywords: Soil structure interaction, earthquake, response spectrum, Modeling, Robot.

INTRODUCTION GENERALE

Les conséquences catastrophiques de plusieurs récents séismes dans différentes régions du monde ont posé un problème sérieux aux ingénieurs pour mieux cerner le comportement sismique des structures. L'analyse sismique d'une structure tenant compte des propriétés locales du site, diffère de celle considérée encastree à sa base. De ce fait, il est particulièrement important de considérer l'interaction sol structure (ISS) dans les zones sismiques où la réponse dynamique des sols peut changer la réponse des structures soumises à l'excitation sismique.

Le phénomène d'interaction sol – structure est complexe, il correspond à une perturbation du mouvement incidente sous l'effet du mouvement propre de la structure, d'où il résulte que le mouvement de l'interface de contact sol – structure n'est pas le mouvement dit de champ libre. 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, 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.

La réponse sismique des structures des bâtiments dépend de la nature du mouvement du sol, des propriétés mécaniques et physiques de la structure et de celles du sol. Il y' a donc interaction entre la structure et le milieu extérieur. La conception du bâtiment en zone sismique menée avec l'hypothèse d'encastrement à la base néglige la flexibilité du sol qui induit une augmentation de la période fondamentale de la structure (**Biekek et Stewart et al1999**). En conséquence, l'interaction sol structure peu avoir un effet nuisible sur la réponse de structure. **Gazets et al** ont montré que l'augmentation de la période fondamentale de la structure ne conduit pas toujours à une atténuation de l'amplitude sismique. De ce fait, la simplification de l'effet de l'ISS dans les codes sismiques peut conduire à une mauvaise conception des structures. **Shakib et al (2004)** ont montré que l'ISS réduit le déplacement latéral et la torsion des bâtiments asymétriques. [1]

La période propre fondamentale des structures de type bâtiment constitue un paramètre majeur dans la conception et le dimensionnement de structures en zone sismique. Pour cela, les codes parasismiques nous donnent la possibilité d'estimer la valeur de la période

fondamentale pour les différentes structures à l'aide des formules empiriques qui sont développées à partir des données statistiques.

En fait, en raison de progrès rapide des outils informatiques, les méthodes de simulation numérique sont largement utilisées dans l'étude du phénomène d'ISS. L'objectif de la présente étude est d'analyser numériquement l'influence de l'interaction sol-fondation-structure sur la réponse des structures contreventées par des portiques auto stables. La réponse de la structure étudiée est évaluée dans un premier temps en considérant l'hypothèse de l'encastrement parfait à la base (modèle classique). Dans un deuxième modèle (modèle sol-structure), nous considérons le couplage sol-structure en utilisant la modélisation par des ressorts pour la réaction du sol.

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

Le premier chapitre présente l'étude de comportement dynamique des structures, il comprend quelques généralités sur les séismes et leurs effets sur les bâtiments.

L'interaction sol-structure fait l'objet du deuxième chapitre. Dans ce chapitre on montre l'importance de l'interaction sol-structure, la formulation, la modélisation d'un problème d'interaction et les méthodes de prise en compte de ce problème et l'importance de l'impédance des fondations.

Le troisième chapitre regroupe tous les données de problème étudiée à savoir les caractéristiques physique et mécanique du sol, et les propriétés géométriques des structures.

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 Robot qui nous permet de déterminer l'effort tranchant, les déplacements, et les moments.

Enfin le travail se termine par une conclusion générale résumant tous les résultats obtenus ainsi que des recommandations pour les futures recherches.

CHAPITRE I

Comportement sismique des structures

I.1. Introduction

La sismologie est la science des tremblements de terre qui consiste à détecter et à analyser les vibrations naturelles du sol et par extension, les signaux sismiques générés artificiellement. Elle a contribué de manière vitale à la prévision des tremblements de terre, et à la compréhension de la tectonique des plaques.

La connaissance actuelle des phénomènes est telle qu'il est difficile de prédire l'instant où un séisme se produira en un lieu donné. Cependant, il est possible d'identifier les zones à haut risque sismique, et d'y construire en conséquence.

Ce chapitre met l'accent sur le phénomène sismique et l'importance des zones sujettes à des séismes afin de parvenir à une démarche cohérente pour la conception d'une structure stable.

I.2. Définition et origine de tremblement de terre

Un tremblement de terre 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. Le niveau d'amplification dépend essentiellement de la période de la structure et de la nature du sol.

I.2.1. Foyer et épicentre

Les ondes sismiques semblent provenir d'une région déterminée appelée foyer ou hypocentre du séisme. Le point de la surface du sol situé à la verticale du foyer est son épicentre. La distance entre ce point et l'endroit d'enregistrement de l'accélérogramme est appelée distance épacentrale. [2] La figure I.1 présente un exemple d'enregistrement d'un séisme.

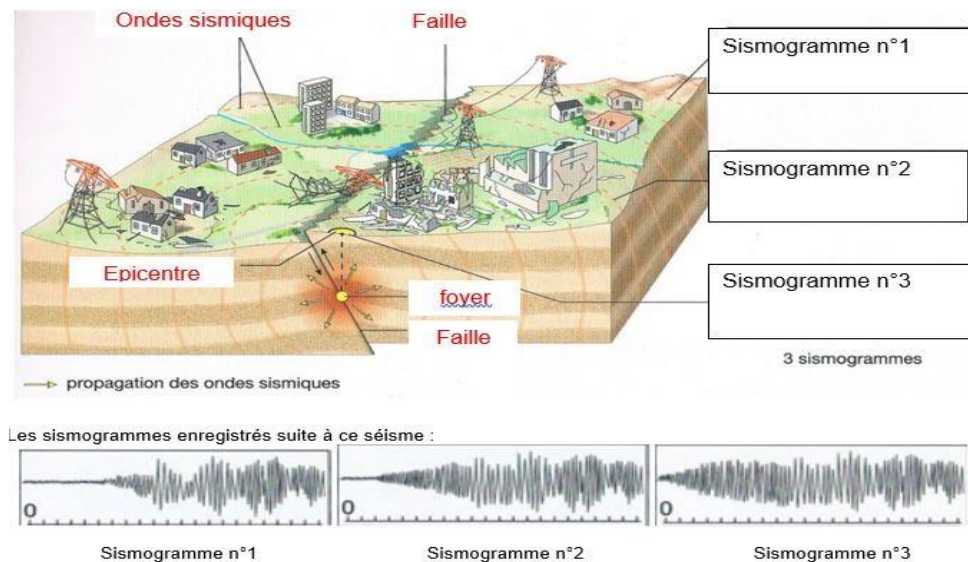


Figure I. 1: L'origine et la distribution des ondes sismiques.

I.3. Caractéristiques d'un séisme

L'intensité, la magnitude ou les accélérations maximales du sol, ne sont pas suffisantes pour estimer les risques pour une structure en béton par exemple. En effet, l'estimation de la réponse d'une structure nécessite une connaissance plus précise du mouvement du sol en ce qui concerne la durée et le contenu fréquentiel.

Deux méthodes permettent de caractériser le mouvement du sol :

Accélérogramme : L'accélérogramme représente l'évolution en fonction du temps de l'accélération du sol.

Spectre de réponse : la pratique actuelle la plus répandue consiste à définir le chargement sismique par un spectre de réponse. Les spectres caractérisent les séismes beaucoup plus clairement que les accélérogrammes.

L'utilisation d'un spectre de réponse s'effectue différemment selon qu'il s'agit d'un spectre de déplacement ou d'un spectre d'accélération. La définition de l'action sismique par un spectre de réponse est une méthode particulièrement adaptée pour couvrir-synthétiser, par une enveloppe couvrante tout le domaine des fréquences, les efforts de plusieurs accélérogrammes aux contenus très différents :

- Prendre en compte la nature du terrain situé sous la construction ;
- Tenir compte de l'intensité probable du séisme, du niveau de protection recherché et ceci en fonction de l'importance du bâtiment étudié, ce qui revient à caler le spectre au niveau de l'action sismique. [2]

I.4. 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. En un point, celle-ci est normale au front d'onde ; on l'appelle rai sismique. Le front forme idéalement une surface sphérique. Et qui traversent le globe de part en part, il s'agit d'ondes de volume. On peut distinguer deux principaux types d'ondes sismiques. [3]

I.4.1. 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 (figure I.2). 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.

- a) 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.
- b) Périodes : de l'ordre de la seconde (de la fraction de seconde à quelques secondes).
- c) Longueur d'onde : de l'ordre de 4 à 6 km.

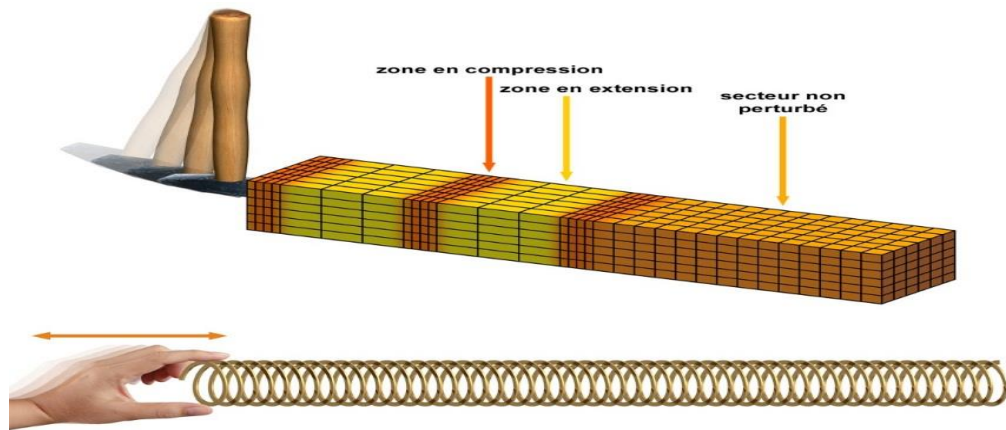


Figure I. 2: Mouvement des particules au passage d'une onde P.

- **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 I.3).

a) Vitesse : 60% de celle des ondes P.

b) Périodes : de l'ordre de la seconde (de la fraction de seconde à quelques secondes).

c) Longueur d'onde : de l'ordre de 4 à 6 km.

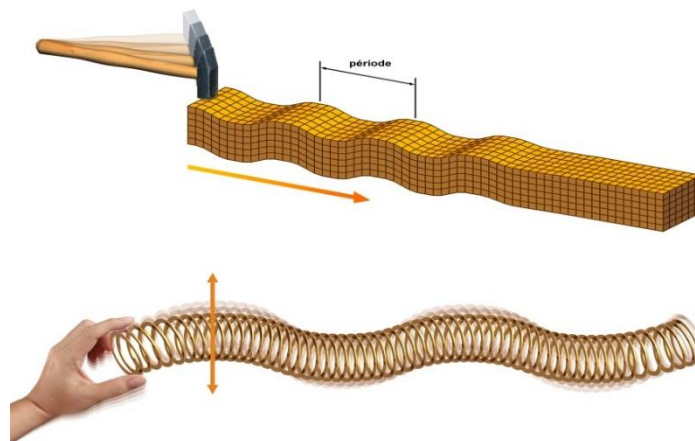


Figure I. 3 : Mouvement des particules au passage d'une onde S.

I.4.2. 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. Ils sont caractérisés par :

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

Leur contenu fréquentiel ne concerne que certaines structures, leur influence sur les constructions courantes est négligeable. On distingue : les ondes de love et les ondes de Rayleigh :

- **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.

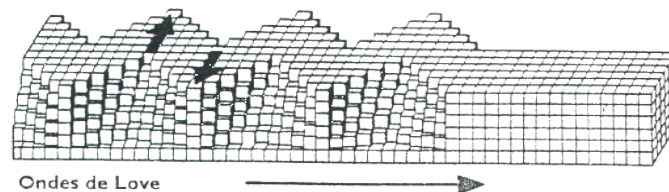


Figure I. 4 : Mouvement des particules au passage d'une onde de love.

- **Ondes sismiques de 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. [3]

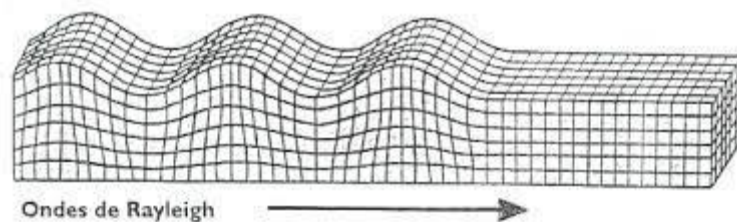


Figure I. 5: Mouvement des particules au passage d'une onde de Rayleigh.

I.5. Echelles d'évaluation d'un séisme

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

I.5.1. Echelle de Marcellin

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.5.2. 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.6. Critères de classification

Les critères de classifications selon le « RPA 99, version 2003 » [5], Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique sont : les zones sismiques, l'importance des ouvrages, les sites, les systèmes de contreventement et la régularité des ouvrages.

1.6.1. 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.

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

Groupe	Les Zones				Classification des ouvrages selon leur importance
	I	IIa	IIb	III	
1A	0,15	0,25	0,3	0,4	ouvrages d'importance vitale: sécurité- hopitaux
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

I.6.3. Classification des sites

Les sites sont classés en quatre (04) catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent (Tableau I.2). [5]

- **Catégorie S1 (site rocheux) :** Roche ou autre formation géologique caractérisée par une vitesse moyenne d'onde de cisaillement (v_s) ≥ 800 m/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 $v_s \geq 400$ 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 $v_s \geq 200$ 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.

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

Site	Type de sol	qc (mpa)	PL (Mpa)	Ep (Mpa)	qu (Mpa)	Gs (MPa)
S1	Rocheux	-	>5	>100	>10	35-90
S2	Ferme	>15	>2	>20	>0.4	7-29
S3	Meuble	1.5-15	01-02	05-20	0,1-0.4	1-7
S4	Très Meuble	<1.5	<1	<5	<0.1	0.3-1.5

Tel que :

qc : résistance de pointe pénitrométrique.

PL : pression limite pressiométrique.

Ep : module pressiométrique.

qu : contrainte ultime.

Vs : vitesse des ondes sismiques de cisaillement.

Gs : Module de cisaillement dynamique.

I.7. Nature et types des structures et leur comportement

On peut envisager trois types de structures liées au sol (figure I.7):

I.7.1. Structures parfaitement raides ($T = 0$)

Chaque point de la structure a le même déplacement absolu que le sol, donc la même accélération. Le déplacement relatif de la masse par rapport au sol, quel que soit l'amortissement de la structure, est nul : la réponse de l'oscillateur est quasi statique $d(t) = 0$. En conséquence, une masse m attachée à cette structure lui communique une force d'inertie : $F = m \cdot \gamma(t)$.

I.7.2. Structures parfaitement souples ($T = \infty$)

Le déplacement absolu des masses de la structure en dehors de celles directement liées au sol est nul sous l'action des forces d'inertie. Le déplacement relatif $d(t)$ de la structure par rapport au sol passe par un maximum, et est opposé au déplacement absolu du sol.

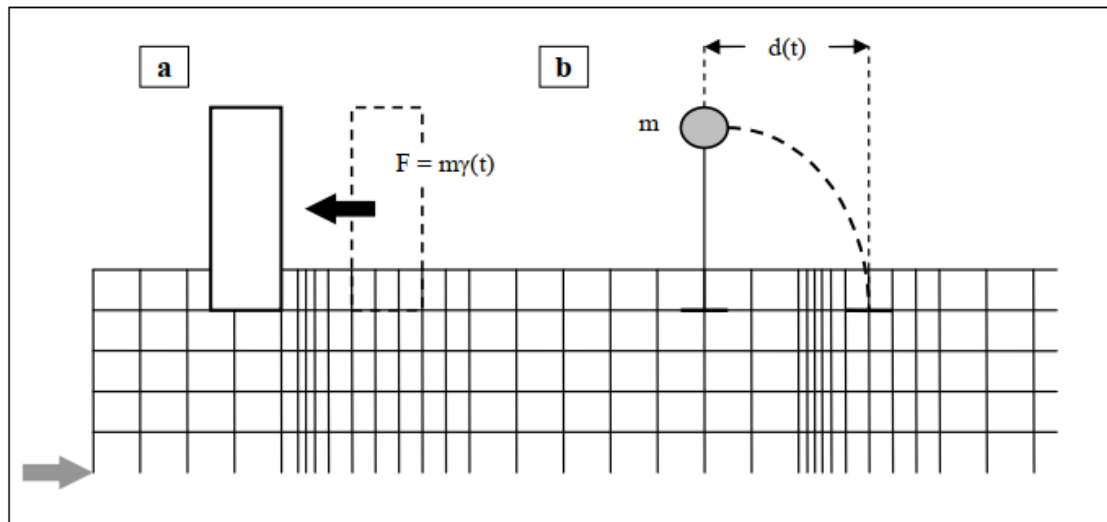


Figure I. 7 : Types de structures a) Oscillateur parfaitement raide ; b) Oscillateur parfaitement souple.

I.8. Comportement dynamique des ouvrages

Les tremblements de terre ne constituent pas une charge extérieure, ils sollicitent les bâtiments à travers les mouvements de sol. [6]

Dans les ouvrages courants les valeurs de la rigidité et de l'amortissement dépendent justement de la valeur finale de la déformation qui peut être du type « flexion » pour les portiques et / ou de type « cisaillement » pour les murs (figure I.8).

Le nombre de ces sollicitations et les périodes de leurs cycles correspondent au nombre et aux périodes des oscillations de la structure.

Pour presque la totalité des structures la valeur de la période des cycles se trouve dans l'intervalle $T= 0.2$ à 2 s.

La durée de la variation des oscillations de 0 à la valeur maximale pendant chaque cycle est $t'=\frac{T}{2} = 0.1$ à 1 s.

Les forces d'inertie qui apparaissent pendant l'action sismique dans un élément donné résultent des actions transmises par les liaisons de cet élément avec le reste de la structure.

Ces forces d'inertie ne peuvent donc être supérieures à la capacité de résistance en termes de forces de ces liaisons ; les déformations qui leur correspondent peuvent, par contre, atteindre un niveau inacceptable, qui entraîne une ruine inévitable par instabilité plastique.

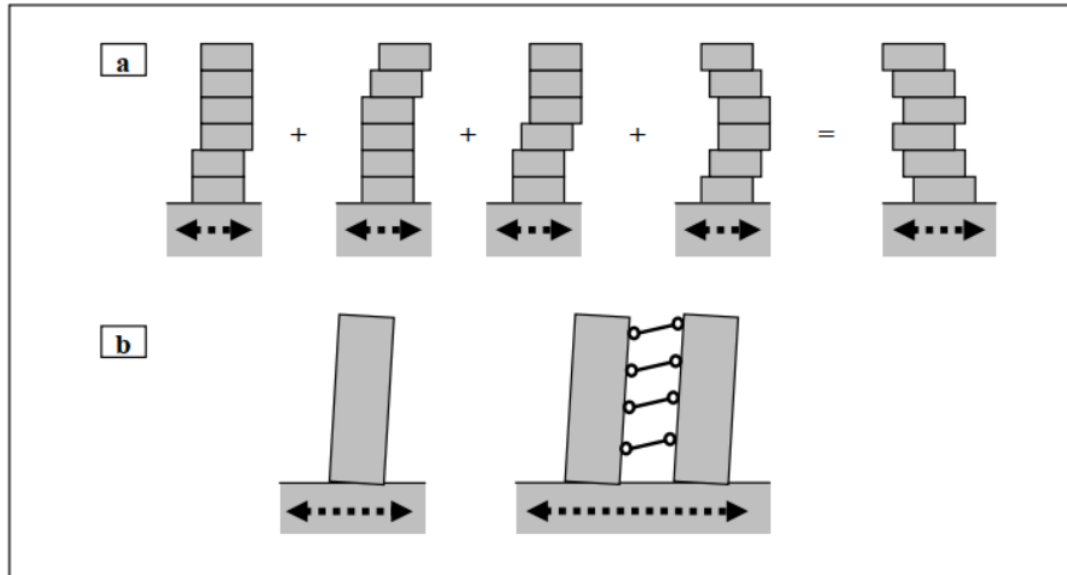


Figure I. 8 : Comportement des structures sous l'action sismique : a) réponse en cisaillement (murs porteurs), b) réponse en flexion (portiques).

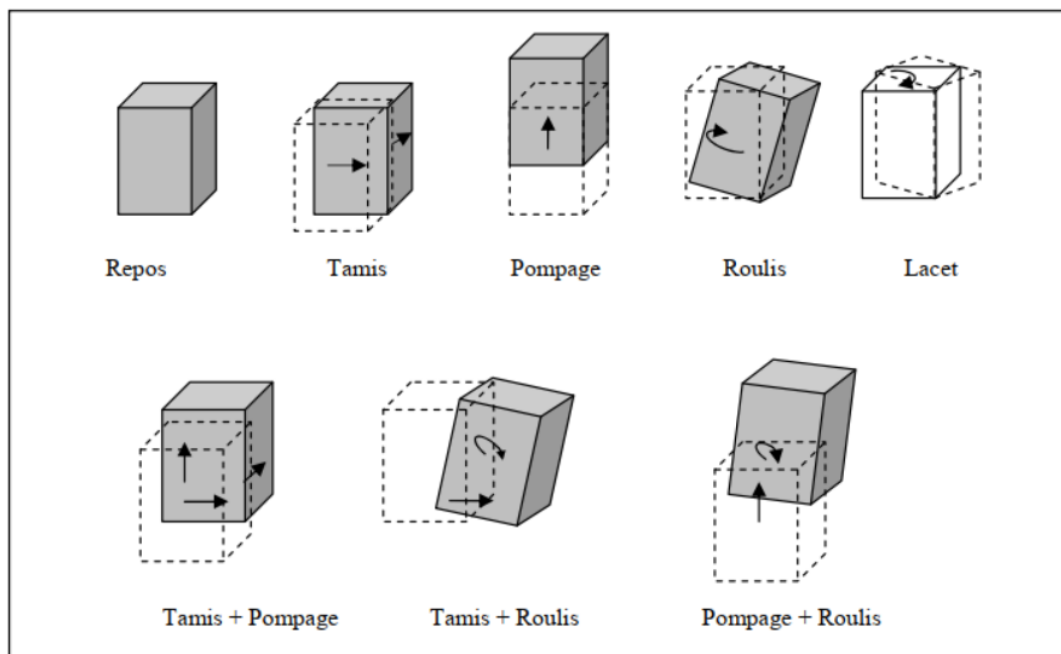


Figure I. 9 : Réponses d'un ouvrage rigide aux mouvements provoqués par l'action sismique.

I.9. Effet des séismes sur les bâtiments

Le fait qu'une construction soit détruite d'une façon ou d'une autre n'est pas l'effet du hasard. Selon la conception de la structure, nous pouvons apporter une explication aux phénomènes en cause. Il existe une grande variété de modes de ruine pour un même type de construction et cela est lié aux effets directs et indirects provoqués par les séismes.

I.9.1. 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. Toutefois, 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 séismes dans les catégories suivantes :

❖ Martèlement

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 leurs caractéristiques dynamiques différentes (fréquences fondamentales), ce qui augmente les possibilités de collision. Les dégâts engendrés par la collision entraînent souvent dans ce cas l'effondrement des bâtiments.

[7]



Figure I. 10: Martèlement et effondrement.

❖ Effondrement en galette

La stabilisation latérale de la structure est primordiale pour résister aux sollicitations sismiques, elle requiert des éléments verticaux présentant une certaine rigidité et une résistance suffisante. Cependant même dans des régions de forte sismicité, un grand nombre de bâtiments est doté d'une stabilisation latérale nettement insuffisante voire inexistante. La conséquence de cette lacune est implacable et se traduit souvent par un effondrement général de la structure (figure I.11).



Figure I. 11 : Effondrement d'un bâtiment sous forme d'une galette.

❖ Fissures en croix

Les fissures en croix dans les éléments en maçonnerie sont caractéristiques d'action sismique. Ces fissures naissent des tractions diagonales perpendiculaires à la compression principale (figure I.12) [7]. Elles montrent le caractère cyclique et la direction principalement horizontale des sollicitations sismiques. 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.



Figure I. 12 : Fissures en croix.

❖ Etage souple

Lorsqu'un niveau est significativement moins rigide que les autres (30 % de différence suffisent), il est appelé « niveau souple ». Les déformations des bâtiments provoquées par les séismes sont concentrées sur ces niveaux. Si elles deviennent importantes, ce qui se produit lors de séismes forts ou moyens, la structure ne peut les tolérer. Une conséquence fréquente est l'écrasement du niveau (figure I.13).



Figure I. 13: Etage souple.

L'effet de « niveau souple » se produit généralement en rez-de-chaussée d'immeubles, principalement pour deux raisons. D'une part, les rez-de-chaussée comportent souvent de vastes locaux sans cloisons, une façade vitrée ou de nombreuses ouvertures. D'autre part, leur hauteur est souvent plus grande que celle des autres niveaux. Or la rigidité latérale des éléments verticaux décroît proportionnellement au cube de leur hauteur. Lorsqu'on double la hauteur d'un poteau, à section égale, sa rigidité est divisée par 8. [7]

❖ Poteau courte

Les efforts horizontaux dus aux séismes se distribuent sur les éléments de structure verticaux en proportion 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 réduite par la présence d'allègements en maçonnerie, de paliers d'escalier intermédiaires, ils sont beaucoup plus rigides que les autres poteaux. Ils sont donc beaucoup plus sollicités et peuvent être détruits par cisaillement. On parle de l'effet de « poteau courte » (figure I.14).



Figure I. 14 : Dommages dus à l'effet de poteau court (séismes d'El Asnam, Algérie 1980).

❖ Dommages due aux détails d'armature

Quelques erreurs classiques récurrentes dans la conception ou la réalisation des détails d'armature provoquent des dégâts sismiques typiques qui sont les suivantes :

- 1) Espacement excessif de l'armature de stabilisation.
- 2) Recouvrement dans les zones sensibles de fortes déformations plastiques
- 3) Ancrage déficient de l'armature transversale.

Dans les éléments en béton armé, les 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 ou de fortes déformations plastiques vont se concentrer (figure I.15). Les étriers trop espacés n'empêchent pas le flambage de l'armature longitudinale à la base de voile et on dans les colonnes. [7]



Figure I. 15: déficient de l'armature transversale(a) et Flambage de l'armature longitudinale a la base de voile(b).

I.9.2. Effets indirects

❖ Liquéfaction des sols

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]

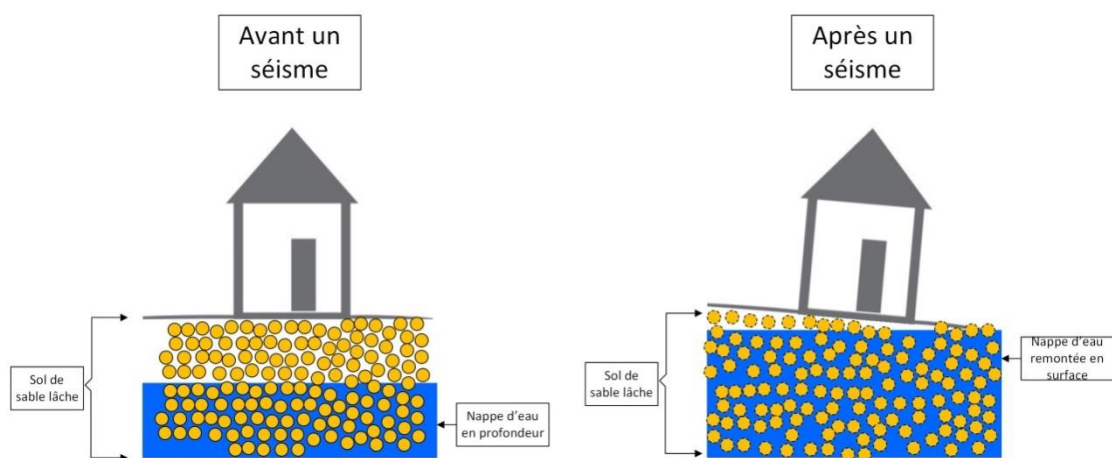


Figure I. 16 : Liquéfaction des sols.

❖ Glissements (mouvements gravitaires)

Ce sont des mouvements qui 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. [9]



Figure I. 17: Glissement de terre.

I.10. Conclusion

Dans ce chapitre on a mis l'accent sur le comportement sismique des bâtiments et sur l'importance des zones sujettes à des séismes de moyenne à grande importance. Afin de parvenir à une démarche cohérente pour la conception d'un ouvrage stable tous les problèmes de dynamique inhérents aux choix architecturaux doivent être pris en charge, soit par modification de l'architecture ou soit en trouvant des solutions au niveau de la structure.

CHAPITRE II

Interaction sol- structure (ISS)

II.1. Introduction

L'interaction sol-structure (ISS) est le phénomène étudié en génie parasismique qui fait référence à l'interaction qui survient entre la superstructure, sa fondation et le sol sur lequel elle est localisée. L'excitation sismique ressentie par la structure est fonction de la source du séisme, des effets du trajet suivi par le séisme, des effets du site local et des effets d'Interaction Sol-Structure (ISS). Le résultat des trois premiers facteurs cités ci-avant est connu par le mouvement du champ libre du sol. Alors que la réponse structurelle au mouvement du champ libre est influencée par l'ISS.

Ce chapitre illustre l'effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures en béton armé et présente les différentes méthodes d'analyses utilisées dans la modélisation d'un phénomène d'ISS tout en éclairant sur les avantages et les inconvénients de chacune.

II.2. Effet de l'ISS sur le comportement dynamique des structures

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". [10]

II.3. Composantes de l'interaction

Il existe deux types d'interaction, cinématique et inertielle dont on doit tenir en compte dans le dimensionnement de la fondation. Généralement, le terme interaction sol-structure ne désigne dans l'esprit des ingénieurs que la part inertielle ; il convient de garder à l'esprit que l'interaction cinématique peut dans certaines configurations être significative, même si parfois elle peut être négligée.

II.3.1 Interaction cinématique

Dans le mouvement de la fondation, les déformations du sol sont transmises à celle-ci et engendrent un mouvement de la superstructure. Même en l'absence de superstructure le mouvement de la fondation est différent du mouvement du champ libre du fait des différences de rigidité entre la fondation et le sol encaissant. Le champ d'ondes incident est réfléchi et diffracté par la fondation et donc modifie le mouvement total du sol au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est connu sous le nom d'interaction cinématique. Cette interaction induit un filtrage parfois significatif du mouvement sismique lors de son transfert au bâtiment, mais occasionne des rotations d'ensemble de la fondation dont les effets sur l'ouvrage doivent être étudiés. La réponse de la fondation sans superstructure au mouvement sismique incident fournit au concepteur les efforts d'inertie nécessaires au dimensionnement de l'ouvrage. Enfin, dans le cas de fondations superficielles et d'ondes à incidence verticale, il n'y a pas d'interaction cinématique et le mouvement de la fondation sans superstructure est égal au mouvement du sol sans ouvrage. [11]

II.3.2. Interaction inertielle

La définition de l'interaction inertielle réside dans le fait d'inclure la masse de la structure, ceci va induire des efforts d'inerties et de moments supplémentaires à la base de la structure et donc dans le sol, ce qui aura pour conséquence de modifier encore une fois le champ de déplacement.

Par ailleurs, le mouvement induit sur la fondation développe des oscillations de la superstructure et donc donne naissance à des forces d'inertie qui sont retransmises à la fondation sous forme de forces et de moments. [12]

II.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: [13]

- 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.

Figure II.1 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.

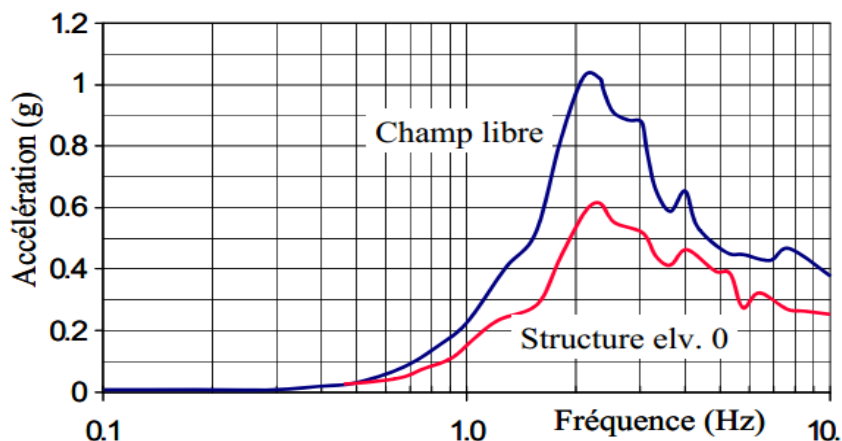


Figure II. 1: Modification du spectre de réponse en présence de l'ISS. (13)

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. [14]

II.5. Méthodes d'analyse de l'Interaction Sol Structure

Il existe trois méthodes d'analyse d'ISS ; la méthode directe (globale), la méthode de sous-structures et la méthode hybride. Dans la méthode directe, le sol et la structure sont inclus dans le même modèle et analysés comme un système complet. Dans la méthode de sous-structure, le problème d'ISS est partitionné en parties distinctes qui sont ensuite combinées pour former la solution complète. La méthode hybride présente une combinaison de la méthode directe et de la méthode de sous-structure, tout en profitant des avantages de chacune d'elles.

II.5.1 Méthodes globales

Ce sont les méthodes les plus directes mais souvent plus complexes, en particulier à cause de leur temps de calcul. On modélise le sol et la structure par des éléments finis. On

utilise directement l'accélérogramme à la roche et on obtient l'accélérogramme en champ libre, et l'accélérogramme à la base de la structure, ainsi que la réponse complète du dépôt de sol et de la structure (figure II.2).

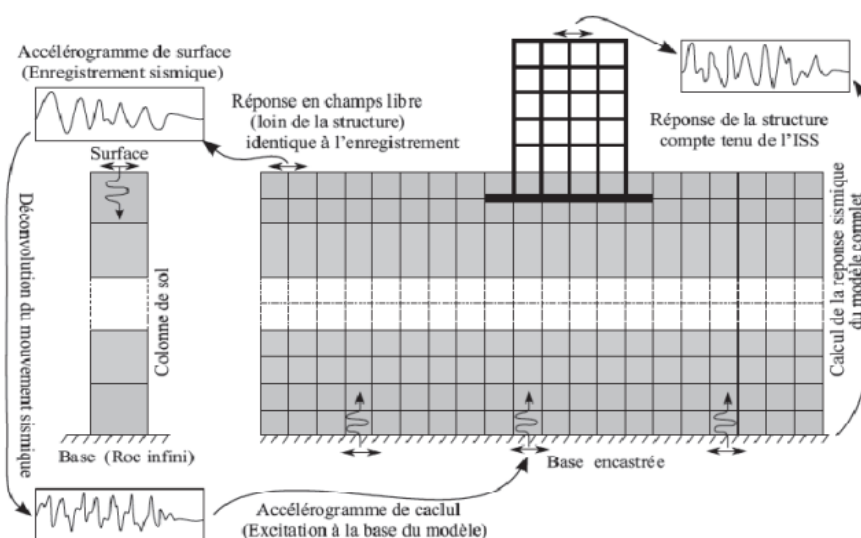


Figure II. 2 : Modélisation de l'ISS par la méthode globale. [10]

Le problème consiste à résoudre directement l'équation de la dynamique régissant le comportement du système {sol+fondation+structure} :

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\{\ddot{u}_g\}$$

Où $\{u\}$ représente le vecteur des déplacements relatifs du système par rapport à l'assise. $[M]$, $[K]$, $[C]$ sont respectivement les matrices de masse, de raideur et d'amortissement du système.

$\{I\}$ représente le vecteur d'unité, donnant la direction de la sollicitation.

La résolution directe de ce système d'équation utilise les algorithmes classiques de la méthode des éléments finis (méthode de Newton-Raphson et algorithme d'intégration temporelle de Newmark). [13]

➤ Avantages

En théorie, les méthodes globales peuvent être étendues aux cas tridimensionnels et sont susceptibles d'appréhender les comportements non linéaires dus à la loi de comportement d'un des matériaux (sol le plus souvent) ou aux interfaces sol-structure.

Si les méthodes globales sont généralement coûteuses du point de vue ordinateur, elles requièrent souvent moins de temps humain que d'autres méthodes approchées exigeant une grande réflexion,

ces méthodes globales ne font intervenir aucune notion de superposition et sont donc théoriquement adaptées aux problèmes non linéaires. [12]

➤ **Inconvénients**

Ces méthodes présentent plusieurs inconvénients et difficultés d'application qui sont :

1. Connaissance des lois de comportement des matériaux (hétérogénéité matérielle du sol ou de la superstructure) et des frontières entre les différentes parties du système.
2. Un très grand nombre d'éléments (nœuds) est nécessaire pour prendre en compte l'ISS), ce qui engendre des temps de calculs contraignants.
3. Il est difficile de définir d'une manière précise la frontière extérieure du massif du sol. En effet une onde frappant la frontière fictive extérieure du sol peut numériquement se réfléchir et venir solliciter une nouvelle fois la structure par contre en réalité cette onde part à l'infini et emmène avec elle une partie d'énergie de la structure et du sol.

II.5.2. Méthode de sous-structure

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 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.

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.

La (figure II.3) représente la schématisation de la méthode sous-structures,

- (a) est le problème de l'interaction Sol -Structure
- (b) est la décomposition du problème de l'ISS en interaction cinématique (IC) et interaction inertielle (II),
- (c) est 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. [1]

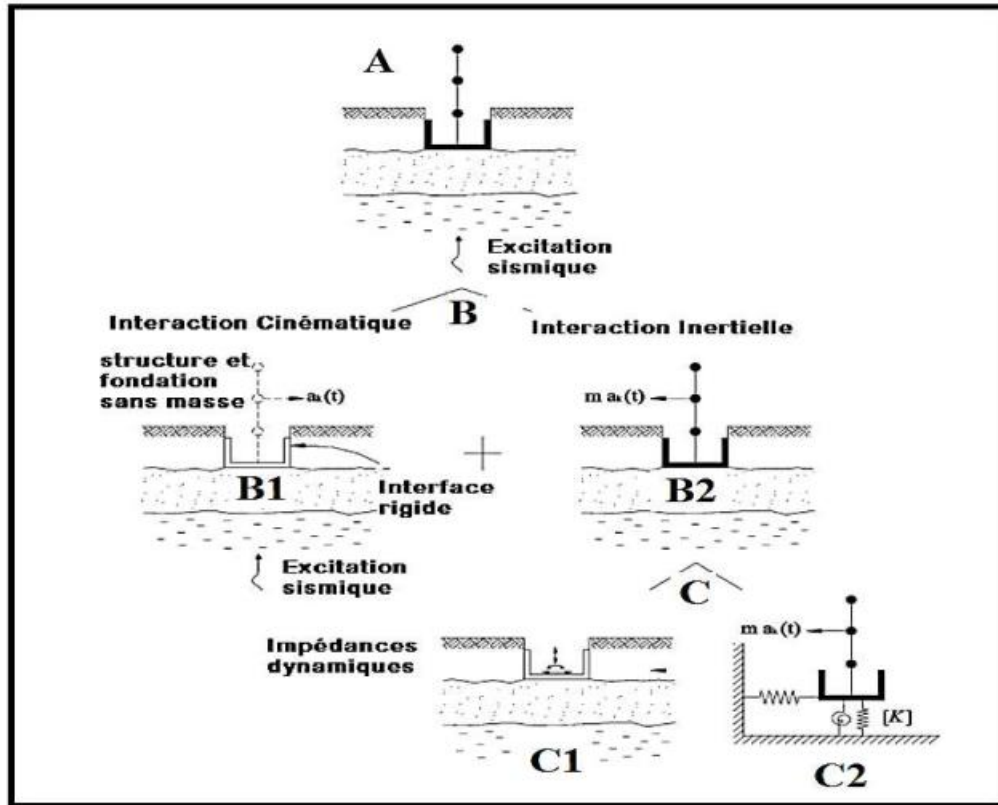


Figure II. 3 : schématisation de la méthode sous-structures.

II.5.3. Méthodes hybrides

Les méthodes hybrides forment la troisième grande famille de méthode pour le traitement de l'ISS. Ces méthodes sont situées entre les méthodes directes et les méthodes de sous-structure. L'idée principale consiste à séparer le sol en deux domaines distincts : le premier est un champ proche de la structure, où se développent les non-linéarités et irréversibilités. Le deuxième est le champ lointain où le comportement du sol n'est pas affecté par l'interaction avec la fondation. Ainsi, le champ lointain peut être traité par les techniques adaptées pour les problèmes linéaires (ex impédances dynamiques), alors que le champ proche est incorporé dans le modèle de la superstructure et peut être traité par une méthode directe. Le point délicat des méthodes hybrides est la définition de la frontière entre le champ proche et le champ lointain.

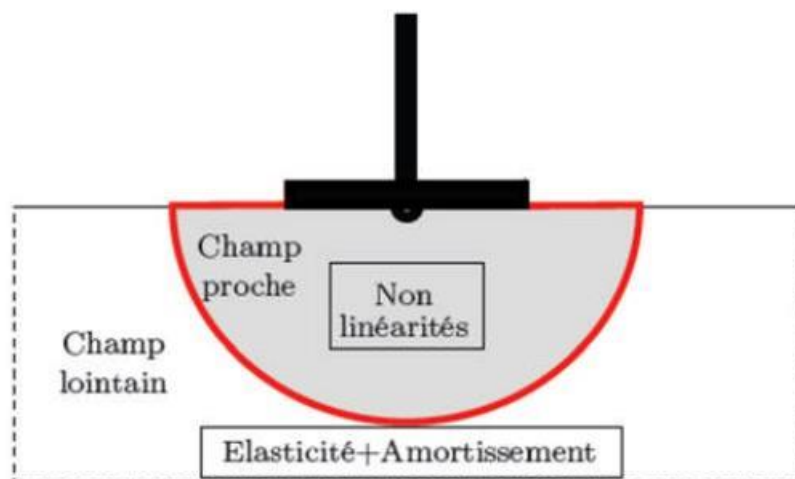


Figure II. 4: méthode hybride. [15]

➤ **Avantages**

L'avantage de la méthode hybride c'est qu'elle simplifie le problème en considérant deux champs : champs proche et champs lointain. Elle utilise l'impédance dynamique pour modéliser le champ lointain tandis que la méthode des éléments finis ou le macro-élément sont utilisés pour modéliser le champ proche. De cette façon, cette méthode réduit le temps de calcul par comparaison avec la méthode directe. Comme la méthode directe, cette méthode donne une modélisation précise de l'ISS, puisqu'elle prend en considération la non-linéarité dans le champ proche du sol.

➤ **Inconvénients**

Ce genre de méthodes nécessite une modélisation sophistiquée.

II.5.4. Modélisation du sol par un système de ressort amortis

Une méthode simple et classique pour la prise en compte de l'ISS est de séparer le sol et la structure (approche par sous – structures). Dans ces conditions le mouvement du bâtiment est égal à la somme :

- Du mouvement que prendrait le bâtiment fictif, supposé sans masse sous l'action de l'excitation sismique imposée à la base du modèle : interaction cinématique.
- Et du mouvement que prendrait le mouvement réel en l'absence de l'excitation sismique à la base du modèle, s'il était soumis aux forces résultant d'un calcul utilisant le mouvement précédent : interaction inertielle.

La modélisation de l'ISS par ressort concentrés est plus simple pour l'analyse dynamique d'ensemble, mais nécessite par la suite une modélisation spécifique du radier.

On obtient ainsi formellement quatre raideurs de sol en fonction de la fréquence :

- Raideur de translation verticale : $K_v(f)$;
- Raideur de translation horizontale : $K_h(f)$;
- Raideur de balancement (rocking): $K_\phi(f)$;
- Raideur de torsion autour d'un axe vertical : $K_R(f)$.

II.5.4.1 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 II.1 ci-dessous présente les trois raideurs de sol. Les valeurs des coefficients sans dimension, et pour une fondation rectangulaire, dépendant de la proportion des géométries de la fondation (a/b) et sont données par l'abaque (figure II.5). [1]

Tableau II. 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/m²]

ν : Coefficient de poisson

$\beta_Z, \beta_{X,y}$ et β_ϕ Sont donnés par des abaques suivants :

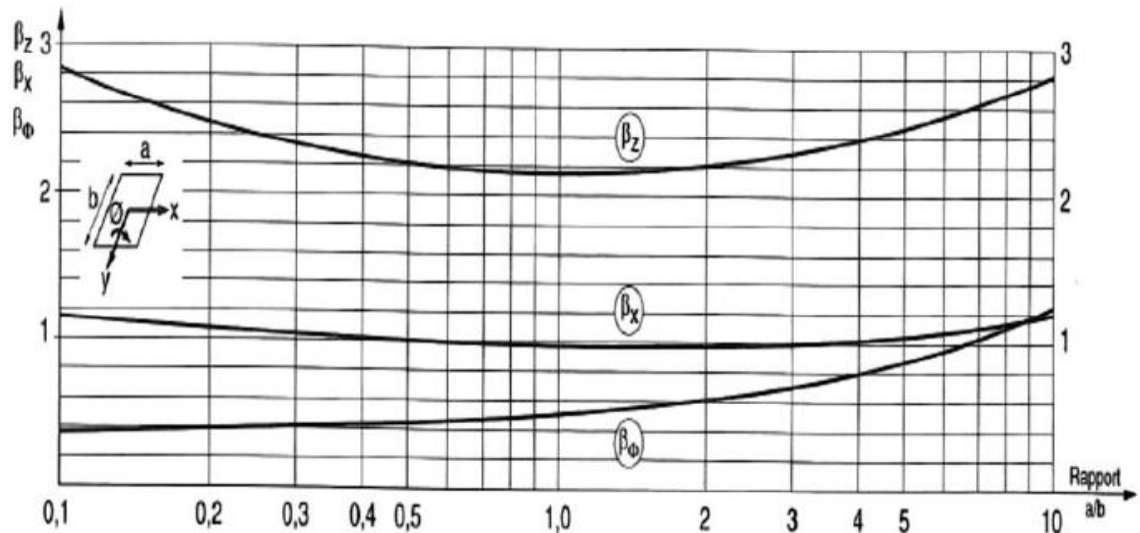


Figure II. 5: Abaqués donnant les coefficients de Newmark $\beta_z, \beta_{x,y}$ et β_ϕ .

II.5.4.2 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 par les expressions présentées au tableau suivant. [16]

Tableau II. 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 II.3.

Tableau II. 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.

II.6. Etat de l'art de l'ISS

L'interaction sol-structure est souvent négligée par les ingénieurs lors de l'analyse d'une structure, malgré que, ce phénomène a un grand effet sur le comportement des structures, qui dépend des caractéristiques du sol et de la structure elle-même. Pour cette raison, plusieurs recherches ont été faites dans ce domaine. On citera brièvement quelques-unes :

En 1996, **Steven L Kramer** [17] présente dans "Geotechnical EQ Engineering" les effets du phénomène d'interaction sol structure, et donne différentes méthodes pour prendre en compte l'effet d'ISS. Le problème d'ISS est traité en 2000 dans le contexte des structures multi supports, comme le pont, par **Clough & Penzien** dans leur travaux "Dynamics of structures".

Une modélisation est faite en éléments finis (2D) de l'interaction dynamique sol-structure d'un bâtiment par la méthode de sous structure, en 2000 par **M. Kutanis & M. Elmas**. [18] Plusieurs comparaisons ont été menées :

- Une comparaison entre trois types d'analyses : une analyse linéaire et non linéaire de l'ISS dynamique comparés avec le cas d'encastrement d'une même structure.

- Une comparaison des analyses faites pour trois enregistrements sismiques ayant trois différentes valeurs de PGA (0,15 g, 0,3 g et 0,45 g) choisis pour solliciter le modèle.
- Enfin, pour montrer l'influence des caractéristiques du sol sur l'effet de l'ISS, trois types de sol ont été choisis caractérisés par des vitesses de propagation des ondes de cisaillement de 200s/300 et 500s.

En 2004, **John P. Wolf & Andrew J. Deeks** [19] ont développé la théorie des cônes (poteaux-poutres coniques), qui l'ont appliqué aux analyses vibratoires de fondation. Ce travail montre l'influence des caractéristiques du sol sur le déplacement de la structure.

En 2004 toujours, **H. Shakibet et A. Fuladgar** [20] ont formulé une approche dans le domaine temporelle pour l'analyse linéaire en 3D de l'interaction sol structure d'un bâtiment de forme antisymétrique, pour l'évaluation de la réponse sismique de la structure. Le contact entre la fondation et le sol est modélisé par des éléments d'interface plans linéaires d'épaisseur nulle.

En 2005, **M. Oudjene et al** [21] ont démontré que la modification de l'action sismique des hautes fréquences n'est pas prise en compte par la forme des différents spectres de réponse ainsi proposée dans la gamme des hautes fréquences. Ensuite, ils ont discuté l'état actuel de ces spectres de calcul et ont suggéré que l'allongement de la période fondamentale n'implique pas systématiquement la diminution de l'accélération spectrale.

II.7. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre d'une façon sommaire le problème de l'interaction sol structure ainsi que la modélisation compte tenu : de la nature du mouvement et des propriétés dynamiques de l'ouvrage et du sol. Nous avons constaté que l'interaction cinématique a pour effet de changer la réponse du champ libre et que l'interaction inertielle augmente la flexibilité des structures. Il est aussi constaté que la modélisation d'ISS avec la méthode directe et la méthode hybride présente plusieurs difficultés et inconvénients. Tandis que la modélisation de cette interaction avec la méthode de sous-structure qui utilise l'impédance dynamique est simple à appliquer.

CHAPITRE III

Modélisation de l'interaction sol structure

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on propose une analyse à l'aide d'une modélisation numérique de l'influence de l'interaction sol structure sur la réponse dynamique des structures de type bâtiment.

Notre travail consiste à évaluer la réponse sismique 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 sismiques avec et sans interaction sol-structure seront étudiées en comparant les efforts tranchants et les moments fléchissent et les déplacements de structure dans les deux cas (sans et avec ISS).

III.2. 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). Plusieurs bâtiments seront étudiés (à deux niveaux ; quatre niveaux ; six niveaux, huit niveaux et dix niveaux).

III.3. Modélisation du 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. La modélisation par ressorts de sol définit la réaction élastique de sol à l'égard des composantes de déplacement et de rotation de la fondation, respectivement pour les quatre sites.

Pour l'analyse du problème, on a utilisé le Logiciel *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*.

III.4. Présentation et caractéristiques des structures

III.4.1. Présentation des structures

Les structures considérées pour l'étude sont des structures en (R+1 ; R+3 ; R+5 ; R+7 et R+9), régulières en plan et en élévation à usage d'habitation classée dans le groupe d'usage 2 et supposée être implantées en zone de moyenne sismicité (zone IIa).

Les structures reposent sur des semelles superficielles (isolés) en béton armé de section carrée.

III.4.2. Caractéristiques géométriques

Les structures étudiées comportent chacune 04 travées dans le sens x-x, et 03 travées dans le sens y-y comme le montre la figure III.1 pour la vue en plan et les figure III.2 à III.6 pour la vue en élévation.

Les caractéristiques géométriques des structures sont récapitulées dans le tableau III.1

Tableau III. 1: Caractéristiques géométriques.

Type de structure	Caractéristiques géométriques			
	Longueur totale(m)	Largeur totale(m)	Hauteur totale(m)	Hauteur d'étage(m)
Structure 2N	16	14	6,12	3,06
Structure 4N			12,24	
Structure 6N			18,36	
Structure 8N			24,48	
Structure 10N			30,6	

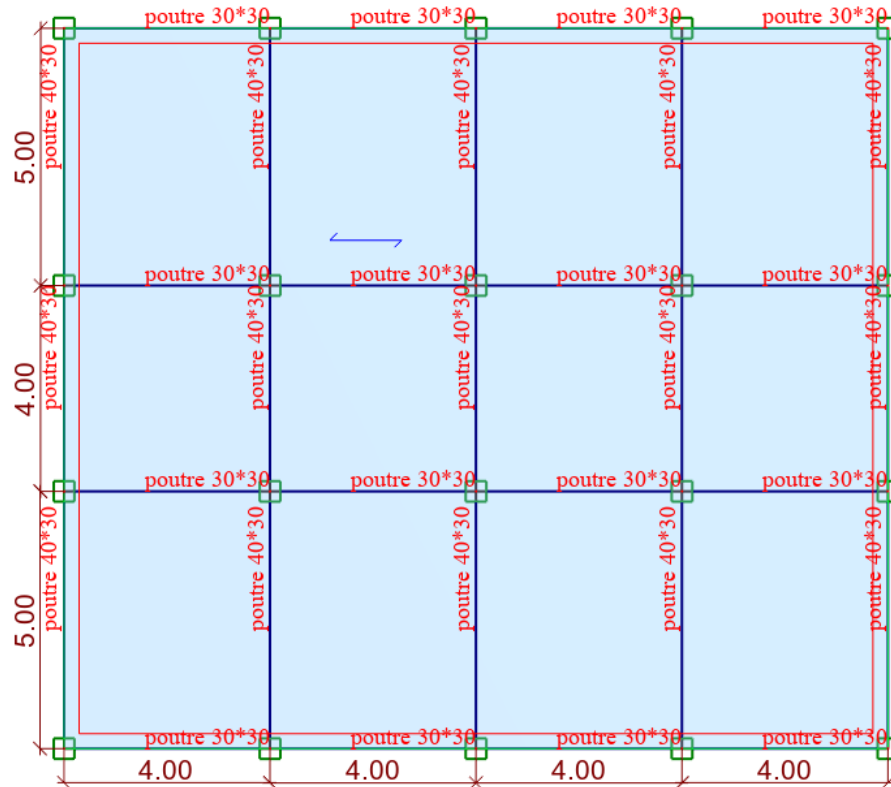


Figure III. 1: Vue en plan.

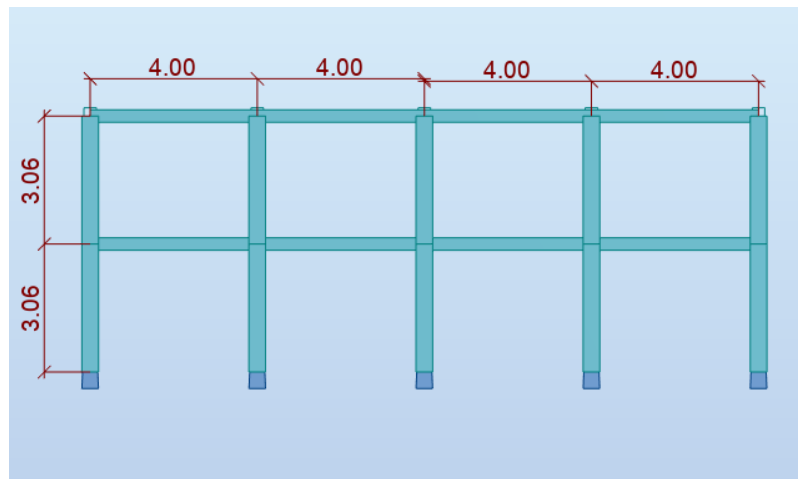


Figure III. 2: Vue en élévation de la structure 2N.

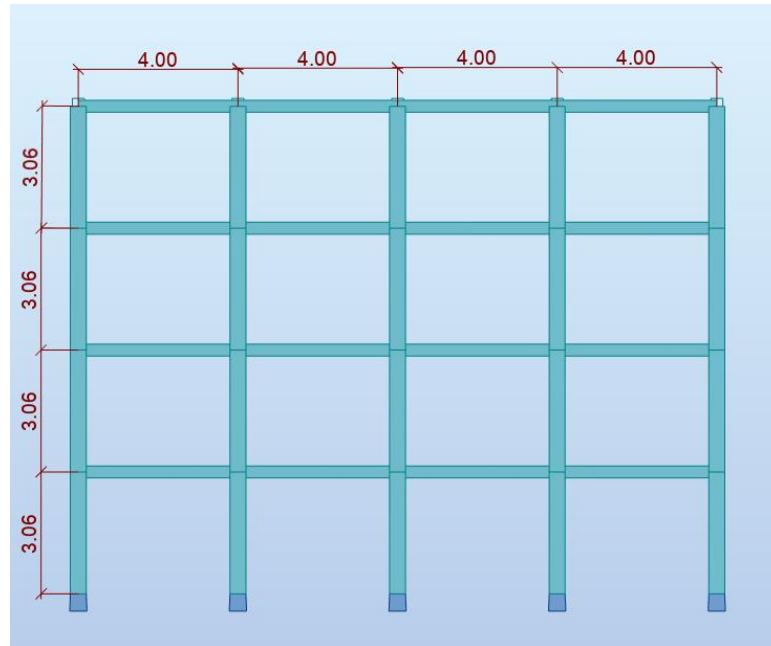


Figure III. 3: Vue en élévation de la structure 4N.

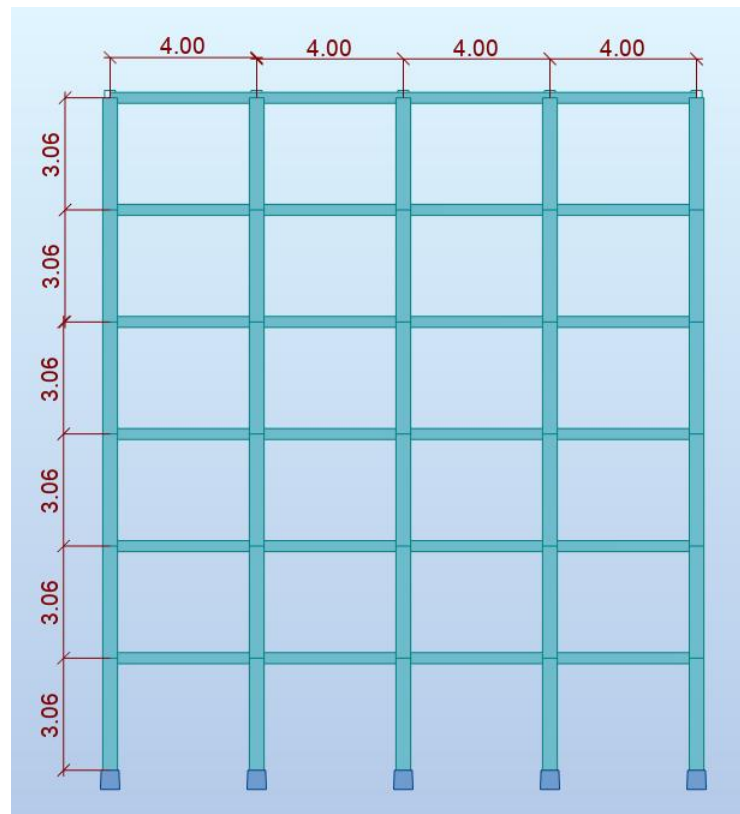


Figure III. 4: Vue en élévation de la structure 6N.

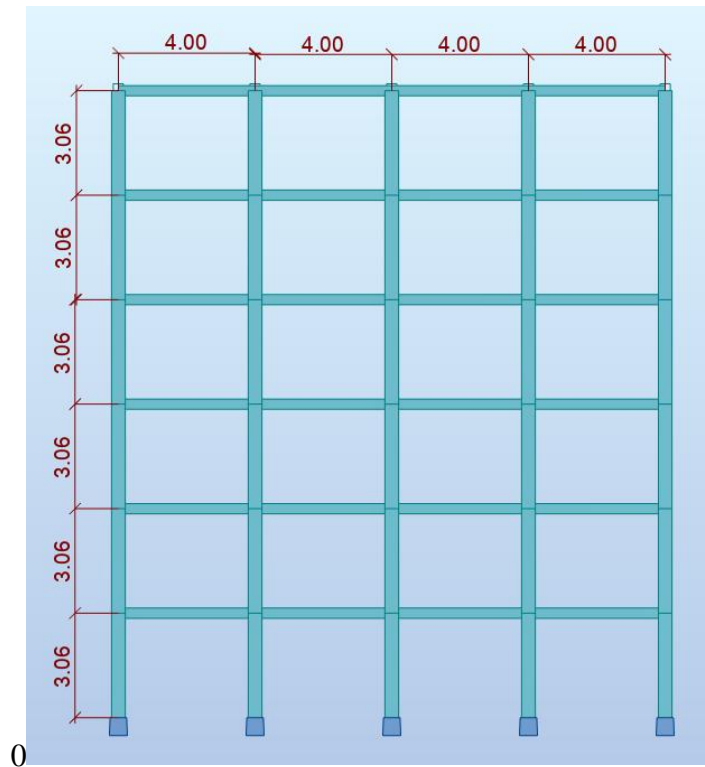


Figure III. 5: Vue en élévation de structure 8N.

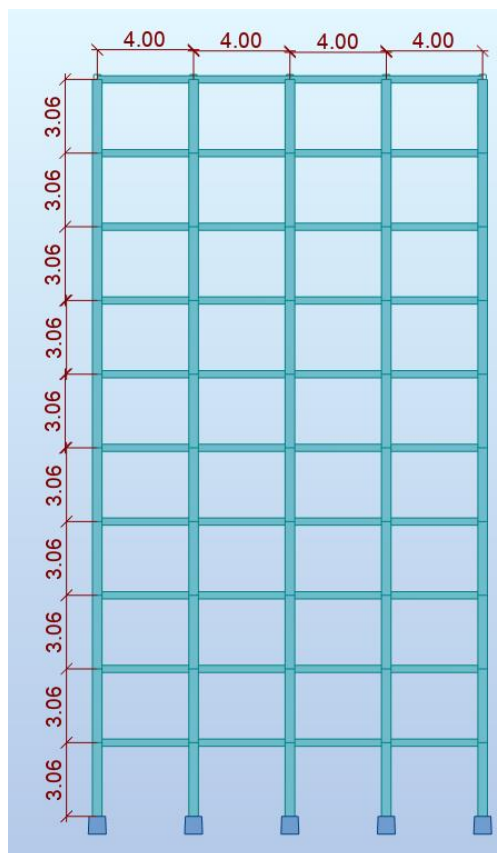


Figure III. 6: Vue en élévation de la structure 10N.

III.5. Dimensionnement des structures

III.5.1. Planchers

Les planchers sont réalisés en corps creux (16+ 4).

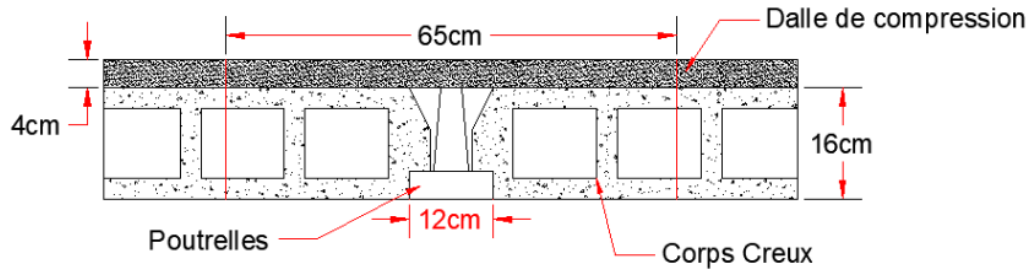


Figure III. 7: Planchers en corps creux (16+ 4).

III.5.2. Poteaux et Poutres

- ❖ Les poutres ont été pré-dimensionné conformément aux règles CBA93 [22] et RPA99. [5] Les sections obtenues sont :

30x40 : Poutres principales dans la direction yy.

30x30 : Poutres secondaires dans la direction xx.

- ❖ Les poteaux ont été pré-dimensionné en supposant qu'ils sont soumis à la compression simple centrée. Cependant la section choisie pour l'ensemble des structures étudiées est celle de la structure 10 niveaux qui est égale 40x40. Ceci pour avoir des propriétés géométriques identiques pour toutes les structures.

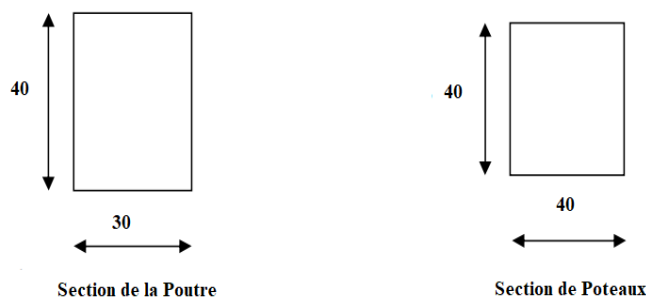


Figure III. 8 : Dimensions des sections de béton des poutres et des poteaux des structures.

III.5.3. Fondations

Le système de fondation adoptée pour cette étude est des semelles isolées de section carrée ($a \times b$). On a choisi trois types de semelles à savoir : Semelles centrées (S1) ; Semelles de rive (S2) ; Semelles d'angle (S3) (Figure III.9).

Pour le dimensionnement des semelles on a utilisé le logiciel Robot. Les résultats obtenus sont regroupées au tableau III.2.

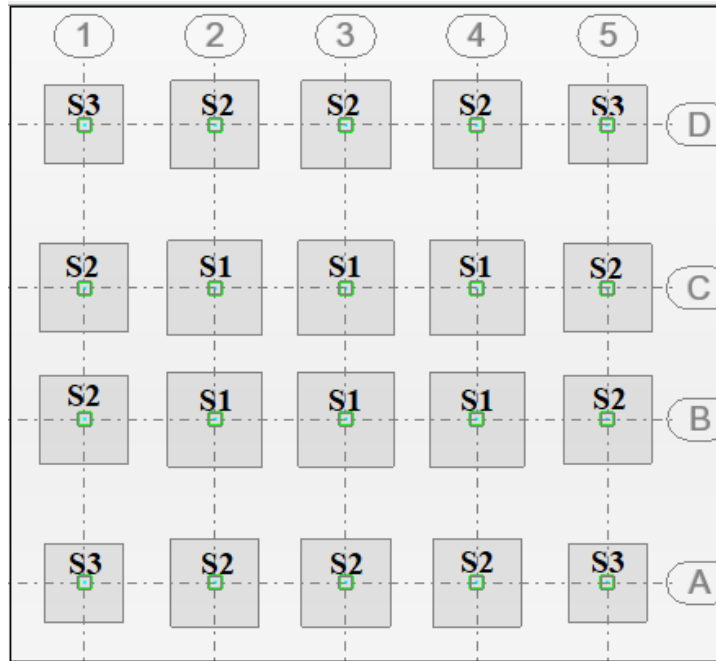


Figure III. 9: Disposition des semelles dans les structures.

Tableau III. 2: Dimensions des semelles.

semelles	a et b [m]	Surface (A) [m ²]
S1	2.9	8.41
S2	2.7	7.29
S3	2.4	5.76

III.6. Charges appliquées

III.6.1. Charges gravitaires

Les charges gravitaires sont évaluées comme suit :

- Les charges permanentes (**G**) du plancher terrasse sont évaluées à **6.5KN/m²** et celles du plancher courant à **5.9KN/m²**.
- Les charges d'exploitation (**Q**) du plancher terrasse sont de **1 KN/m²** et celles du plancher courant à **1.5 KN/m²**.
- La charge de la maçonnerie : **3.7 KN/m²**.
- La charge de l'Acrotère : **1.5 KN/ml**.

III.6.2. 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 *Autodesk Robot Structural Analysis Professional*, et en utilisant comme action le spectre de réponse selon le règlement RPA99 (version 2003) [5]. A chaque catégorie de site est associé un spectre de réponse en accélération, en considérant les périodes caractéristiques T₁ et T₂ de chaque catégorie de site présenté dans le tableau III.3.

Tableau III. 3: Les périodes caractéristiques des sites.

Site	S1	S2	S3	S4
T1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T2 (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:

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 \times A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \times \eta (1.25 \times A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \times \eta (1.25 \times A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3S \\ 2.5 \times \eta (1.25 \times A) \left(\frac{T_2}{3} \right) \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3S \end{cases}$$

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

A: Coefficient d'accélération de zone.

η: Correction d'amortissement.

ξ: 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 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.

➤ **Combinaison :**

En fonction du type de sollicitation, nous distinguons les différentes combinaisons suivantes :

Selon (CBA93) [22] :

ELU : 1.35G+1.5Q

ELS : G+Q

Selon (RPA2003) [5] situation accidentelle:

$$G+Q+E$$

$$0.8G+E$$

$$G+Q+1.2E$$

III.7. Modélisation

➤ **Structure :**

Les cinq exemples de structures présentés dans notre travail sont supposés classés dans le groupe d'usage 2 (RPA 99 Version 2003) et implantés en zone de moyenne sismicité (zone IIa), d'où $A = 0.15$. Le coefficient de comportement de la structure $R = 3.5$. Le facteur de qualité $Q = 1.15$.

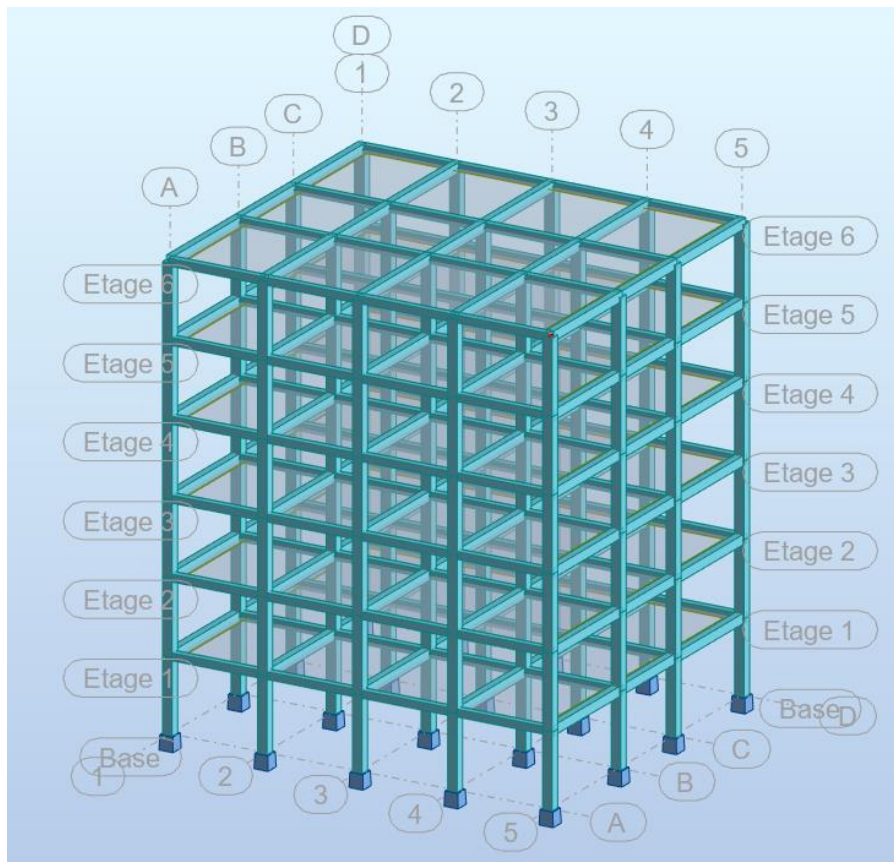


Figure III. 10: Vue en 3d de structure 6N sans prise en compte de l'ISS.

➤ **Interaction sol-structure**

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.

Les raideurs du ressort de sol utilisées dans cette étude ont été calculées en utilisant la formulation de NEWMARK-RESENBLUETH. [23] (Tableau III.4).

Tableau III. 4: Raideurs équivalentes pour un milieu semi –infini.

Mouvement	Semelle rigide rectangulaire
Verticale	$K_v = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta z \cdot \sqrt{A}$
Horizontale	$K_h = 2(1 + \nu)G \cdot \beta x \cdot \sqrt{A}$
Balancement	$K_\theta = \frac{G}{1-\nu} \cdot \beta \theta \cdot a^2 b$

Les valeurs des raideurs ont été obtenues en considérant les caractéristiques des sites donnés dans le tableau III.4. Les valeurs des coefficients sans dimension B_x ; B_z ; B_θ ont été calculées en utilisant les abaques spécifiques en fonction du rapport des dimensions de la fondation (b/a) et la direction de l'action sismique considérée (données par la Figure II.5). Les dimensions des semelles sont présentées au tableau III.2. Les valeurs de raideurs obtenues sont présentées au tableau III.6 pour chaque type de sol et pour chaque type de semelles.

Tableau III. 5: Caractéristiques des différentes catégories de site.

Sites	Description	Vitesse Vs (m/s)	Es (MPa)	ν	Gs (MPa)
S1	Rocheux	≥ 800	104	0,3	40
S2	ferme	≥ 400	52	0,3	20
S3	meuble	≥ 200	13	0,3	5
S4	Très meuble	≥ 100	3.38	0,3	1.3

Tableau III. 6 : Raideurs de ressorts du sol utilisés.

semelles	sites	Bz	Bx	B_{θ}	Kv	Kh	K_{θ}
S1	site 1	2,18	0,99	0,5	361257.1429	298584	696828.6
	site 2				180628.5714	149292	348414.3
	site 3				45157.14286	37323	87103.57
	site 4				11740.85714	9703.98	22646.93
S2	site 1	2,18	0,99	0,5	336342.8571	277992	562371.4
	site 2				168171.4286	138996	281185.7
	site 3				42042.85714	34749	70296.43
	site 4				10931.14286	9034.74	18277.07
S3	site 1	2,18	0,99	0,5	298971.4286	247104	394971.4
	site 2				149485.7143	123552	197485.7
	site 3				37371.42857	30888	493271.43
	site 4				9716.571429	8030.88	12836.57

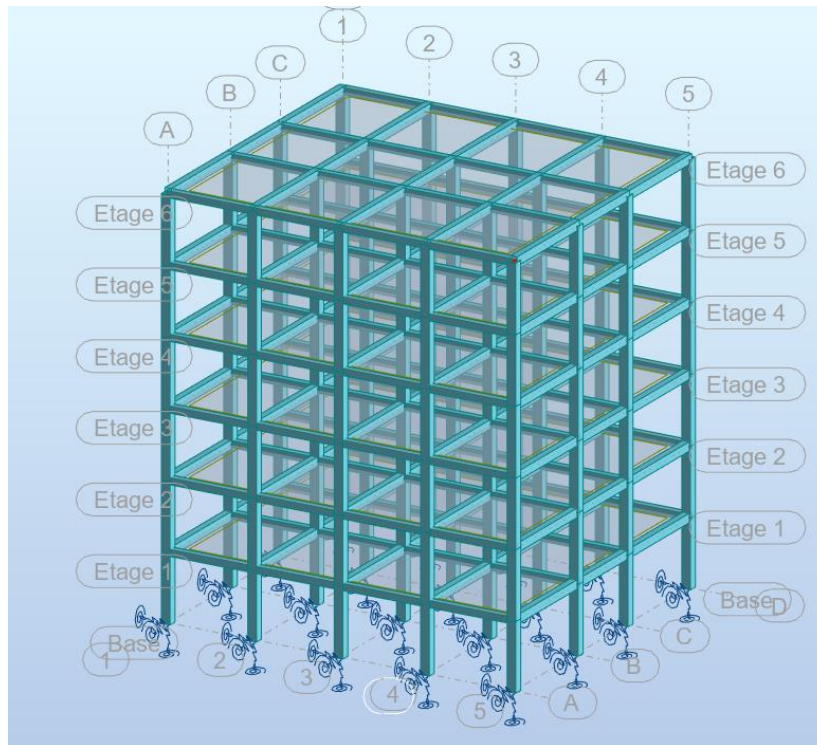


Figure III. 11: Modélisation de structure 6N avec prise en compte de l'ISS.

CHAPITRE IV

Résultats numériques et étude paramétrique

IV.1. Introduction

Ce chapitre regroupe les différents résultats numériques obtenues par le modèle présenté au chapitre précédent. Ces résultats sont obtenus dans le but d'examiner l'influence de l'interaction sol-structure sur le comportement des structures en béton armé. Une étude paramétrique en termes de type de sol, nombre d'étage et contreventement a été réalisé pour évaluer l'effet de l'ISS sur les différentes variables du problème à savoir : la période fondamentale, les déplacements, les efforts tranchants et les moments fléchissant à la base.

IV.2. Influence de l'interaction sol-structure sur la période fondamentale

Cette partie comporte une analyse de l'influence sol structure sur les périodes propres de structures de type bâtiment. L'accent a été mis sur la période fondamentale, qui joue un rôle important dans le calcul sismique de bâtiments.

➤ 1ère cas : sans ISS

Le tableau IV.1 représente les périodes propres des structures 2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N sans tenir compte l'ISS :

Tableau IV. 1 : Périodes propres calculées sans ISS (2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N).

Résultats dynamiques Sans ISS			
Structure	Mode	Période (s) (S1, S2, S3 ,S4)	Fréquence (Hz) (S1, S2, S3 ,S4)
Structure 2N	1	0,36	2,8
	2	0,31	3,25
	3	0,29	3,49
Structure 4N	1	0,77	1,3
	2	0,64	1,57
	3	0,61	1,63
Structure 6N	1	1,27	0,79
	2	1,03	0,97
	3	0,99	1,01
Structure 8N	1	1,65	0,61
	2	1,33	0,75
	3	1,33	0,75
Structure 10N	1	2,1	0,48
	2	1,68	0,59
	3	1,68	0,59

Il est à noter que, dans le cas où l'ISS n'est pas prise en compte, les périodes et les fréquences propres sont indépendants de types de site, car elles sont obtenues de résultats de l'analyse modale qui est indépendante de tous les paramètres de spectre de réponse.

➤ **2ème Cas : avec ISS**

Les tableaux IV.2, IV.4, IV.6 et IV.8 représentent les périodes propres des structures 2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N en tenant compte l'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4) respectivement.

Les tableaux IV.3, IV.5, IV.7 et IV.9 avec les figures IV.1 – IV.4 présentent une comparaison entre les périodes fondamentales en termes de nombre des étages des structures et en termes de l'effet d'ISS.

L'ensemble des résultats pour les quatre types de site (S1, S2, S3 et S4) montrent clairement que la période augmente considérablement avec l'augmentation de nombre des étages. c.à.d. l'élancement de la structure conduit à l'augmentation de la période fondamentale.

❖ **Site S1**

Les périodes propres avec ISS sont données dans le tableau IV.2

Tableau IV. 2 : Périodes propres avec ISS de site S1.

Résultats dynamique Avec ISS						
Site 1	Mode	2N	4N	6N	8N	10N
Période	1	0,36	0,78	1,28	1,68	2,14
	2	0,31	0,65	1,05	1,37	1,74
	3	0,29	0,62	1	1,34	1,7
Fréquence	1	2,76	1,28	0,78	0,59	0,47
	2	3,19	1,54	0,95	0,73	0,58
	3	3,43	1,62	1	0,75	0,59

Tableau IV.3 : Comparaison de la période fondamentale des structures avec et sans ISS de site S1.

Période fondamentale (en seconde)									
T1(s) sans ISS					T1(s) avec ISS				
2N	4N	6N	8N	10N	2N	4N	6N	8N	10N
0,36	0,77	1,27	1,65	2,1	0,36	0,78	1,28	1,68	2,14
Comparaison									
2Niss/2N		4N ISS/4N		6N ISS/6N		8N ISS/8N		10N ISS/10N	
1,00		1,01		1,01		1,02		1 .02	

Les résultats de tableau IV.3 et de la figure IV.1 montrent que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol rigides (site S1) est négligeable et ne dépasse pas 2% de celle des structures encastrees à la base.

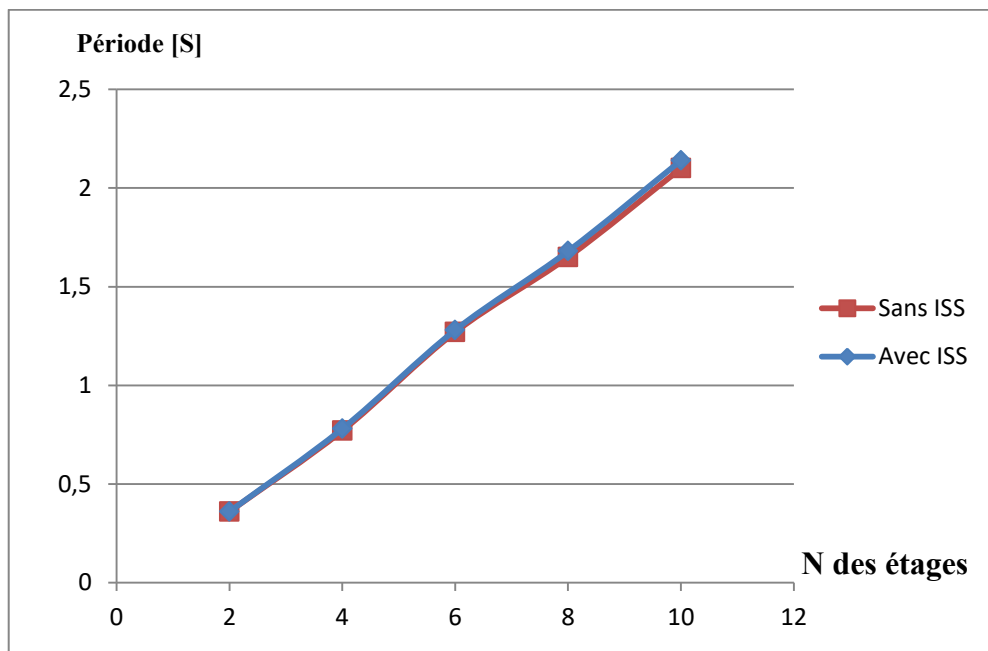


Figure IV. 1 : Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S1.

❖ Site S2

Les périodes propres avec ISS sont données dans le tableau IV.4

Tableau IV. 4 : Périodes propres avec ISS de site S2.

Résultats dynamique Avec ISS						
Site 2	Mode	2N	4N	6N	8N	10N
Période	1	0,37	0,79	1,3	1,71	2,18
	2	0,32	0,66	1,07	1,4	1,79
	3	0,3	0,62	1,01	1,35	1,71
Fréquence	1	2,72	1,26	0,77	0,59	0,46
	2	3,13	1,51	0,93	0,71	0,56
	3	3,38	1,6	0,99	0,74	0,59

Tableau IV. 5 : Comparaison de la période fondamentale des structures avec et sans ISS de site S2.

Période fondamentale (en seconde)									
T1(s) sans ISS					T1(s) avec ISS				
2N	4N	6N	8N	10N	2N	4N	6N	8N	10N
0,36	0,77	1,27	1,65	2,1	0,37	0,79	1,3	1,71	2,18
Comparaison									
2N ISS/2N		4N ISS/4N		6N ISS/6N		8N ISS/8N		10N ISS/10N	
1,03		1,03		1,02		1,04		1,04	

Les résultats de tableau IV.5 et de la figure IV.2 montrent que l’effet d’ISS sur la période fondamentale des structures implantées sur un sol ferme (site S2) est aussi négligeable. Il varie de 2% à 4% de celles des structures encastrees à la base et leurs nombre des étages varient de 2 à 10 niveaux. .

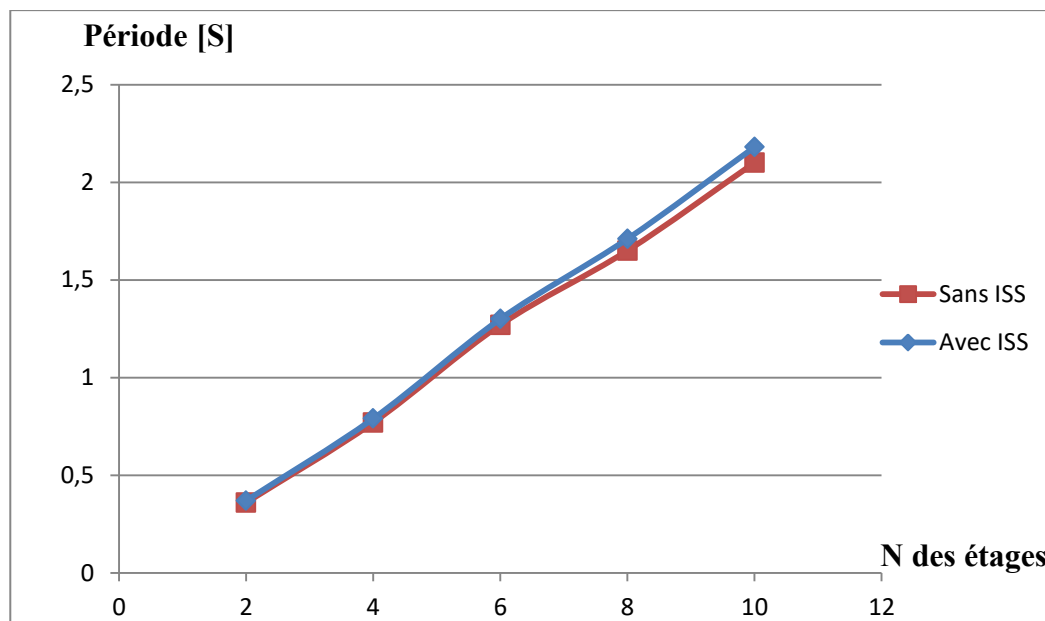


Figure IV. 2 : Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S2.

❖ Site S3

Les périodes propres avec ISS sont données dans le tableau IV.6

Tableau IV. 6 :Périodes propres avec ISS de site S3.

Résultats dynamique Avec ISS						
Site 3	Mode	2N	4N	6N	8N	10N
Période	1	0,4	0,84	1,39	1,85	2,39
	2	0,36	0,73	1,2	1,59	2,07
	3	0,32	0,65	1,04	1,39	1,75
Fréquence	1	2,51	1,19	0,72	0,54	0,42
	2	2,81	1,38	0,84	0,63	0,48
	3	3,11	1,53	0,96	0,72	0,57

Tableau IV.7 : Comparaison de la période fondamentale avec et sans ISS de site S3.

Période fondamentale (en seconde)									
T1(s) sans ISS					T1(s) avec ISS				
2N	4N	6N	8N	10N	2N	4N	6N	8N	10N
0,36	0,77	1,27	1,65	2,1	0,4	0,84	1,39	1,85	2,39
Comparaison									
2N ISS/2N		4N ISS/4N		6N ISS/6N		8N ISS/8N		10N ISS/10N	
1,11		1,09		1,09		1,12		1,14	

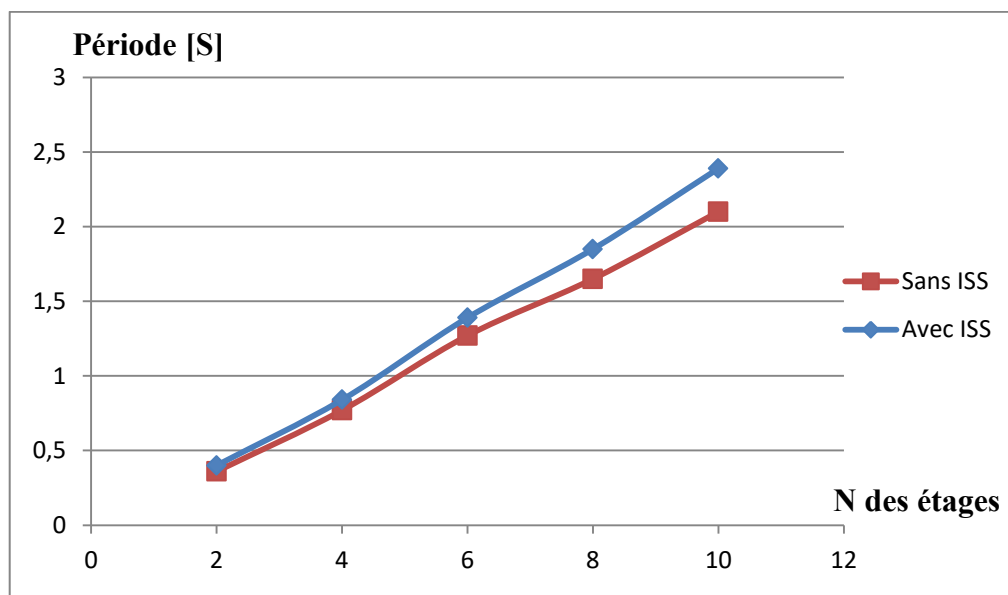


Figure IV. 3: Variation de la période fondamentale en fonction du nombre d'étage_ site S3.

Les résultats de tableau IV.7 et de la figure IV.3 montrent que l'effet d'ISS sur la période fondamentale des structures implantées sur un sol meuble (site S3) est considérable. Il varie de 9% à 14% de celles des structures encastrees à la base et leurs nombres des étages varient de 2 à 10 niveaux.

❖ Site S4

Les périodes propres avec ISS sont données dans le tableau IV.8

Tableau IV. 8 : Périodes propres avec ISS de site S4.

Résultats dynamique Avec ISS						
Site 4	Mode	2N	4N	6N	8N	10N
Période	1	0,5	0,94	1,68	2,27	3
	2	0,47	0,86	1,57	2,14	2,87
	3	0,41	0,7	1,15	1,5	1,87
Fréquence	1	2,01	1,07	0,6	0,44	0,33
	2	2,13	1,17	0,64	0,47	0,35
	3	2,44	1,42	0,87	0,66	0,53

Tableau IV. 9 : Comparaison de la période fondamentale avec et sans ISS de site S4.

Période fondamentale (en seconde)									
T1(s) sans ISS					T1(s) avec ISS				
2N	4N	6N	8N	10N	2N	4N	6N	8N	10N
0,36	0,77	1,27	1,65	2,1	0,5	0,94	1,68	2,27	3
Comparaison									
2N ISS/2N		4N ISS/4N		6N ISS/6N		8N ISS/8N		10N ISS/10N	
1,38		1,22		1,32		1,37		1,42	

Les résultats de tableau IV.9 et de la figure IV.4 montrent que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol mou (site S4) est très important. Il varie de 22% à 42% de celles des structures encastées à la base et leurs nombres des étages varient de 2 à 10 niveaux.

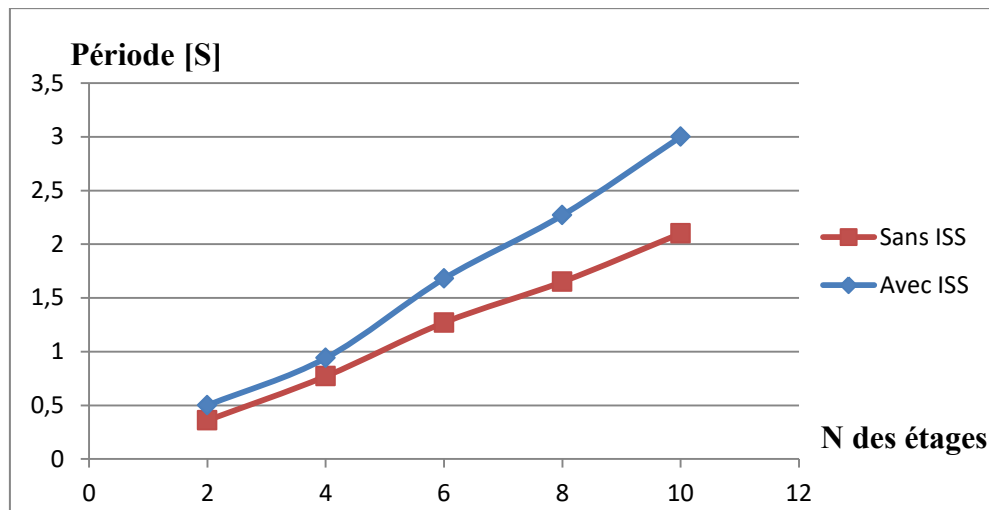


Figure IV. 4 : Variation de la période fondamentale en fonction de niveaux d'étage_ site S4.

La variation de l'écart entre les périodes fondamentales (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site est représentée par la figure IV.5.

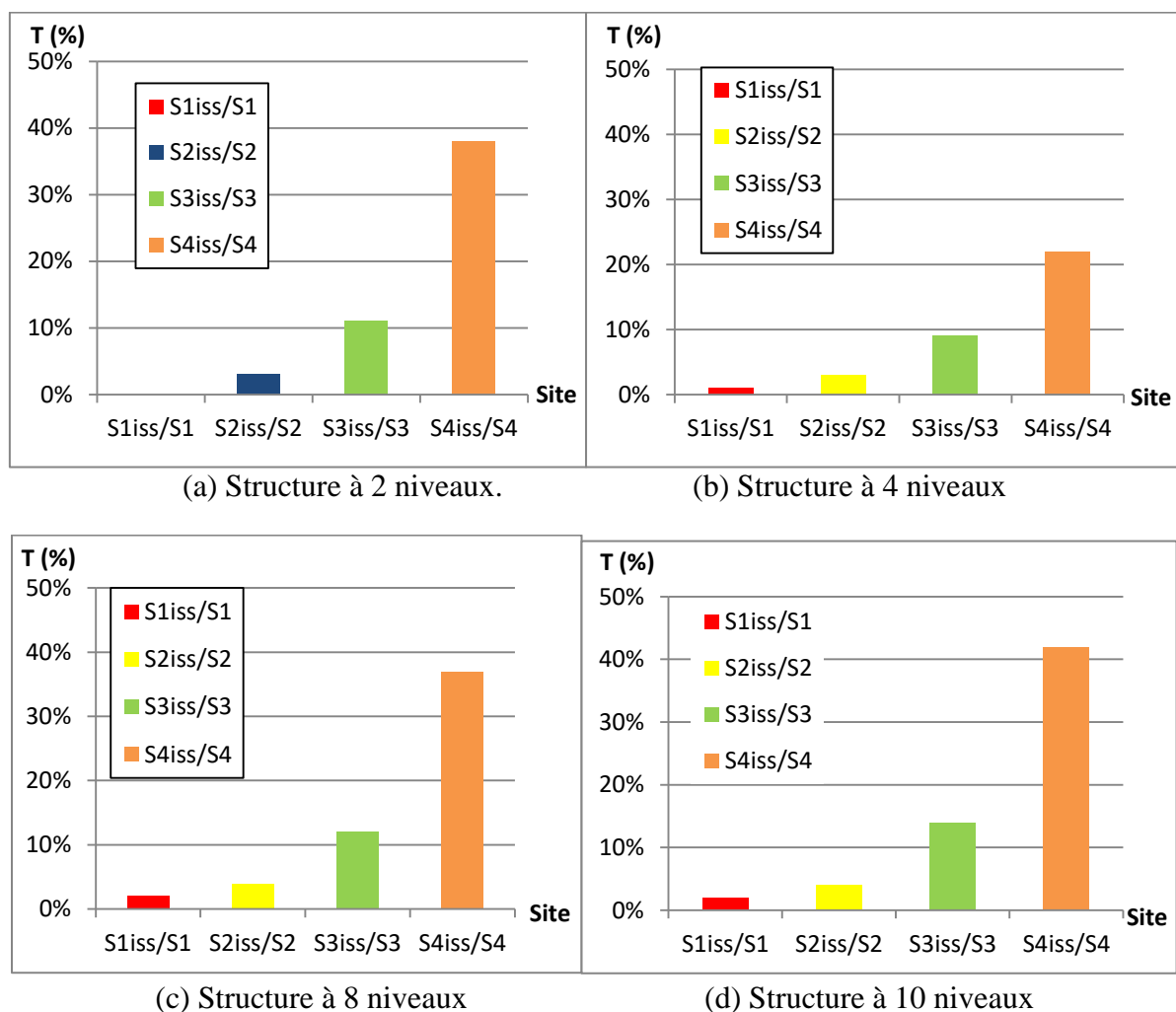


Figure IV. 5: Variation de l'écart entre les périodes fondamentales (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

D'après la comparaison entre les valeurs de la période fondamentale en termes de type de sol pour type de structures donnée par la figure IV.5, On constate que la période fondamentale tenant compte l'ISS est plus grande que celle des structures encastrees à la base pour l'ensemble des sites et les différents nombres des étages. Cet écart entre les résultats augmente avec la diminution de la rigidité du sol, on peut constater donc les remarques suivantes :

- ✓ Pour la structure à 2 niveaux l'écart varie de 0%, 3%, 11% à 38% pour les sites S1, S2, S3 et S4, respectivement.
- ✓ Pour la structure à 4 niveaux l'écart varie de 1%, 3%, 9% à 22% pour les sites S1, S2, S3 et S4, respectivement.
- ✓ Pour la structure à 8 niveaux l'écart varie de 2%, 4%, 12% à 37% pour les sites S1, S2, S3 et S4, respectivement.
- ✓ Pour la structure à 10 niveaux l'écart varie de 2%, 4%, 14% à 42% pour les sites S1, S2, S3 et S4, respectivement.

IV.3. Influence de l'interaction sol-structure sur les déplacements relatifs

Les tableaux IV.10 – IV.13 et les figures IV.6 – IV.9 donnent les déplacements relatifs des structures 2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4) respectivement. Ces résultats représentent une comparaison entre les déplacements relatifs en termes de nombre des étages des structures et en termes de l'effet d'ISS.

On remarque que le déplacement relatif des structures étudiées augmente avec l'augmentation de nombre des étages et ceci pour les différents types de sol (S1, S2, S3 et S4). Ce qui confirme que les structures élancées sont plus flexibles que les structures de faible élancement.

❖ Site S1

Les déplacements relatifs avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.10

Tableau IV. 10 : Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S1.

Déplacement relatif (en cm)				
Les niveaux	Δr (cm) Sans ISS		Δr (cm) Avec ISS	
2N	1,1		1,1	
4N	2,0		2,0	
6N	2,7		2,7	
8N	2,9		3,0	
10N	3,3		3,3	
Comparaison				
2NISS/2N	4N ISS/4N	6N ISS/6N	8N ISS/8N	10N ISS/10N
1,00	1,00	1,00	1,03	1,00

On remarque que la majorité de déplacements relatifs des structures étudiées obtenus pour ce type de sol ne dépassent pas la marge admissible tolérée par le règlement RPA99 (qui est $0.01h_e$), sauf la structure 10N qui nécessite un contreventement pour réduire son déplacement.

On constate que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol rigides (site S1) est négligeable par rapport à celle des structures encastrees à la base.

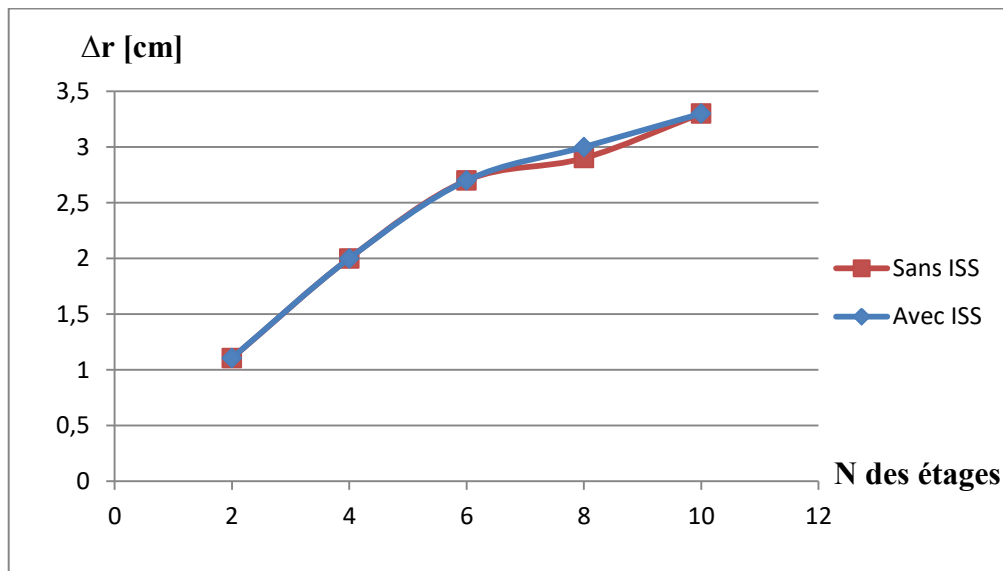


Figure IV. 6: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_ site S1.

❖ Site S2

Les déplacements relatifs avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.11

Tableau IV. 11 :Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S2.

Déplacement relatif (en cm)				
Les niveaux	Δr (cm) Sans ISS		Δr (cm) Avec ISS	
2N	1,2		1,2	
4N	2,4		2,4	
6N	3,2		3,3	
8N	3,5		3,6	
10N	4,0		4,1	
Comparaison				
2Niss/2N	4N ISS/4N	6N ISS/6N	8N ISS/8N	10N ISS/10N
1,00	1,00	1,03	1,03	1.03

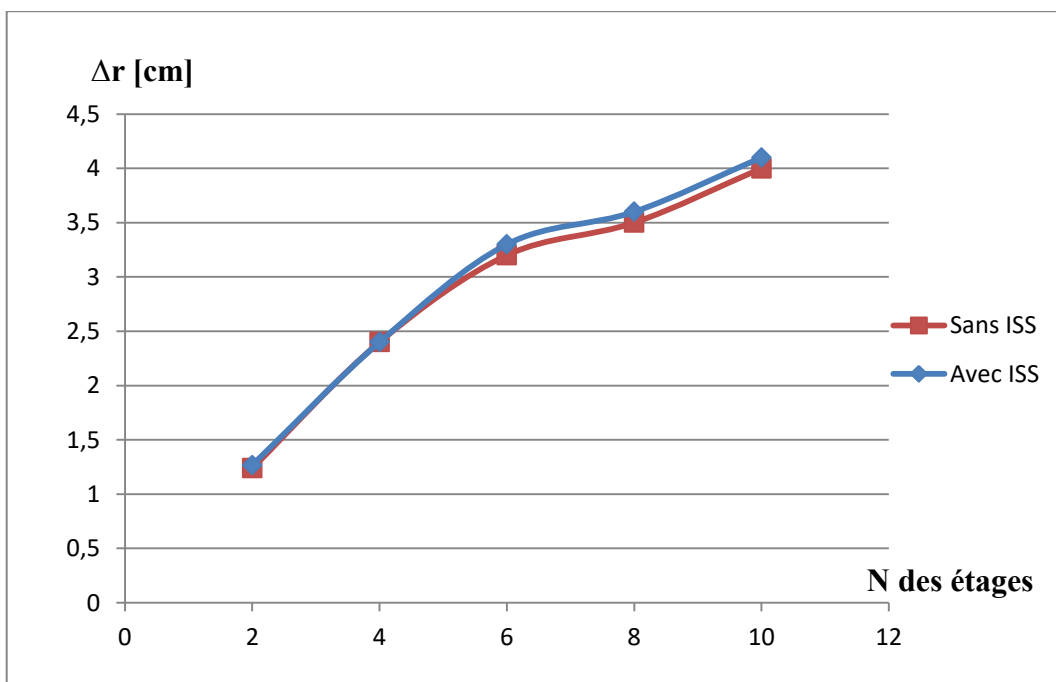


Figure IV. 7: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_ site S2.

On constate que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol ferme (site S2) est négligeable aussi par rapport à celle des structures encastrees à la base. L'écart entre les résultats de déplacement relatif des deux types de structures (avec et sans ISS) ne dépasse pas 3%.

❖ Site S3

Les déplacements relatifs avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.12

Tableau IV. 12 : Déplacements relatifs avec et sans ISS de Site S3.

Déplacement relatif (en cm)				
Les niveaux		Δr (cm) Sans ISS		Δr (cm) Avec ISS
2N		1,2		1,4
4N		2,8		2,9
6N		3,6		4,0
8N		4,1		4,5
10N		4,6		5,2
Comparaison				
2Niss/2N	4N ISS/4N	6N ISS/6N	8N ISS/8N	10N ISS/10N
1.17	1,04	1,11	1,10	1,13

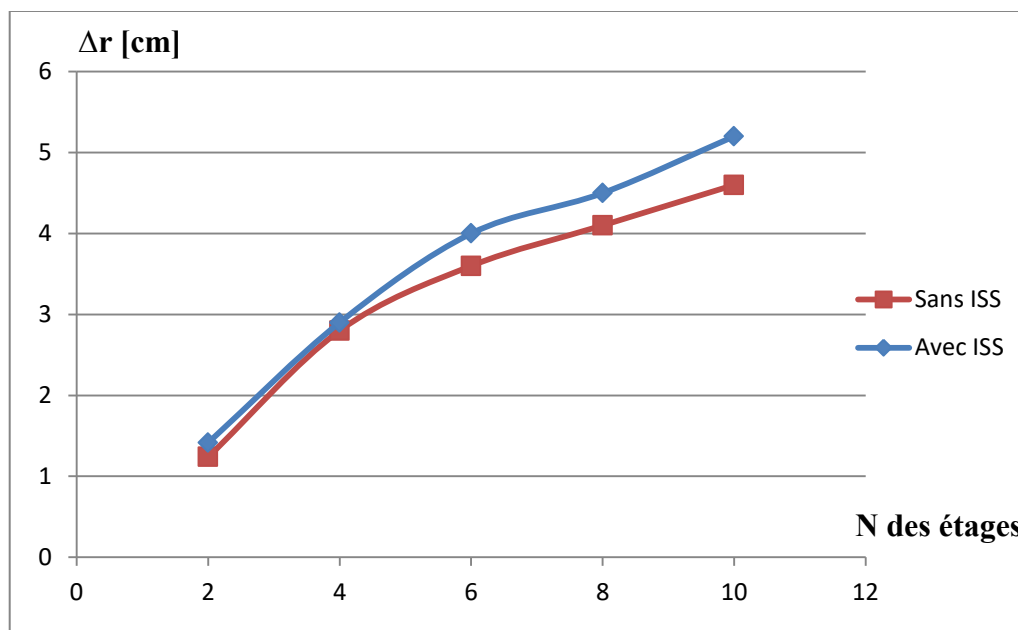


Figure IV. 8 : Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_ Site S3.

La figure IV.8 montre que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol meuble (site S3) est négligeable pour les structures à un élancement faible (2N et 4N). Cependant, pour les autres structures (nombre d'étage > 6 niveaux), l'effet d'ISS sur les déplacements relatifs par rapport à celle des structures encastree à la base est remarquable. L'écart entre les résultats de deux types de structures (avec et sans ISS) est environ 11% (Tableau IV.12).

❖ Site S4

Les déplacements relatifs avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.13

Tableau IV. 13 : Déplacement relatif avec et sans ISS de Site S4.

Déplacement relatif (en cm)				
Les niveaux	Δr (cm) Sans ISS		Δr (cm) Avec ISS	
2N	1,2		2,6	
4N	3,5		4,6	
6N	4,6		5,8	
8N	5,1		6,8	
10N	5,8		8,0	
Comparaison				
2Niss/2N	4N ISS/4N	6N ISS/6N	8N ISS/8N	10N ISS/10N
2,17	1,31	1,26	1,33	1,38

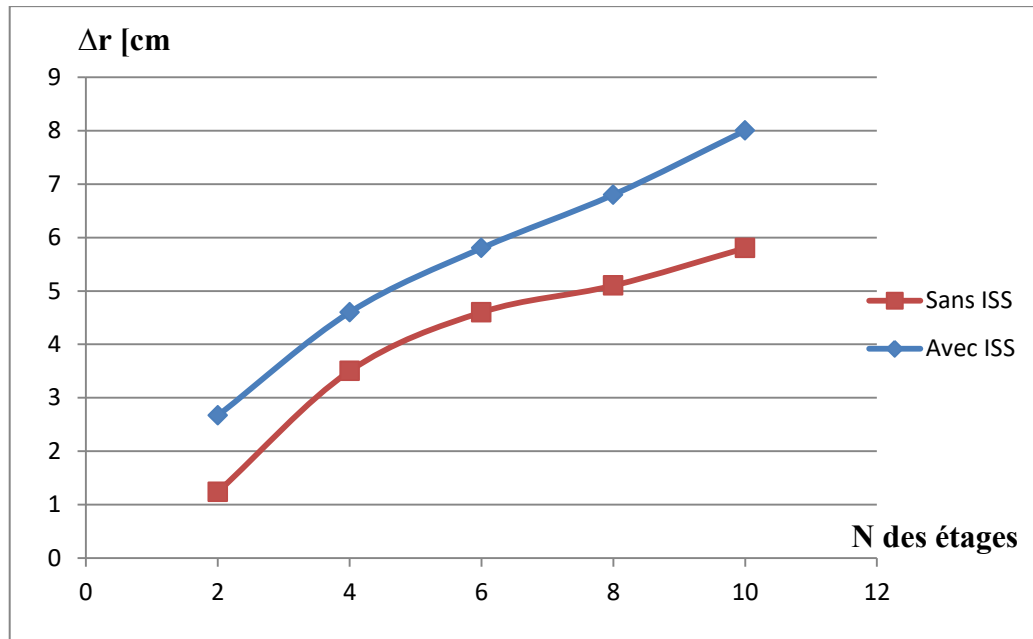


Figure IV. 9: Variation du déplacement relatif (en cm) en fonction du nombre d'étage_Site S4.

La figure IV.9 montre que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol mou (site S4) est considérable pour l'ensemble des structures. L'écart entre les résultats de déplacement relatif des deux types de structures (avec et sans ISS) varie de 26 % à 38%. Il atteint 117% pour la structure à deux niveaux (Tableau IV.13).

Il est à noter que les valeurs excessives de déplacement sont dues au manque de contreventement qui peut être différent d'une structure à l'autre. L'objectif été d'examiner les paramètres d'étude indépendamment de contreventement. L'étude de structure contreventée sera à la fin de ce chapitre.

Les figures IV.10 et IV.11 représentent la variation de déplacements relatifs en fonction de la rigidité de sol, des structure avec et sans ISS, respectivement. Ces figures montrent que ces déplacements augmentent progressivement avec la diminution de la rigidité du sol. Mais ils augmentent considérablement pour le site S4 (sol très meuble). Ceci est pour les deux cas de structures étudiés (avec et sans ISS).

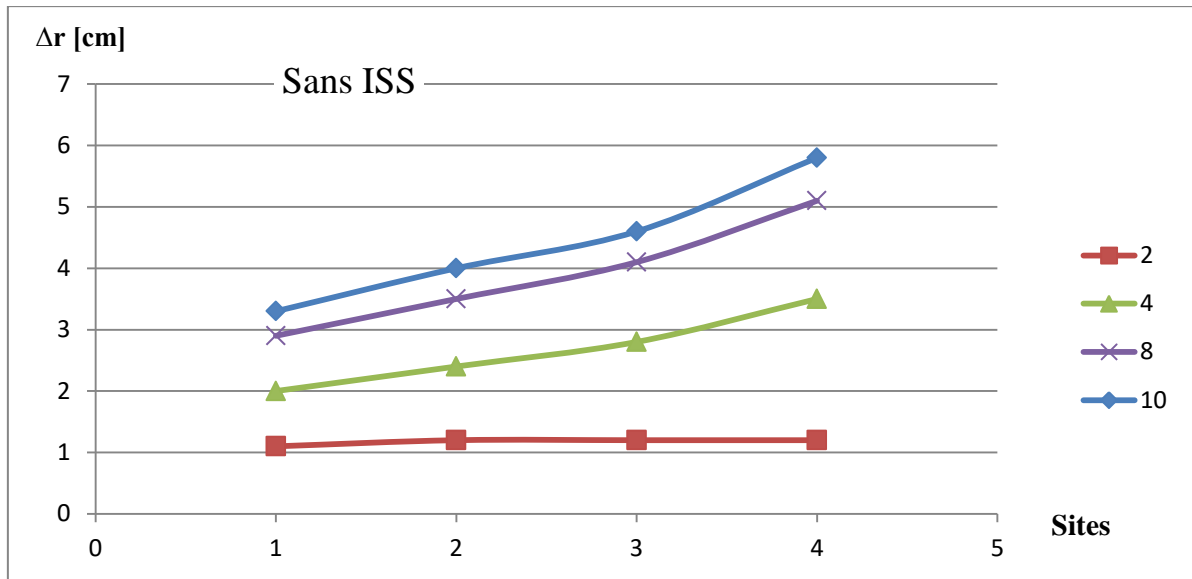


Figure IV.10: Variation de déplacement relative en fonction de type de site _ Sans ISS.

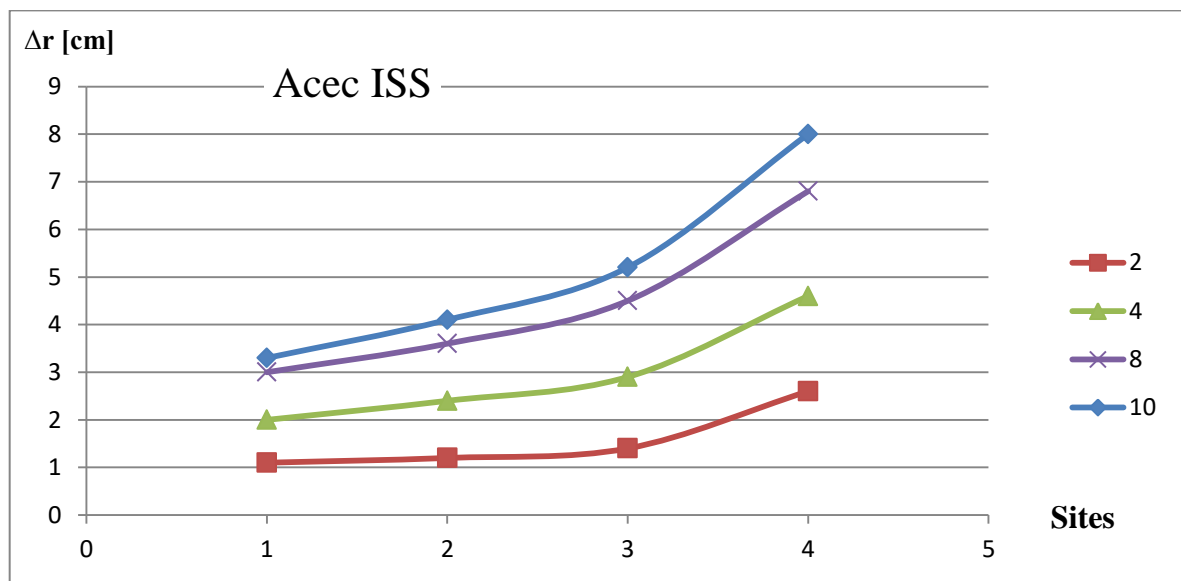


Figure IV. 11: Variation de déplacement relative en fonction de type de site _ Avec ISS.

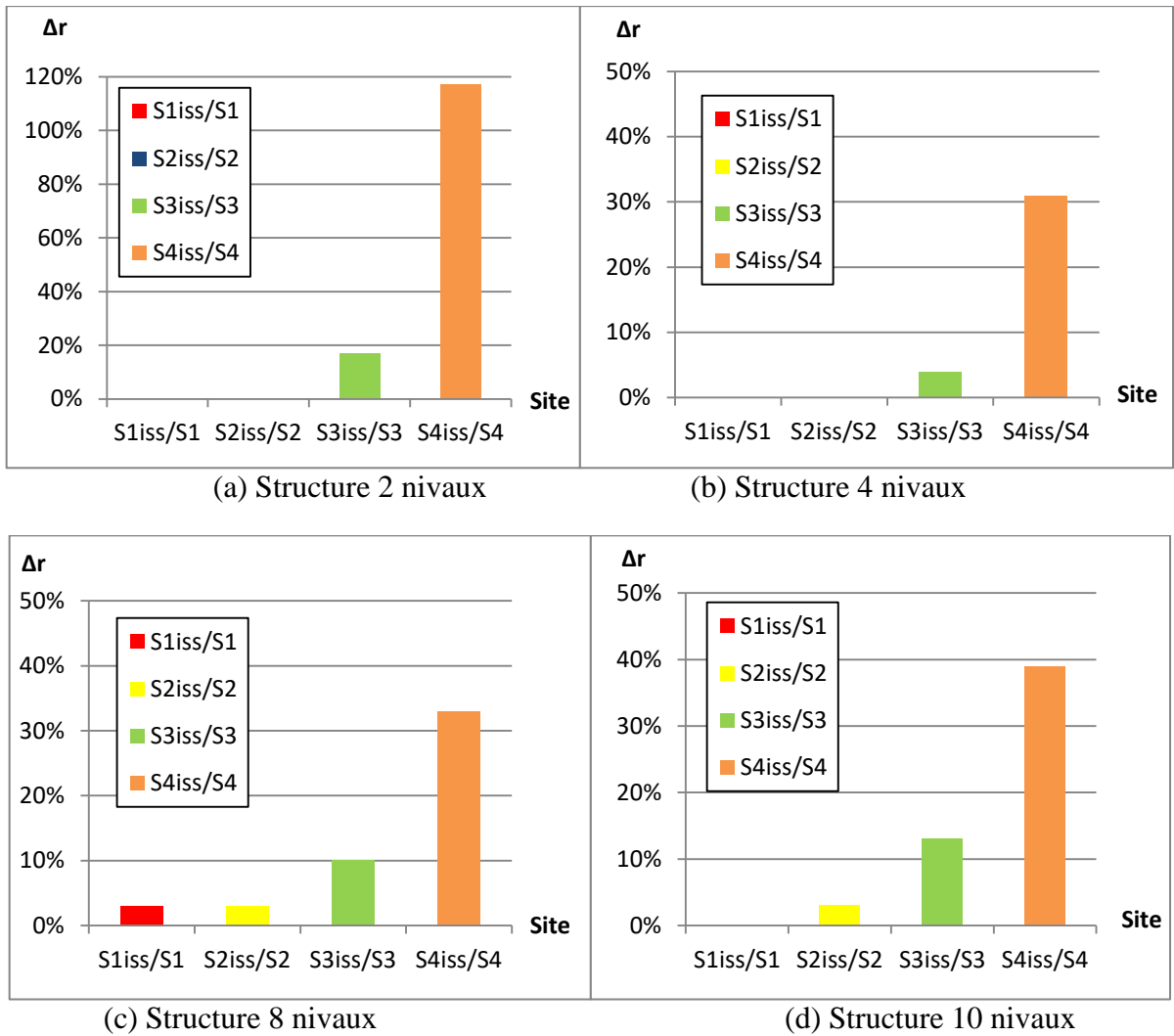


Figure IV. 12 : Variation de l'écart entre les déplacements relatifs (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

La figure IV.12 montre une comparaison entre les valeurs des déplacements relatifs en termes de type de sol pour les structures à 2, 4, 8 et 10 niveaux. On constate que l'écart entre le déplacement relatif des structures tenant compte l'ISS et celui des structures encastées à la base est négligeable pour les sols rocheux et fermes et pour les différent nombre des étages, cependant il est considérable pour les sols meubles et mous.

Cet écart est estimé de :

- ✓ 11% pour le sol meuble (S3)
- ✓ Pour le sol mou (S4) il est de : 31%, 26%, 33% et 38% pour les structures à 4N, 6N, 8N et 10N, respectivement. Pour la structure à 2N cet écart dépasse 100% mais le déplacement lui-même est faible.

IV.4. Influence de l'interaction sol-structure sur les déplacements absolus

Les tableaux IV.14 – IV.17 et les figures IV.13 – IV.16 donnent les déplacements absolus des structures 2N ; 4N ; 6N ; 8N ; 10N avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4) respectivement. Ces résultats représentent une comparaison entre les déplacements absolus en termes de nombre des étages des structures et en termes de l'effet d'ISS.

On remarque que le déplacement absolu des structures étudiées augmente avec l'augmentation de nombre des étages et ceci pour les différents types de sol (S1, S2, S3 et S4). Ce qui confirme que les structures élancées sont plus flexibles que les structures de faible élancement.

❖ Site S1

Les déplacements absolus avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.14

Tableau IV. 14 : Déplacements absolus avec et sans ISS de Site S1.

Déplacements absolus (en cm)				
Les niveaux	δ (cm) Sans ISS		δ (cm) Avec ISS	
2N	2,198		2,238	
4N	6,1		6,2	
6N	11,5		11,8	
8N	16,2		16,7	
10N	22,2		22,9	
Comparaison				
2N ISS /2N	4N ISS /4N	6N ISS /6N	8N ISS /8N	10N ISS /10N
1,02	1,02	1,03	1,03	1,03

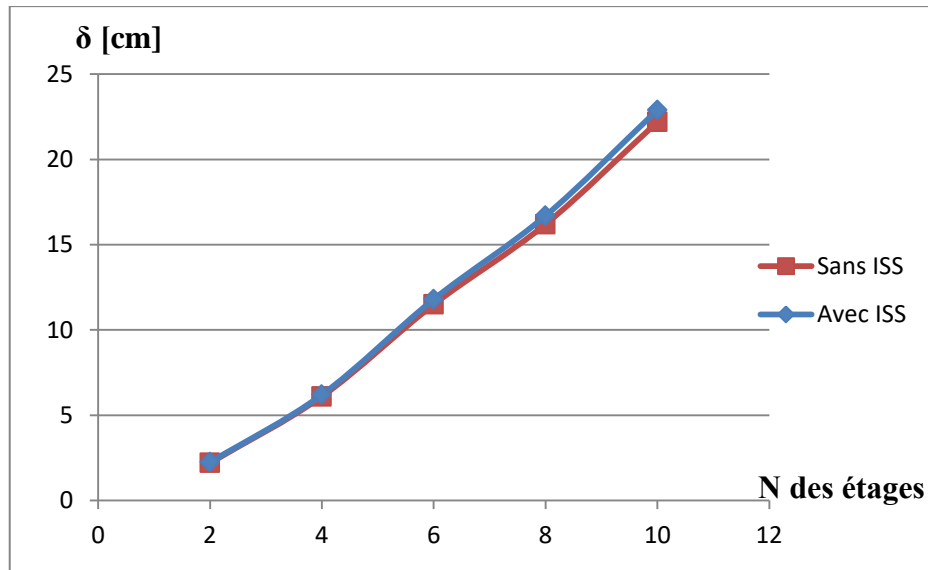


Figure IV. 13: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage_ Site S1.

Le Tableau IV.14 et la figure IV.13 montrent que l'effet d'ISS sur les déplacements absolus des structures implantées sur un sol rocheux (site S1) est négligeable par rapport à celle des structures encastrees à la base. L'écart entre les résultats de déplacement absolu des deux types de structures (avec et sans ISS) ne dépasse pas 3%.

❖ Site S2

Les déplacements absolus avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.15

Tableau IV. 15 : Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S2.

Déplacement absolu (en cm)				
Les niveaux	δ (cm) Sans ISS		δ (cm) Avec ISS	
2N	2,467		2,606	
4N	7,4		7,6	
6N	14		14,5	
8N	19,6		20,7	
10N	26,9		28,6	
Comparaison				
2N ISS /2N	4N ISS /4N	6N ISS /6N	8N ISS /8N	10N ISS /10N
1,06	1,03	1,04	1,06	1,06

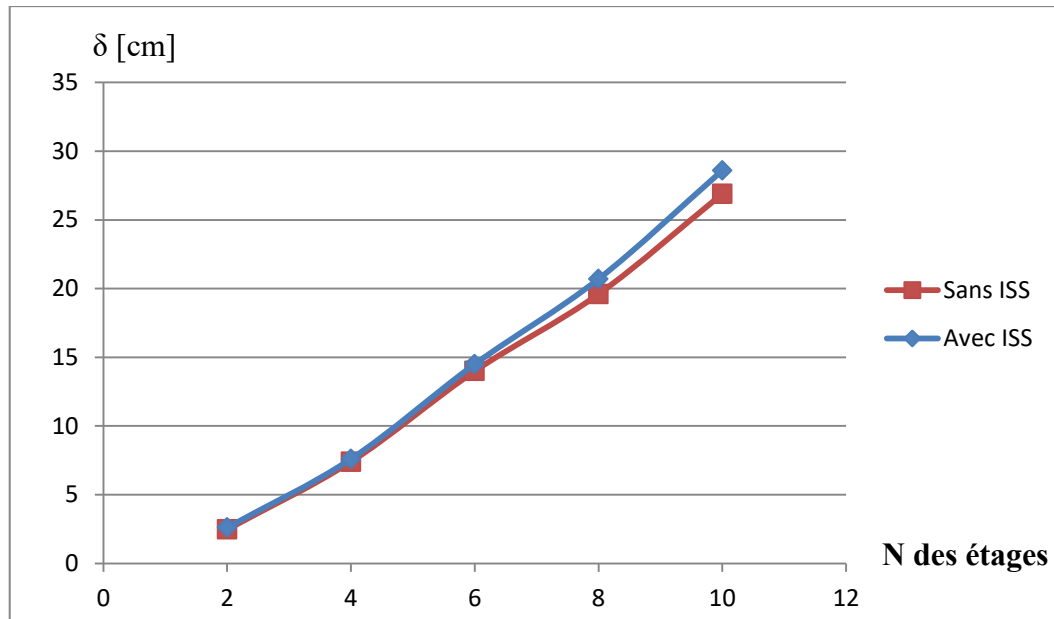


Figure IV. 14 : Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.

Le Tableau IV.15 et la figure IV.14 montrent aussi que la considération de l'ISS a un effet très faible sur les déplacements absolus des structures implantées sur un sol ferme (site S2). L'écart entre les résultats de déplacement absolu des deux types de structures (avec et sans ISS) ne dépasse pas 6% pour les structure a 10 niveaux.

❖ Site S3

Les déplacements absolus avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.16

Tableau IV. 16 :Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S3.

Déplacement absolu (en cm)				
Les niveaux	δ (cm) Sans ISS		δ (cm) Avec ISS	
2N	2,467		3,01	
4N	8,5		9,6	
6N	16,2		18,7	
8N	22,8		27,1	
10N	31,2		38,2	
Comparaison				
2N ISS /2N	4N ISS /4N	6N ISS /6N	8N ISS /8N	10N ISS /10N
1,22	1,13	1,15	1,19	1,22

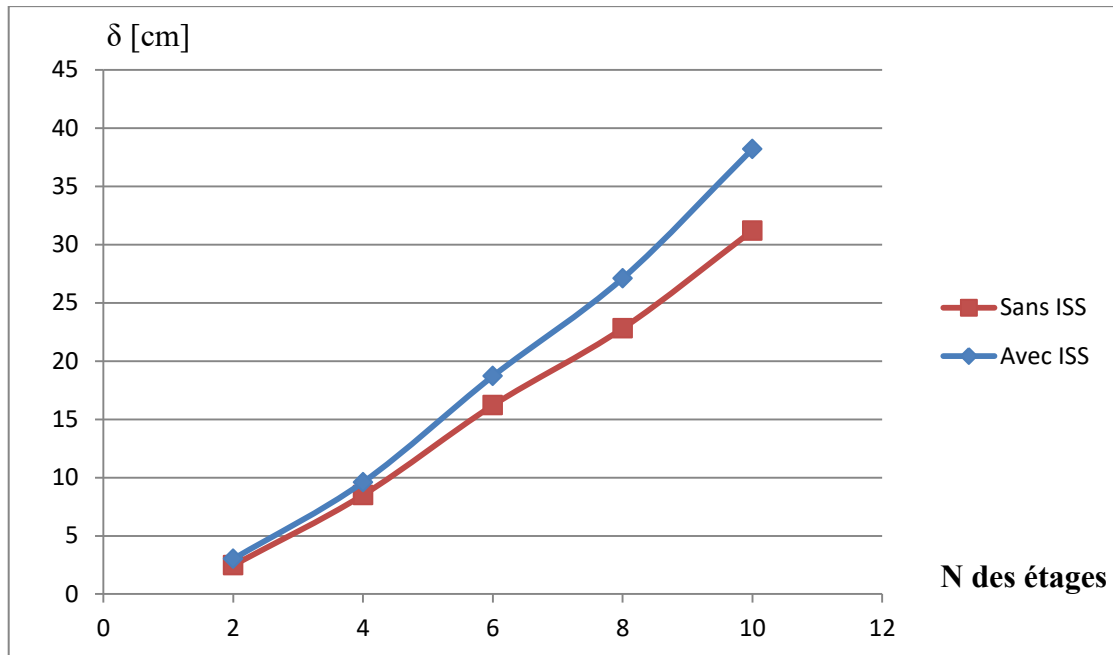


Figure IV. 15: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S3

La figure IV.15 montre que, pour les sites S3 (sol meuble), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur les déplacements absolus par rapport à celle des structures encastées à la base, en particulier pour les structures à un nombre d'étages supérieures à 4N. L'écart entre les résultats de deux types de structures (avec et sans ISS) est varié entre 13% à 22% en fonction de nombre des étages (Tableau IV.16).

❖ Site S4

Les déplacements absolus avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.17

Tableau IV. 17 : Déplacement absolu avec et sans ISS de Site S4.

Déplacement absolu (en cm)				
Les niveaux	δ (cm) Sans ISS		δ (cm) Avec ISS	
2N	2,467		4,466	
4N	8,5		15,1	
6N	20,2		30,4	
8N	28,5		45,9	
10N	39,1		67,1	
Comparaison				
2N ISS /2N	4N ISS /4N	6N ISS /6N	8N ISS /8N	10N ISS /10N
1,81	1,78	1,50	1,61	1,72

La figure IV.16 montre que l'effet d'ISS sur les structures implantées sur un sol mou (site S4) est considérable pour l'ensemble des structures. L'écart entre les résultats de déplacement absolu des deux types de structures (avec et sans ISS) varie entre 50% à 80% (Tableau IV.17).

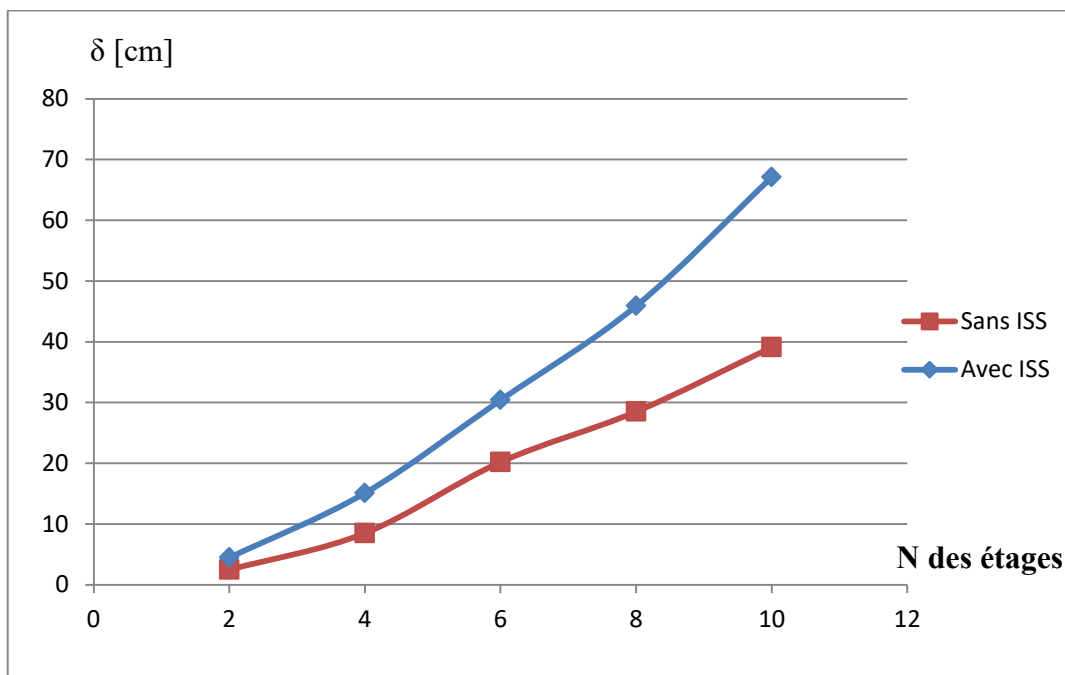


Figure IV. 16: Variation du déplacement absolu (en cm) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.

Les figures IV.17 et IV.18 représentent la variation de déplacements absolus en fonction de la rigidité de sol, des structures avec et sans ISS, respectivement. Ces figures montrent que ces déplacements augmentent progressivement avec la diminution de la rigidité du sol. Mais ils augmentent brusquement pour le site S4 (sol très meuble), en particulier pour les structures à un nombre élevé des étages. Ceci est pour les deux type de structures (avec et sans ISS).

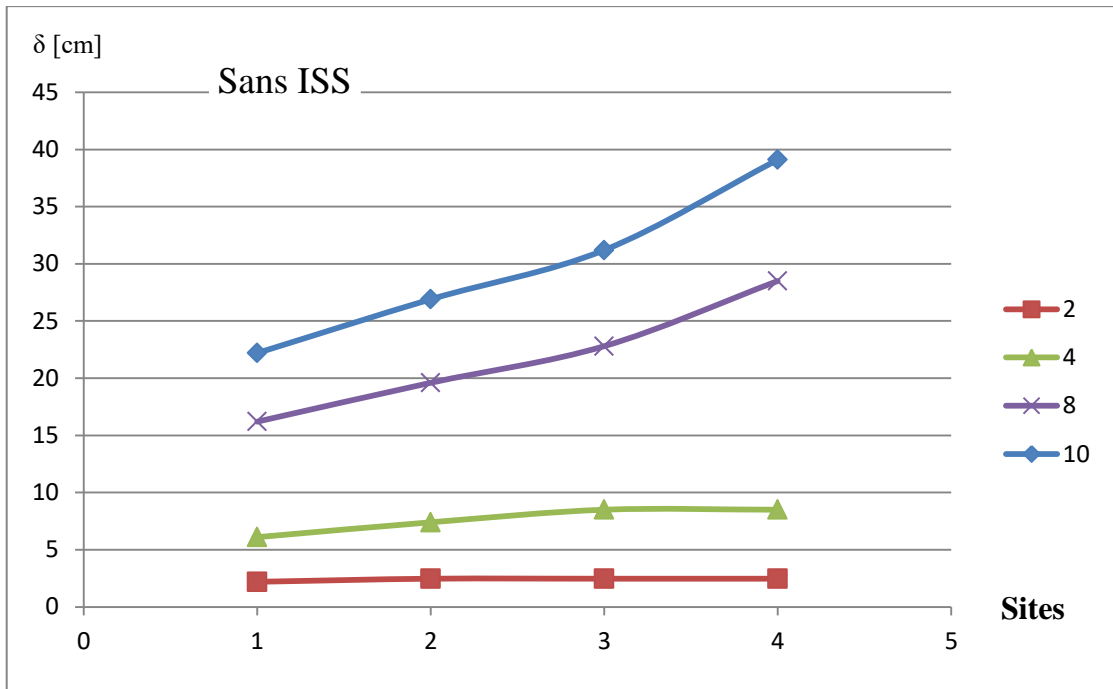


Figure IV.17: Variation de déplacement absolu en fonction de type de site _ Sans ISS.

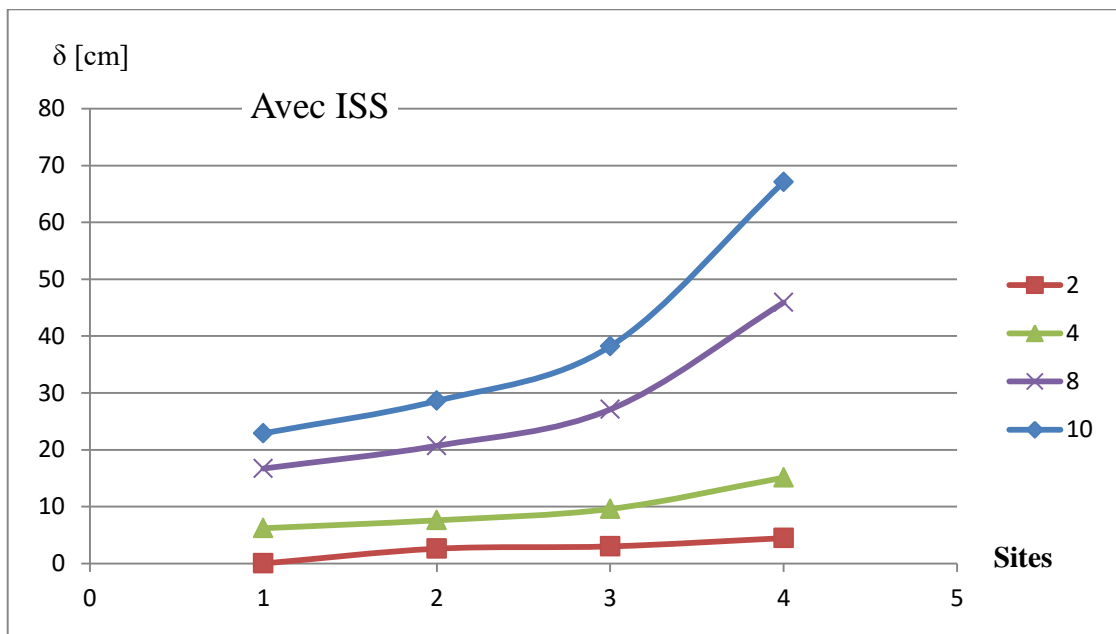
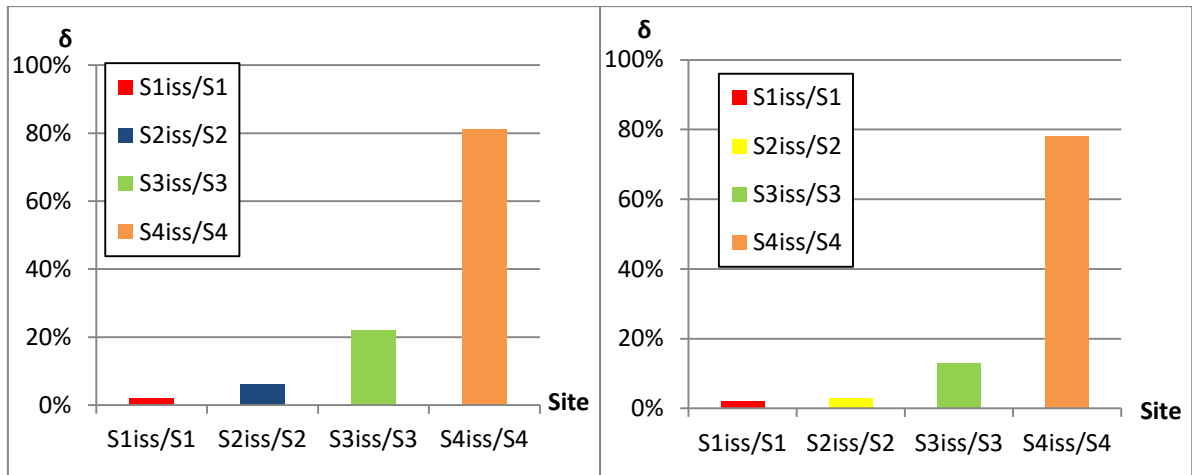
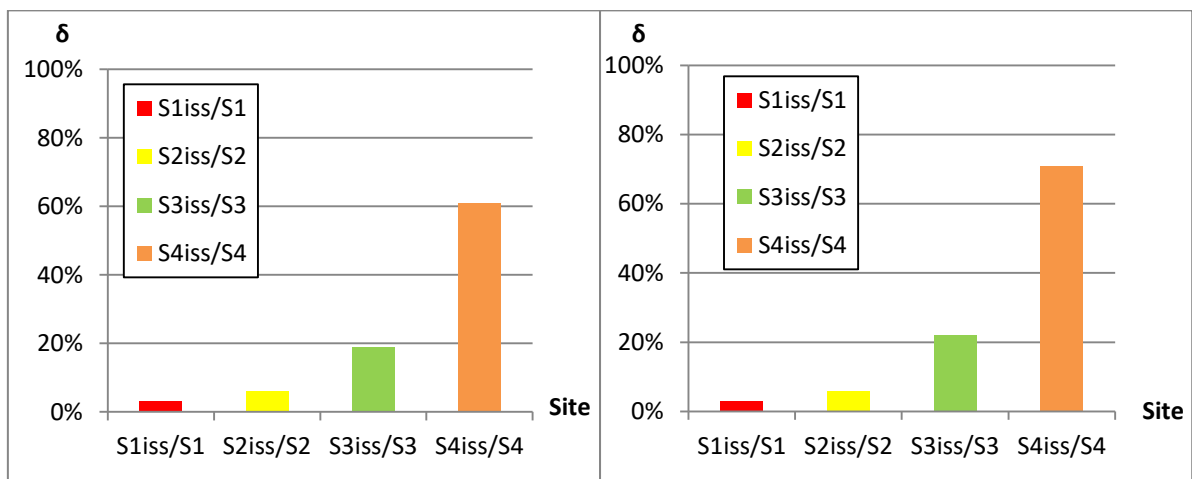


Figure IV. 18 : Variation de déplacement absolu en fonction de type de site _ Avec ISS.



(a) Structure 2 niveaux

(b) Structure 4 niveaux



(c) Structure 8 niveaux

(d) Structure 10 niveaux

Figure IV.19: Variation de l'écart entre les déplacements absolus (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

La figure IV.19 montre une comparaison entre les valeurs des déplacements absolus en termes de type de sol pour les structures à 2, 4, 8 et 10 niveaux. On constate que l'écart entre le déplacement absolu des structures tenant compte l'ISS et celui des structures encastées à la base est négligeable pour les sols rocheux et fermes et pour les différent nombre des étages, cependant il est considérable pour les sols meubles et mous.

Cet écart est :

- ✓ Autour de 20% pour le sol meuble (S3)
- ✓ Varie de 60% à 80% pour le sol mou (S4).

IV.5. Influence de l'interaction sol-structure sur les efforts tranchants à la base

Les tableaux IV.18 – IV.21 et les figures IV.20 – IV.23 donnent les valeurs des efforts tranchant à la base des structures a 2 ; 4 ; 6 ; 8 et 10 niveaux, avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4), respectivement. Ces résultats représentent une comparaison entre les efforts tranchant à la base en termes de nombre des étages de structure et en termes de l'effet d'ISS.

Il est évident que l'effort tranchant à la base augmente avec l'augmentation de nombre des étages à cause de l'augmentation de la masse totale de la structure. Ceci est confirmé aussi par les résultats numériques obtenus pour l'ensemble des structures étudiées et pour les différents types de sol (S1, S2, S3 et S4).

❖ Site S1

Les efforts tranchants à la base de la structure avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.18

Tableau IV.18 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS ; Site 1.

Effort tranchant à la base				
Les niveaux	V (kN) Sans ISS		V (kN) Avec ISS	
2N	102,46		101,49	
4N	109,7		108,55	
6N	117,08		115,88	
8N	119,56		118,68	
10N	123,13		122,28	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,01	1,01	1,01	1,01	1,01

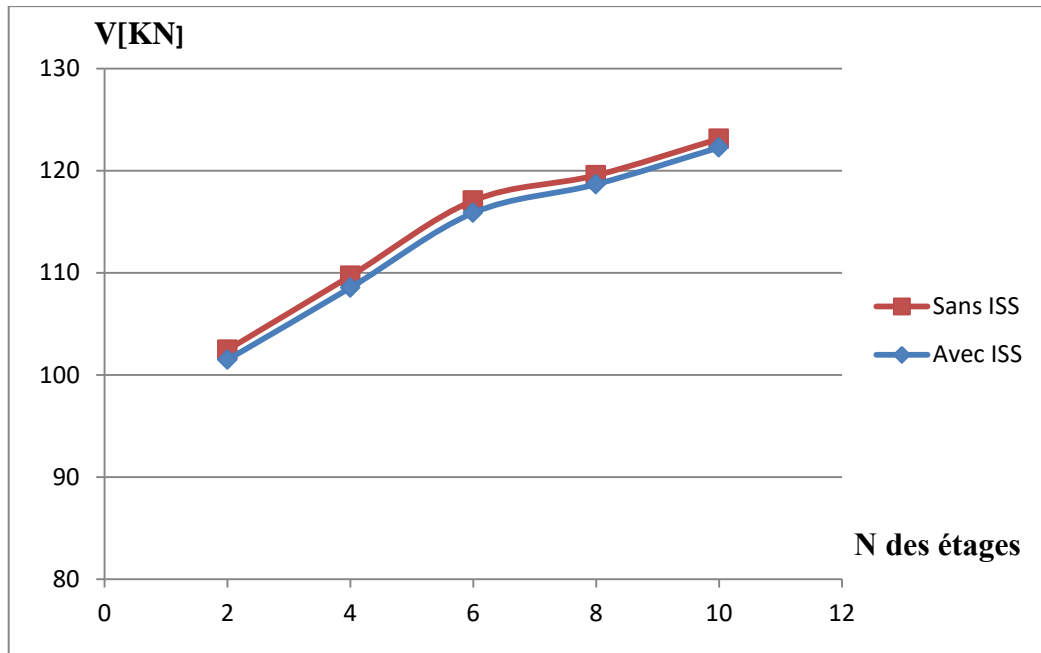


Figure IV.20 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.

Le Tableau IV.18 et la figure IV.20 montrent que l'effort tranchant à la base des structures tenant compte de l'effet d'ISS est légèrement inférieur à celui des structures encastrees à la base et implantées sur un sol rocheux (site S1). L'écart de résultats des deux types de structures (avec et sans ISS) ne dépasse pas 1%.

❖ Site S2

Les efforts tranchants à la base de la structure avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.19.

Tableau IV. 19 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S2.

Effort tranchant à la base				
Les niveaux	V (Kn) Sans ISS		V (Kn) Avec ISS	
2N	103,78		102,41	
4N	115,2		112,89	
6N	124,4		123,41	
8N	127,48		126,56	
10N	133,3		130,76	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,01	1,02	1,01	1,01	1,02

Identiquement au sol rocheux, l'effet d'ISS sur l'effort tranchant à la base des structures implantées sur un sol ferme (site S2) est négligeable. L'effort tranchant à la base des structures tenant compte de l'effet d'ISS est légèrement inférieur à celui des structures encastrees à la base.

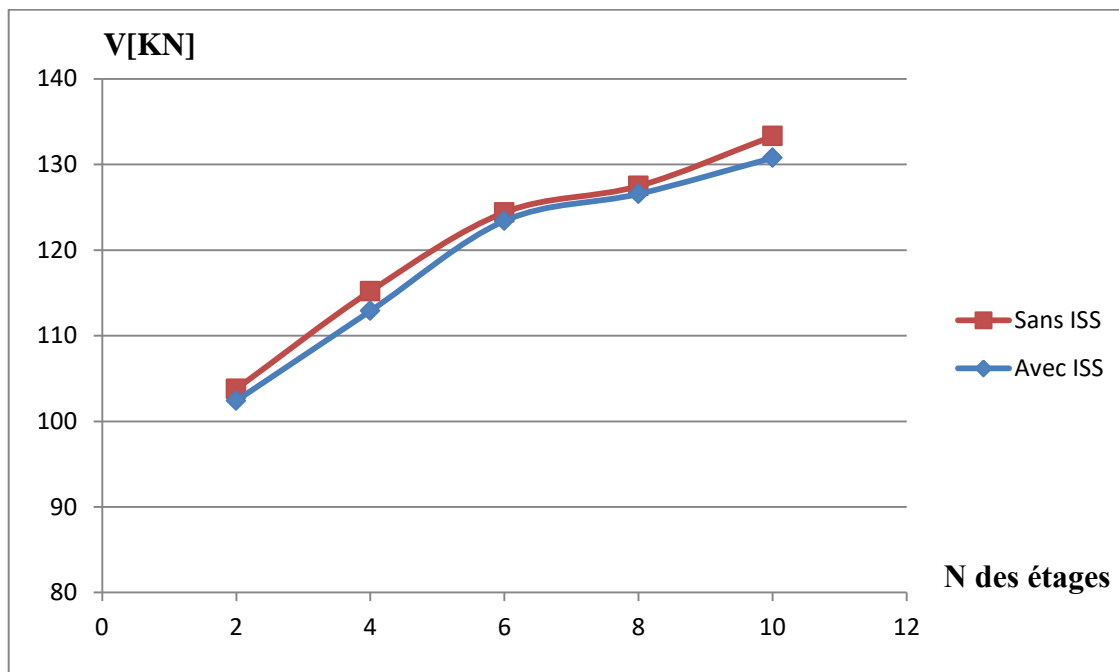


Figure IV. 21 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.

❖ Site S3

Tableau IV. 20 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S3.

Effort tranchant à la base				
Les niveaux	V (Kn) Sans ISS		V (Kn) Avec ISS	
2N	103,78		102,53	
4N	120,28		117,89	
6N	132,01		129,54	
8N	137,01		132,02	
10N	144,24		135,73	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,01	1,02	1,02	1,04	1,06

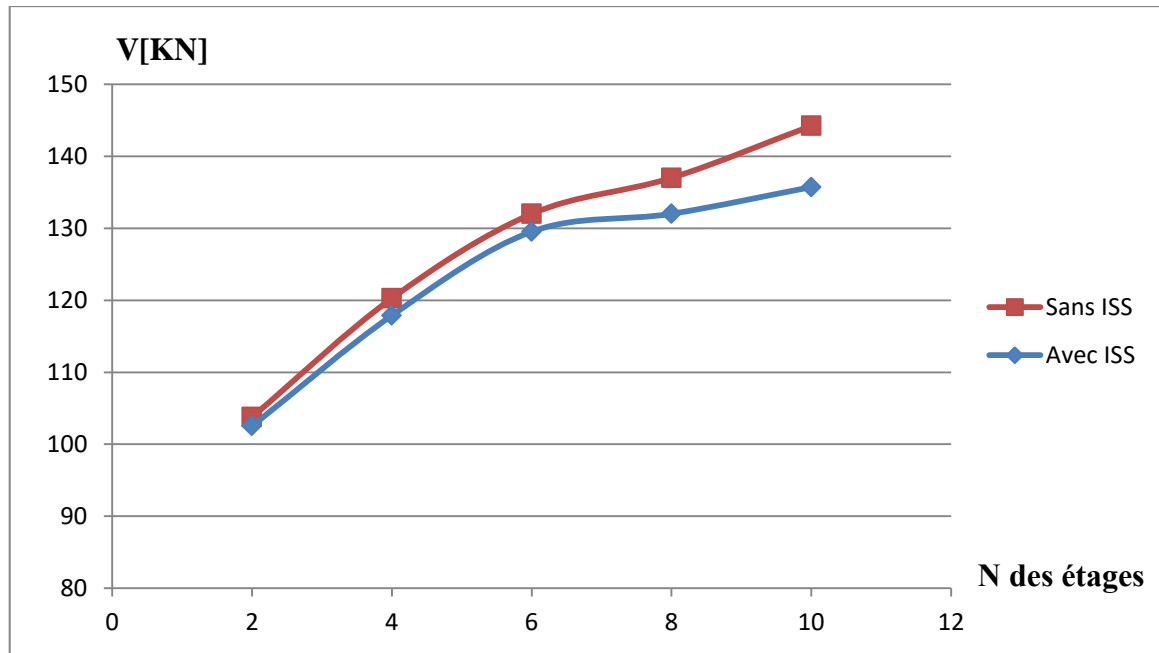


Figure IV.22: Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.

La figure IV.22 montre que, pour les sites S3 (sol meuble), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur les valeurs de l'effort tranchant par rapport à celle des structures encastées à la base, en particulier pour les structures à un nombre d'étages élevé. L'écart entre les résultats de deux types de structures (avec et sans ISS) est de 6% pour une structure à 10 niveaux (Tableau IV.20).

❖ Site S4

Les efforts tranchants à la base de la structure avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.21

Tableau IV. 21 : Effort tranchant à la base de la structure avec et sans ISS de Site S4.

Effort tranchant à la base				
Les niveaux	V (KN) Sans ISS		V (KN) Avec ISS	
2N	103,78		103,13	
4N	126,76		123,73	
6N	148,76		133,82	
8N	154,76		134,44	
10N	163,63		137,36	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,01	1,02	1,11	1,15	1,19

La figure IV.23 montre que, pour les sites S4 (sol mou), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur l'effort tranchant à la base de la structure par rapport à celle des structures encastrees à la base, en particulier pour les structures a un nombre d'étages supérieures à 4N. L'écart entre les résultats de deux types de structures (avec et sans ISS) est varié entre 11% à 19% en fonction de nombre des étages (Tableau IV.21).

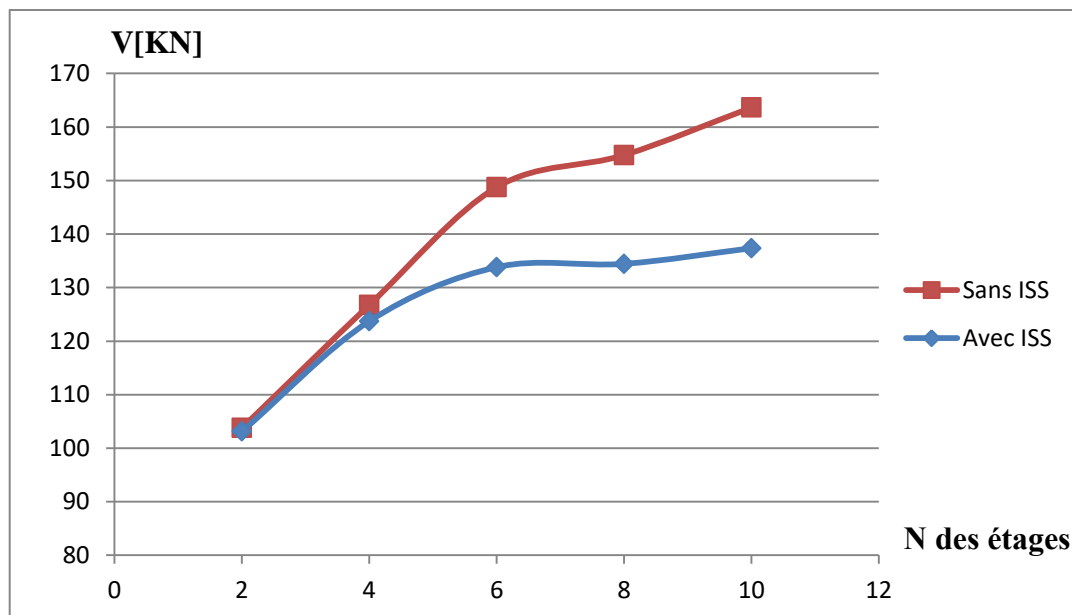


Figure IV. 23 : Variation de l'effort tranchant (en kN) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.

Les figures IV.24 et IV.25 représentent la variation de l'effort tranchant à la base en fonction de la rigidité de sol, des structures avec et sans ISS, respectivement. Ces figures montrent que l'effort tranchant augmente progressivement avec la diminution de la rigidité du sol. Mais cette augmentation est autant plus allongée pour les structures à un nombre d'étage élevé, en particulier pour les structures sans ISS, car on a trouvé que l'ISS conduit à la réduction de l'effort tranchant à la base.

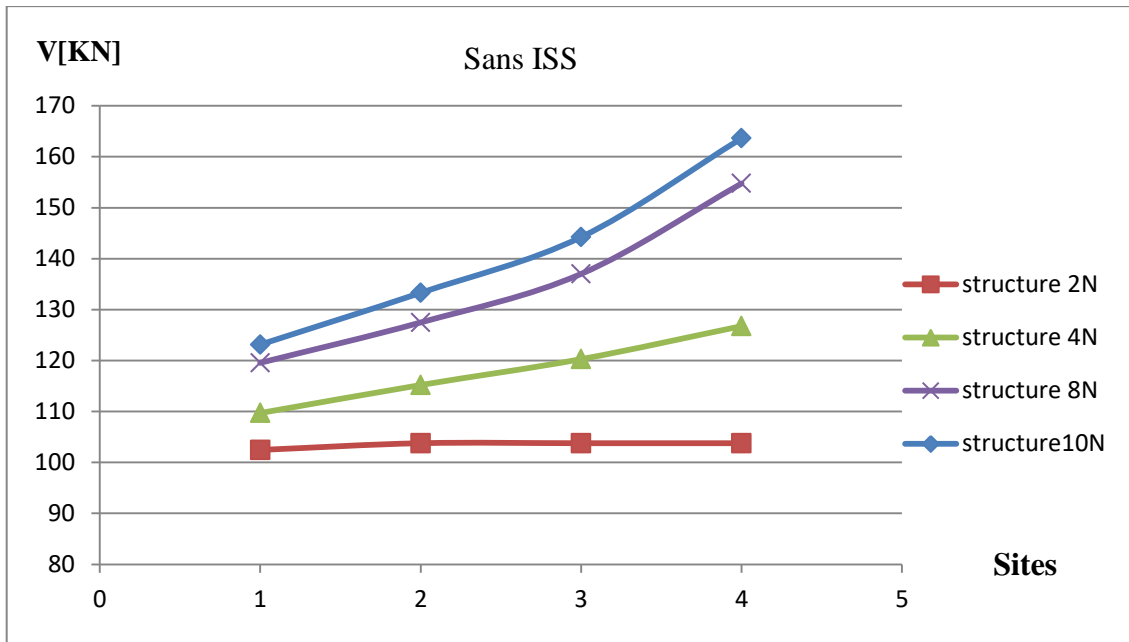


Figure IV. 24 : Variation de l'effort tranchant à la base en fonction de type de site _ Sans ISS.

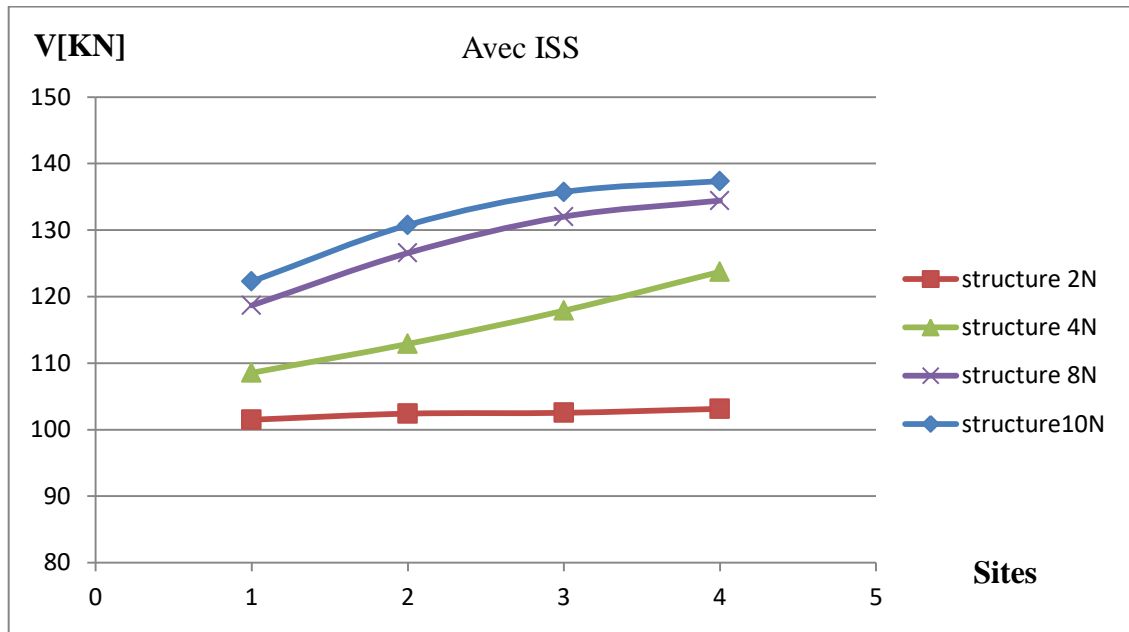
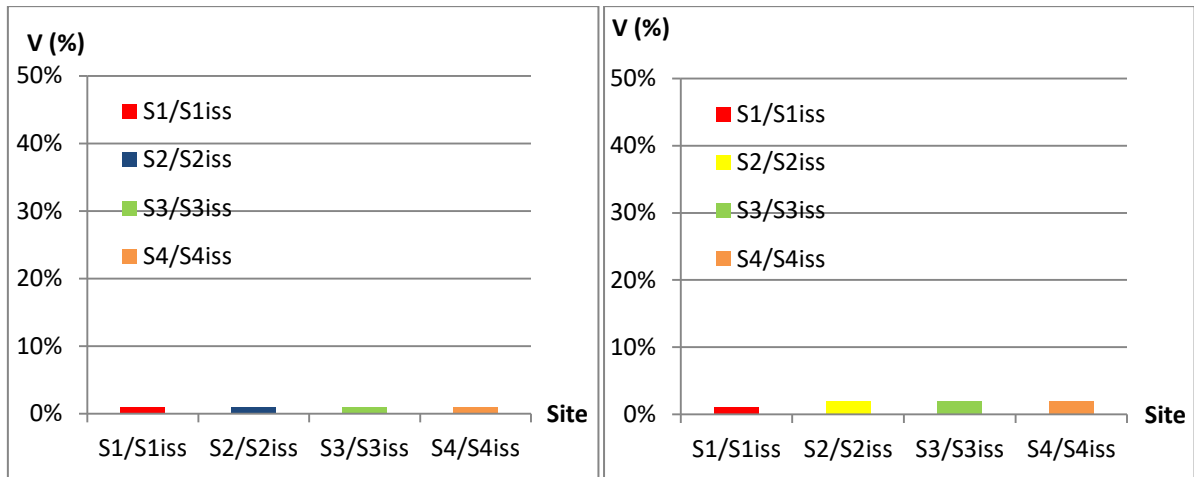
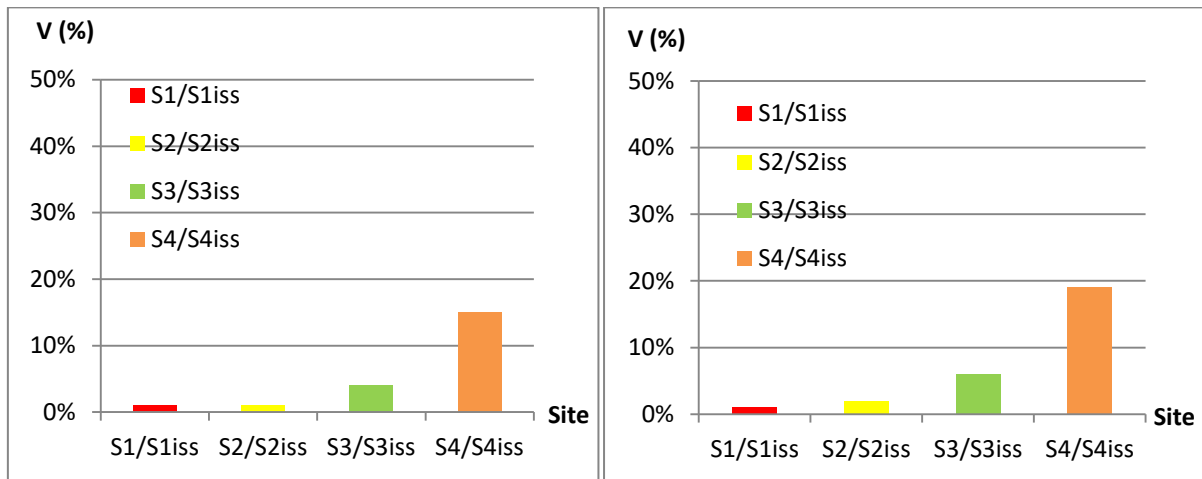


Figure IV. 25 : Variation de l'effort tranchant à la base en fonction de type de site _ Avec ISS.



(a) Structure 2 niveaux

(b) Structure 4 niveaux



(c) Structure 8 niveaux

(d) Structure 10 niveaux

Figure IV. 26: Variation de l'écart entre les efforts tranchant à la base (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

La figure IV.26 montre l'évolution de l'écart entre les valeurs des efforts tranchants à la base des fondations avec et sans ISS en fonction de la rigidité de sol pour les structures à 2, 4, 8 et 10 niveaux. On constate que l'écart entre l'effort tranchant des structures tenant compte l'ISS et celui des structures encastées à la base est négligeable pour les structures a un nombre des étages limité (2N, 4N). Cependant pour les structures multiétage cet écart est :

- ✓ Autour de 5% pour le sol meuble (S3)
- ✓ Varie de 13% à 20% pour le sol mou (S4).

IV.6. Influence de l'interaction sol-structure sur les moments aux appuis des poteaux

Les tableaux IV.22 – IV.25 et les figures IV.27 – IV.30 donnent les valeurs des moments fléchissant maximum au niveau des appuis des poteaux des structures à 2 ; 4 ; 6 ; 8 et 10 niveaux, avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4), respectivement. Ces résultats représentent une comparaison entre les moments aux appuis en termes de nombre des étages de structure et en termes de l'effet d'ISS.

Il est évident que les moments aux appuis des structures sans ISS sont plus grands que ceux des structures avec ISS à cause de l'effet d'encastrement. Ceci est confirmé aussi par les résultats numériques obtenus pour l'ensemble des structures étudiées et pour les différents types de sol (S1, S2, S3 et S4).

Les figures IV.27 – 4 IV.30 montrent que le moment maximum aux appuis augmente progressivement avec l'augmentation de nombre des étages, puis il se stabilise pour les structures à un nombre des étages supérieurs à 6 niveaux.

❖ Site S1

Les moments aux appuis des poteaux avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.22

Tableau IV. 22 : Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S1.

Moments aux appuis				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS			M (KN.m) Avec ISS
2N	87,23			86,12
4N	104,1			102,29
6N	124,72			122,72
8N	126,13			123,87
10N	134,43			132,2
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,01	1,02	1,02	1,02	1,02

La figure IV.27 montre que, pour les sites rocheux (S1), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé conduit à une légère réduction du moment aux appuis par rapport aux structures encastres à la base. Cette réduction est de 2% (Tableau IV.22).

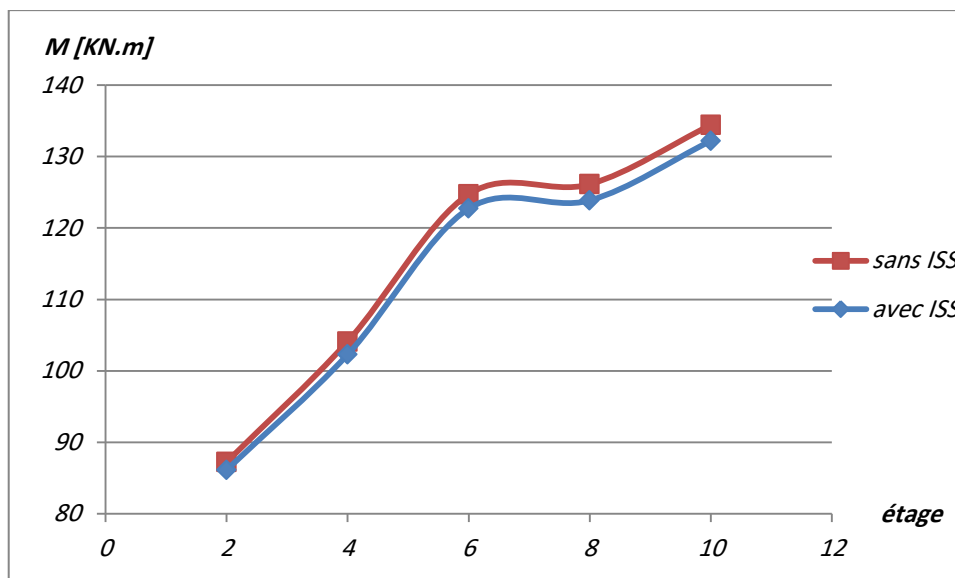


Figure IV. 27 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.

❖ Site S2

Les moments aux appuis des poteaux avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.23

Tableau IV. 23 : Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S2.

Moments aux appuis				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS		M (KN.m) Avec ISS	
2N	88,58		88,36	
4N	124,13		120,44	
6N	148,87		144,87	
8N	151,84		147,7	
10N	161,91		157,5	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,00	1,03	1,03	1,03	1,03

De même pour les sites fermes (S2), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a une légère réduction du moment aux appuis par rapport aux structures encastree à la base (figure IV. 27). Cette réduction peut atteindre 3% (Tableau IV. 22).

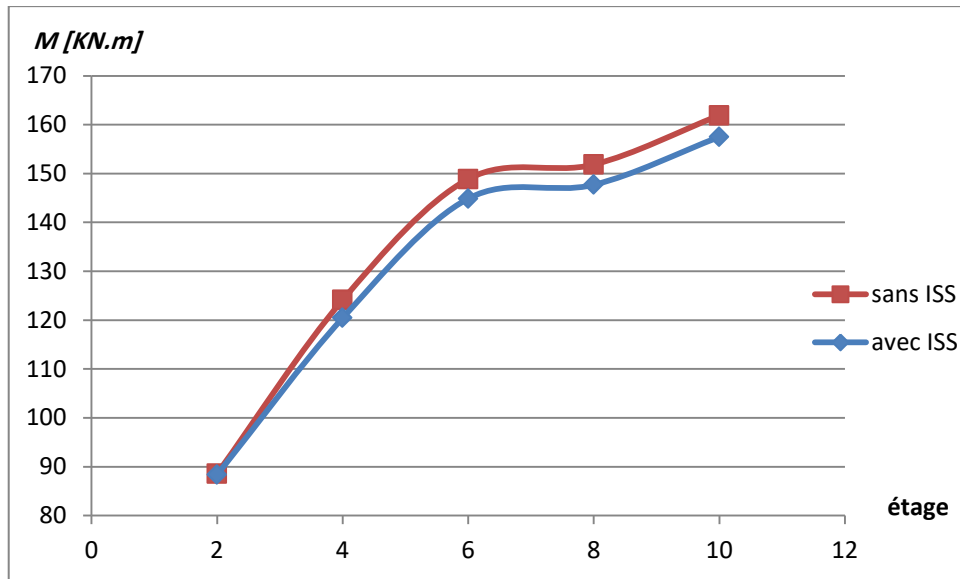


Figure IV. 28 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.

❖ Site S3

Les moments aux appuis des poteaux avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV. 24

Tableau IV. 24 : Moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S3.

Moments aux appuis				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS			M (KN.m) Avec ISS
2N	88,58			87,26
4N	142,66			131,5
6N	170,73			159,38
8N	174,46			164,05
10N	187,16			176,62
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,02	1,08	1,07	1,06	1,06

La figure IV. 29 montres que, pour les sites meubles (S3), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur la réduction du moment aux appuis par rapport aux structures encastéré à la base. Cette réduction est autour de 7% (Tableau IV. 24).

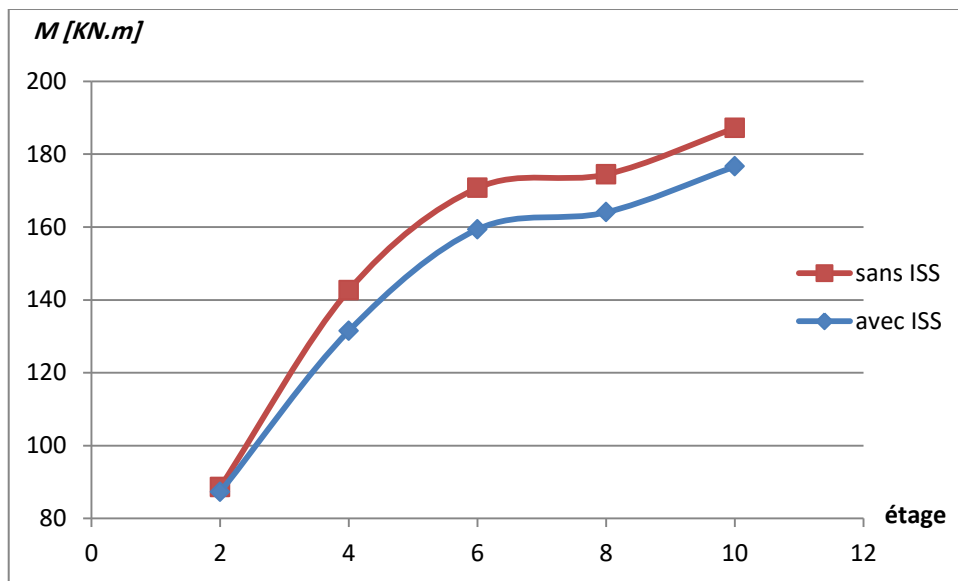


Figure IV. 29 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.

❖ Site S4

Les moments aux appuis des poteaux avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.25

Tableau IV. 25 : Moment aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS de Site S4.

Moments aux appuis				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS		M (KN.m) Avec ISS	
2N	88,58		86,64	
4N	166,38		154,04	
6N	210,83		193,46	
8N	215,07		205,67	
10N	231,01		229,6	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,02	1,08	1,09	1,05	1,01

Également pour les sites mous (S4), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur la réduction du moment aux appuis par rapport aux structures encastree à la base (figure IV.30). Cette réduction est autour de 8% (Tableau IV.25).

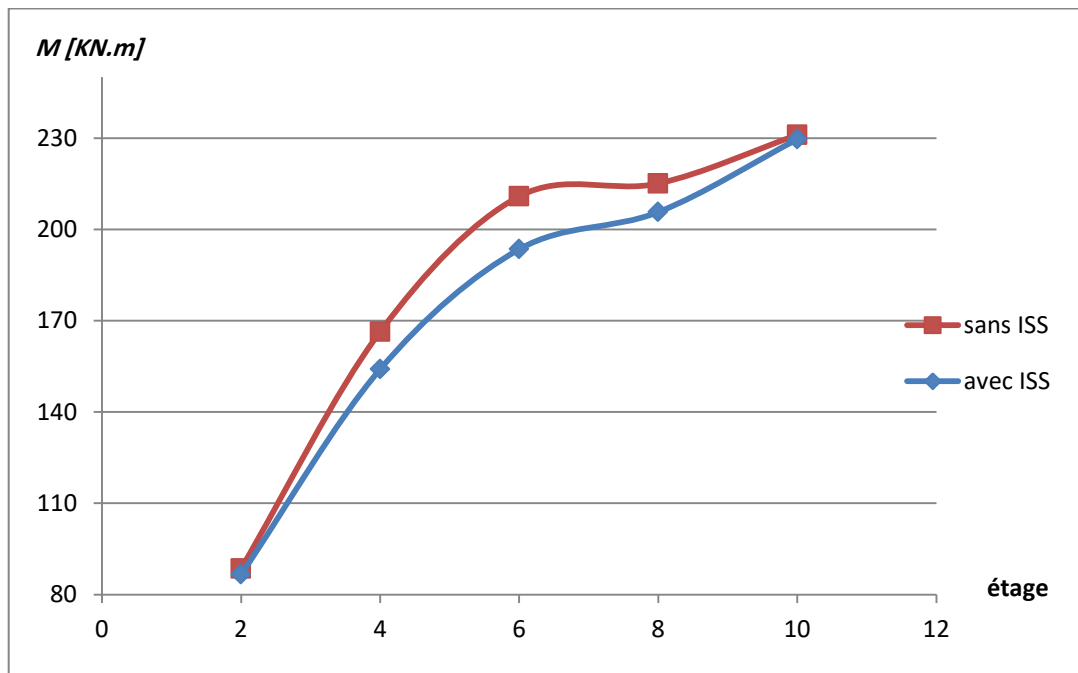
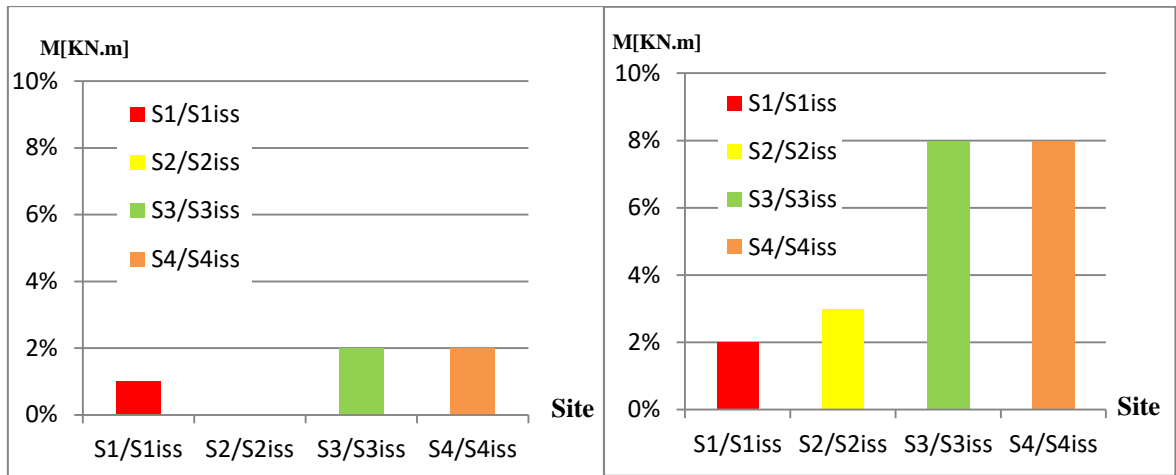


Figure IV. 30 : Variation des moments appuis des poteaux (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.

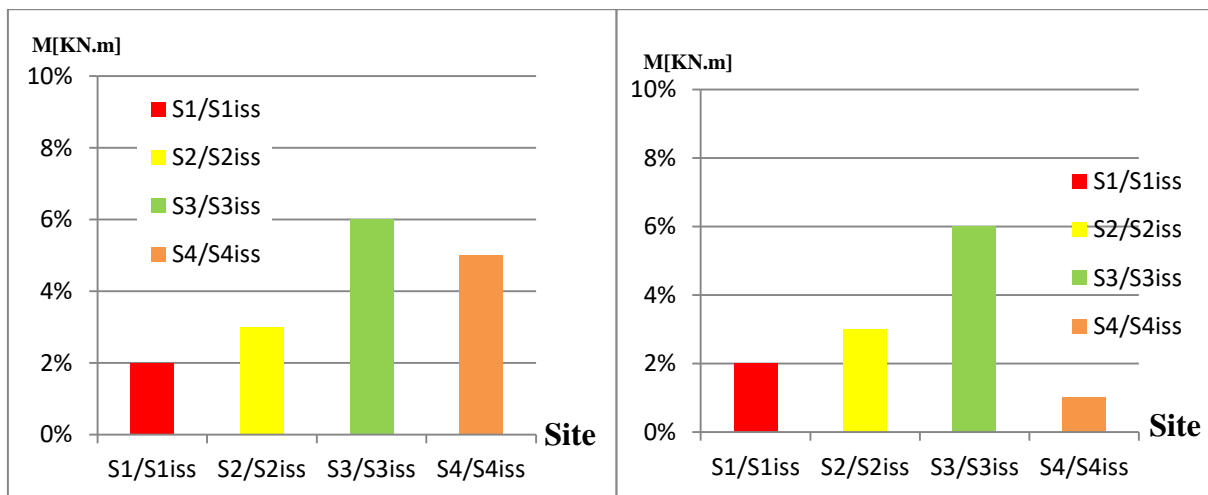
La figure IV.31 montre l'évolution de l'écart entre les valeurs des moments aux appuis des poteaux des structures avec et sans ISS en fonction de la rigidité de sol pour des bâtiments à 2, 4, 8 et 10 niveaux.

On constate que l'écart entre les moments aux appuis poteaux des structures tenant compte l'ISS et celui des structures encastrees à la base subit une augmentation pour les différents sites. Cette augmentation est entre 2% à 8%.



(a) Structure 2 niveaux

(b) Structure 4 niveaux



(c) Structure 8 niveaux

(d) Structure 10 niveaux

Figure IV. 31: Variation de l'écart entre les moments maximum aux appuis de poteaux (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

IV.7. Influence de l'interaction sol-structure sur les moments aux appuis des poutres

Les tableaux IV.26 – IV.29 et les figures IV.32 – IV.35 donnent les valeurs des moments fléchissant maximum au niveau des appuis des poutres des structures à 2 ; 4 ; 6 ; 8 et 10 niveaux, avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS pour les quatre types de sol (S1, S2, S3 et S4), respectivement. Ces résultats représentent une comparaison entre les moments aux appuis en termes de nombre des étages de structure et en termes de l'effet d'ISS.

Les figures IV.32 – IV.35 montrent que le moment maximum aux appuis des poutres augmente progressivement avec l'augmentation de nombre des étages, puis il se stabilise pour les structures à un nombre des étages supérieur à 6 niveaux.

❖ Site S1

Les moments aux appuis des poutres avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.26

Tableau IV. 26 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S1.

Moment aux appuis des poutres				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS		M (KN.m) Avec ISS	
2N	107,38		104,95	
4N	121,06		104,06	
6N	134,13		118,42	
8N	137,48		119,67	
10N	140,96		125,31	
Comparaison				
2N/2N ISS	4N/4N ISS	6N/6N ISS	8N/8N ISS	10N/10N ISS
1,02	1,16	1,13	1,14	1,12

La figure IV.32 montre que, pour les sites rocheux (S1), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur la réduction du moment aux appuis des poutres par rapport aux structures encasté à la base. Cette réduction peut atteindre 16% (Tableau IV.26).

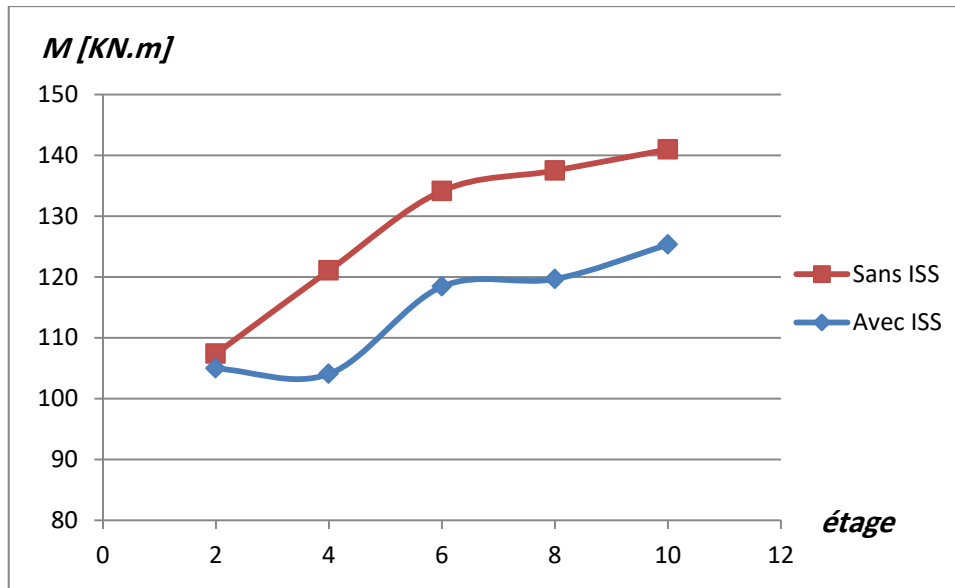


Figure IV. 32 : Variation des moments appuis des poutres (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S1.

❖ Site S2

Les moments aux appuis des poutres avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.27

Tableau IV. 27 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S2.

Moment aux appuis des poutres				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS			M (KN.m) Avec ISS
2N	108,01			89,23
4N	132			114,68
6N	147,63			131,09
8N	150,39			133,22
10N	157,45			138,83
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,21	1,15	1,13	1,12	1,13

De même pour les sites fermes (S2), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet remarquable sur la réduction du moment aux appuis des poutres par rapport aux structures encasté à la base (figure IV.33). Cette réduction peut atteindre 15% (Tableau IV.27).

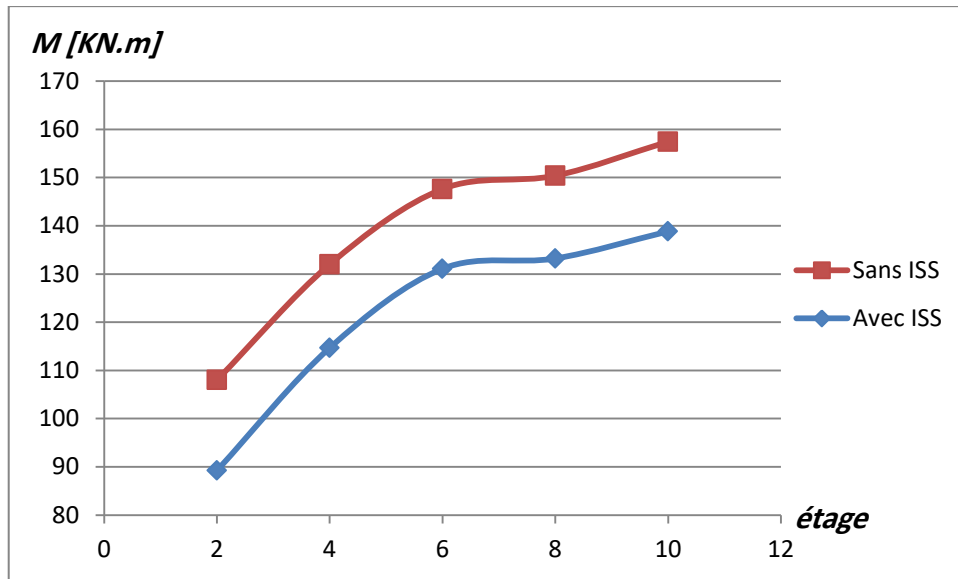


Figure IV. 33 : Variation des moments aux appuis des poutres (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S2.

❖ Site S3

Les moments aux appuis des poutres avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.28

Tableau IV. 28 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S3.

Moments aux appuis des poutres				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS		M (KN.m) Avec ISS	
2N	108,01		87,43	
4N	142,09		117,73	
6N	149,52		132,75	
8N	153,3		133,19	
10N	162,03		137,2	
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,24	1,21	1,13	1,15	1,18

La figure IV.34 montre que, pour les sites meubles (S3), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet considérable sur la réduction du moment aux appuis des poutres par rapport aux structures encastéré à la base. Cette réduction est autour de 20% (Tableau IV.28).

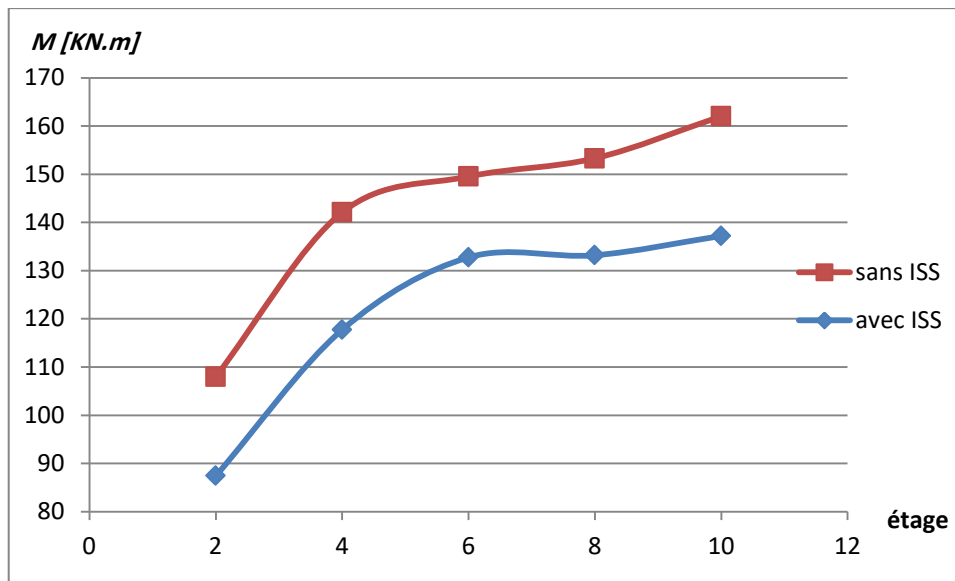


Figure IV. 34 : Variation des moments appuis (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S3.

❖ Site S4

Les moments aux appuis des poutres avec et sans ISS sont donnés dans le tableau IV.29

Tableau IV. 29 : Moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS de Site S4.

Moments aux appuis des poutres				
Les niveaux	M (KN.m) Sans ISS			M (KN.m) Avec ISS
2N	108,01			82,3
4N	154,97			113,85
6N	174,84			122,54
8N	179,2			119
10N	190,03			121,7
Comparaison				
2N/2N iss	4N/4N iss	6N/6N iss	8N/8N iss	10N/10N iss
1,31	1,36	1,43	1,51	1,56

La figure IV.35 montre que, pour les sites mous (S4), la considération de l'ISS dans les structures en béton armé a un effet considérable sur la réduction du moment aux appuis des poutres par rapport aux structures encasté à la base. Cette réduction est autour de 50% (Tableau IV.29).

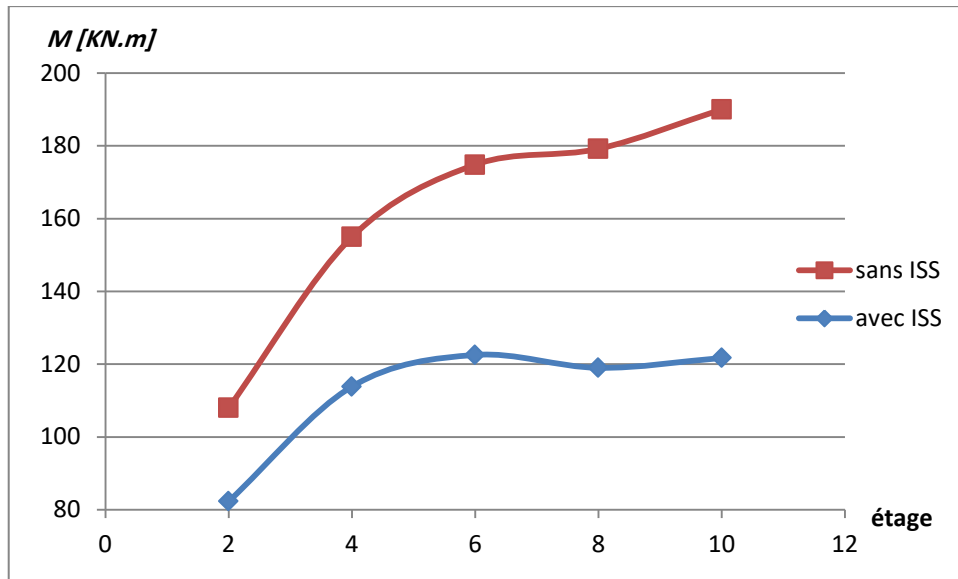
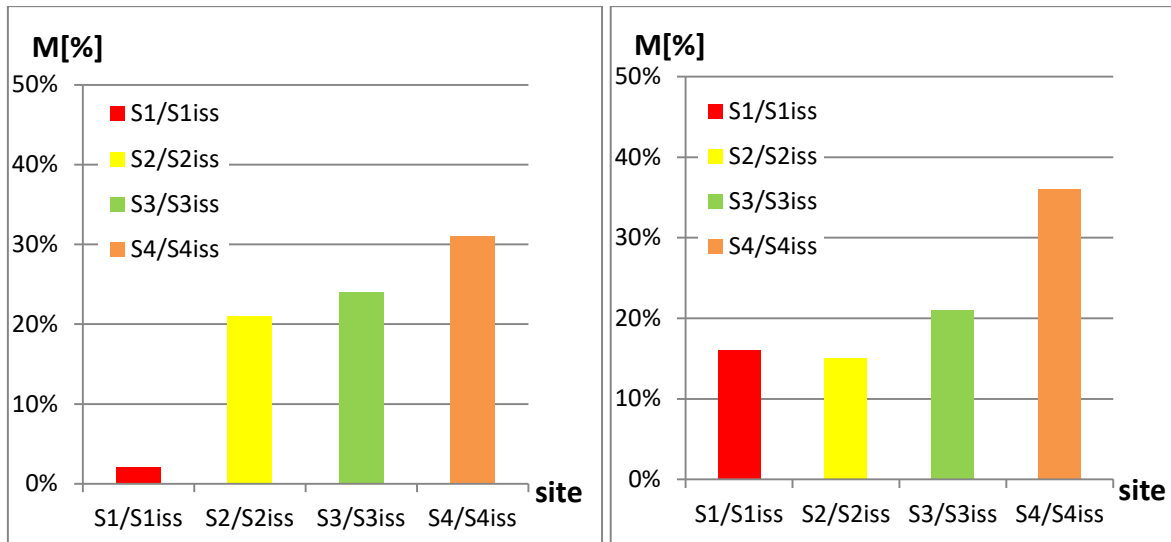


Figure IV. 35 : Variation des moments appuis (en kN.m) en fonction du nombre d'étage _ Site S4.

La figure IV.36 montre l'évolution de l'écart entre les valeurs des moments aux appuis des poutres des structures avec et sans ISS en fonction de la rigidité de sol pour des bâtiments à 2, 4, 8 et 10 niveaux.

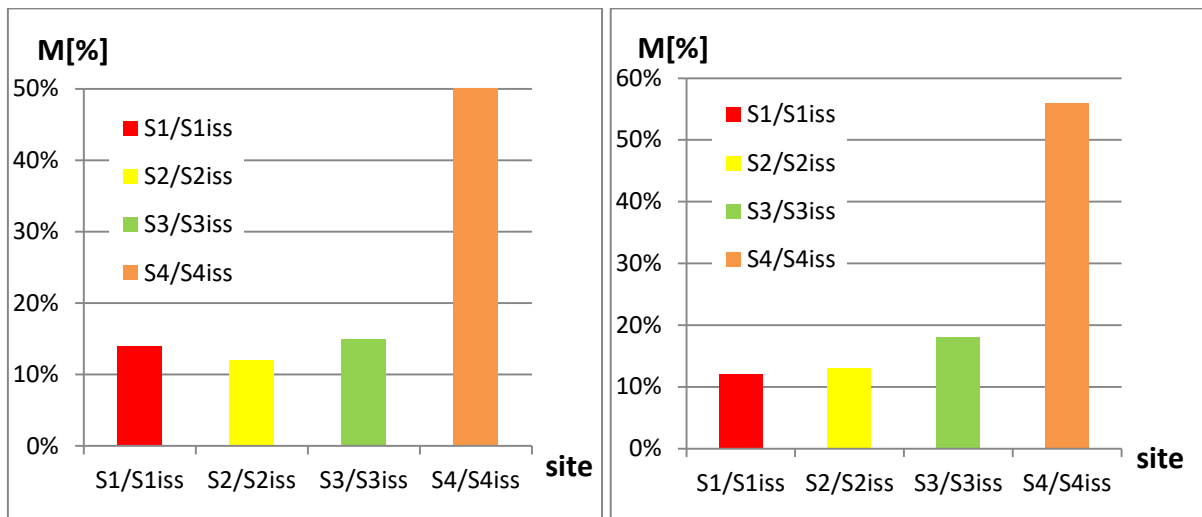
On constate que l'écart entre les moments aux appuis des poutres des structures tenant compte l'ISS et celui des structures encastrées à la base subit une augmentation pour les différents sites. Cette augmentation est d'autant plus grande que le sol est déformable (S4). Ce qui signifie que la considération de l'ISS conduit à une diminution des moments aux appuis des poutres, par conséquent une réduction des sections. Cette réduction est :

- ✓ Entre 10% à 20% pour le site S1, S2 et S3
- ✓ Entre 30% à 55% pour le site S4



(a) Structure 2 niveaux

(b) Structure 4 niveaux



(c) Structure 8 niveaux

(d) Structure 10 niveaux

Figure IV. 36: Variation de l'écart entre les moments maximum aux appuis de poteaux (avec et sans ISS) en fonction de la rigidité de site.

IV.8. Influence de l'ISS sur le déplacement des structures contreventées

Dans le but d'examiner l'effet d'ISS sur le comportement des structures contreventées, on présente dans ce qui suit une comparaison entre les déplacements d'une structure contreventée avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS. La structure considérée est celle à 10 niveaux implantée sur le site de catégorie S4. Deux murs en voile en béton armé ont été déposés dans chaque direction sismique avec une épaisseur de 20 cm. Les voiles sont

considérés encastrés à la base dans tous les cas. La figure IV.37 présente la disposition des voiles adoptée.



Figure IV. 37 : Disposition des voiles des structures avec et sans ISS.

IV.8.1. Déplacement relative

Le Tableau IV.30 montre une comparaison entre les valeurs de déplacement relative maximum des structures contreventées et non contreventée, avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS.

Tableau IV. 30 :Déplacements relatifs de la structures 10N contreventée et non contreventée, avec et sans ISS _ Site S4.

Non contreventée		Contreventée	
sans ISS	avec ISS	sans ISS	avec ISS
5.8	8	2.6	2.9
Comparaison			
10N ISS /10N		10N ISS /10N	
1.38		1.11	

Il est évident que les déplacements relatifs obtenus après le contreventement de la structure sont largement inférieurs de ceux de la structure non contreventée. Ce qui est confirmé par les résultats numériques.

Aussi, il faut noter que la combinaison de charge recommander par le RPA99 pour les ossatures autostables est $G+Q\pm 1.2E$. Cependant celle utilisée pour les ossatures mixtes (contreventées) est $G+Q\pm E$. Ce qui explique la réduction importante des résultats obtenus de la structure contreventée par rapport à ceux de la structure non contreventée dans tous ce qui suit.

Le Tableau IV.30 montre que l'écart entre les résultats de déplacement relative des structures avec et sans ISS est devenue 11% au lieu 38% grâce au contreventement. Donc, on conclue que la considération de l'ISS conduit à une augmentation de 11% de déplacement relative d'une structure multiétage implantée sur un sol très meuble (cas plus défavorable).

IV.8.2. Effort tranchant à la base

Le Tableau IV.31 montre une comparaison entre les valeurs de l'effort tranchant à la base des structures contreventée et non contreventée, avec et sans tenir compte de l'effet d'ISS.

Tableau IV. 31 : Effort tranchant à la base de la structures 10N contreventée et non contreventée, avec et sans ISS _ Site S4.

Non contreventée		Contreventée	
sans ISS	avec ISS	sans ISS	avec ISS
163,63	137,36	135,98	115,84
Comparaison			
10N/10N ISS		10N/10N ISS	
1,19		1,17	

On remarque que l'écart entre les résultats de l'effort tranchant à la base des structures avec et sans ISS est devenue 17% après avoir contreventé la structure au lieu 19%. Donc, on conclue que la considération de l'ISS conduit à une diminution de 17% de l'effort tranchant à la base d'une structure multiétage implantée sur un sol très meuble (cas plus défavorable).

Conclusion générale

L'étude de comportement sismique des ouvrages en Génie Civil nécessite souvent la prise en compte des conditions de contact et d'interface sols-structures. Les recherches en cours visent à améliorer les méthodes de calcul des ouvrages par une meilleure connaissance du phénomène de l'interaction sol structure. Le présent travail constitue une contribution dans ce sens.

D'après la recherche bibliographique menée au terme de ce travail, on a constaté que l'ISS est composée de deux parties essentielles ; l'interaction cinématique et l'interaction inertielle. Ces deux interactions affectent le comportement sismique des bâtiments en termes de flexibilité et d'amortissement. On a constaté aussi, après présentation des différentes méthodes, que la méthode de sous structure semble la plus simple à utiliser pour modéliser un phénomène d'ISS. Cette méthode ne demande qu'une détermination facile des impédances dynamiques de la fondation qui sont représentées par des ressorts élastiques au court d'analyse.

L'objectif de notre présent travail consiste à analyser les 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-Resenblueth) qui caractérisent la déformation linéaire de celui-ci selon trois directions.

La réponse sismique des structures étudiées est analysée numériquement, via un logiciel d'élément finis *Robot Autodesk*, les résultats obtenus du comportement des structures en béton armé en tenant compte l'ISS, est comparé avec celle des structures encastées à la base.

Pour le calcul dynamique, la réponse de la structure dépend des caractéristiques mécaniques et aux propriétés du sol. Le règlement RPA99 mentionne quatre types de sols classés selon leur rigidité. Ces types de sol ont été considérés dans cette étude. Le sol a été considéré homogène, donc assimilable à un milieu continu, et modélisé par des ressorts. Cinq structures de type bâtiments ont été étudiées avec différent nombre d'étage.

Les résultats présentés dans cette étude avec les hypothèses considérées et les données de problème adoptées ont montré l'importance de l'interaction sol-structure dans la réponse d'une structure notamment pour les sols meuble et mou. Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

- On a constaté que la flexibilité du sol influe sur la réponse dynamique (modale) de la structure (période fondamentale plus élevée). Cette influence augmente avec la hauteur de la structure d'une façon remarquable.
- On a constaté que les déplacements relatifs et absolus des structures étudiées augmentent avec l'augmentation de nombre des étages et ceci pour les différents types de sol (S1, S2, S3 et S4). Ce qui confirme que les structures élancées sont plus flexibles que les structures de faible élancement.
- La considération de l'ISS conduit à une réduction de l'effort tranchant à la base des structures par rapport aux structures encastrees à la base. Cette diminution est inférieure à 5% pour le sol meuble (S3), et varie de 13% à 20% selon la hauteur pour le sol mou (S4).
- La considération de l'ISS conduit à une réduction des moments aux appuis des poteaux par rapport aux structures encastrees à la base. Cette diminution est inférieure à 8% pour les sols déformables.
- La considération de l'ISS conduit à une diminution des moments aux appuis des poutres, par conséquent une réduction des sections. Cette réduction est de l'ordre de 10% à 20% pour les sites S1, S2 et S3 et de 30% à 55% pour le site S4.
- Pour les structures contreventées, qui est le cas général des structures multiétages, la considération de l'ISS conduit à une augmentation de 11% du déplacement relative et une diminution de l'effort tranchant de 17% si le sol très meuble.

RECOMMANDATIONS

A partir des conclusions ci-dessus et des résultats obtenus, il apparaît que la prise en compte de l'ISS conduit à des résultats bénéfiques traduits par la réduction des sections d'une part, et à un effet désavantageux traduit par l'augmentation des déplacements d'autre part. Ceci est probablement dû à la complexité du problème qui intervient plusieurs paramètres à la fois. Aussi aux hypothèses de la méthode utilisée pour la formulation de ce problème. De ce fait il est recommandé de tenir compte de l'ISS pour les structures multiétages en zone de forte sismicité en particulier pour les sites meubles et mous. D'un point de vue des règlements parasismiques, l'effet de site est pris en compte aux spectres conventionnels des codes sismiques spécifiques à chacun des sites.

Références bibliographiques

- [1] **KHALIL, Louay.** *Influence de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des bâtiments: analyse dans les domaines linéaire et non linéaire: Influence of the soil-structure interaction on the seismic response of buildings: linear and nonlinear. analyses.* 2009. Thèse de doctorat. Université Lille I–Sciences et Technologies.
- [2] **MELMOUX, Eric.** *Secousses sismiques et équipement électriques.* Schneider Electric España SA, 1995.
- [3] **BALANDIER, P.** *Sismologie Appliquée A L'usage Des Architectes Et Ingénieurs,* collection conception parasismique cahier 4. 2004. [
- [4] <http://bhernand.chez.com/jeunes.html> .
- [5] **Règlement parasismique algérien (RPA 99/ version 2003),** *Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.*
- [6] **DAVIDOVICI, Victor.** *La construction en zone sismique: approche réglementaire, modèles d'analyse des structures, diagnostic des bâtiments existants, exemple de calculs.* Le moniteur, 1999.
- [7] **LESTUZZI, P. et BADOUX, M.** *Génie parasismique. Conception et dimensionnement des bâtiments,* viewed 25 January 2018. 2008.
- [8] **LESTUZZI, Pierino.** *Séismes et construction: éléments pour non-spécialistes.* PPUR presses polytechniques, 2008.
- [9] http://www.irsn.fr/FR/connaissances/Installations_nucleaires/La_surete_Nucleaire/risque_sismique_installations_nucleaires/Pages/3Quels_sont_les_effets_des_seismes.aspx.
- [10] **SEGHIR, Abdelghani.** *Contribution à la modélisation numérique de la réponse sismique des ouvrages avec interaction sol-structure et interaction fluide-structure: application à l'étude des barrages poids en béton.* 2010. Thèse de doctorat. Université Paris-E.
- [11] **CLOUTEAU, Didier.** *Quand les bâtiments changent le mouvement sismique.* *Géosciences*, 2006, no 4, p. 46-51.
- [12] **BOUMAÏZA, Malika.** *Contribution à l'étude et à l'analyse du comportement des barrages en terre et de leur stabilité.* 2010. Thèse de doctorat. univ-bouira. dz, Bouira, Université et bouira., univ.
- [13] **A. PECKER,** *Dynamique des structures,* Ecole des Ponts paris , Département Génie Civil et Construction, 2010.

- [14] **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.
- [15] **GRANGE, Stéphane**. *Modélisation simplifiée 3D de l'interaction sol-structure: application au génie parasismique*. 2008. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [16] **DELEUZE, G**. *Reponse a un mouvement sismique d'un edifice pose sur un sol elastique*. Annales de l'institut technique du batiment et des travaux publics, 1967, vol. 1967, no 234, p. 883-902.
- [17] **KRAMER, Steven Lawrence, et al**. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India, 1996.
- [18] **Kutanis. M. & M. Elmas**, 2001 : *Non-linear Seismic Soil-Structure Interaction Analysis Based on the Substructure Method in the Time Domain*, in Journal of Structural Engineering Vol. 25, 617-626.
- [19] **WOLF, John P. et DEEKS, Andrew J**. *Foundation vibration analysis: A strength of materials approach*. Elsevier, 2004.
- [20] **SHAKIB, Hamzeh et FULADGAR, A**. *Dynamic soil–structure interaction effects on the seismic response of asymmetric buildings*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, vol. 24, no 5, p. 379-388.
- [21] **OUDJENE, Marc, MEGHLAT, E. M., et BOUAFIA, Youcef**. *Influence de la catégorie de site sur le comportement sismique des structures rigides*. 2005, application des règles parasismiques algériennes 99. In : 7e colloque national en calcul des structures.
- [22] **C.B.A.93**, **Règles de conception et de calcul des structures en béton armé**.
- [23] **TORKIA, Haitem**. *Etude de l'effet de l'interaction sol structure ISS sur la réponse dynamique des structures en béton armé*. 2017. Thèse de doctorat. Université de Batna 2.
- [24] **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.
- [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] **Alain Capra, Victor Davidovici** “Calcul Dynamique Des Structure En Zone Sismique ” 19

عنوان المذكرة: دراسة تأثير تفاعل التربة والبنية على الاستجابة الزلزالية للمباني.

المؤطر: قطيشة مسعودة و بلكل حيزية

اللقب: الإسم: قرقر لامين و بوشلاغم محمد

ملخص: ترتبط الاستجابة الزلزالية للهياكل بالحركات الزلزالية للأرض والخصائص الميكانيكية والفيزيائية للهياكل والأرضية، ولذلك فإن هناك حتما تأثير متبادل بين الهيكل والبيئة الخارجية. تكمن الإشكالية هنا في كيفية تحليل هذا التفاعل بين الأرضية والبناء ومدى تأثيره على الاستجابة الديناميكية للهياكل.

يتضمن هذا العمل دراسةً حول التفاعل أرضية بناء على السلوك الزلزالي للهياكل من نوعية البنايات. تم نمذجة التربة بواسطة نوابض. يوضح هذه الدراسة تحليل الاستجابة الزلزالية للهياكل، على العناصر التالية: الدور الأساسي، الإزاحة، العزم وقوة القص للحالتين (مع وبدون التفاعل) أهمية الأخذ بالاعتبار لهذه الظاهرة في مرحلة تصميم المشروع وذلك حسب الأنواع المختلفة من التربة حسب ما أوصت به المقاييس المعمول بها.

الكلمات المفتاحية: تفاعل بناية الأرضية، الزلزال، أطياف الاستجابة، النمذجة، الروبوت.

Memory title: Study of the influence of soil-structure interaction on the seismic response of buildings.

Name First name: Guerguer Lamine, Bouchelaghem Mohamed Directed by : Gotteicha M, Bellakehal H

Abstract: The seismic response of a structure is related to the seismic motions of the ground and to the mechanical and physical properties of the structure and the soil. Therefore, there is interaction between the structure and the external environment. The complexity of the soil-structure interaction problem consists in the integration and coupling of the two elements, soil and structure. This work involves a numerical analysis of the effect of the soil-structure interaction on the seismic behavior of building-type structures. The soil is modeled using the spring elements.

The analysis of the seismic response of the structures, namely the fundamental period, the displacement, the moment and the evolution of the shear force developed at the base of the structures with and without interaction shows the importance of taking this phenomenon into account at the project design stage for different types of soil as recommended by the current regulations.

Keywords: Soil structure interaction, earthquake, response spectrum, Modeling, Robot.

Titre du mémoire : Etude de l'influence de l'interaction sol-structure sur la réponse sismique des bâtiments.

Nom Prénom: Guerguer Lamine et Bouchelaghem Mohamed Encadreurs: Gotteicha M et Bellakehal H

Résumé : La réponse sismique d'une structure est liée aux mouvements sismiques 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 complexité du problème d'interaction sol structure réside dans l'intégration et le couplage des deux éléments, le sol et la structure. Le présent travail comporte une analyse numérique de l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement sismique des structures de type bâtiments. Le sol est modélisé à l'aide des éléments de ressorts.

L'analyse de la réponse sismique des structures à savoir la période fondamentale, le déplacement, 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-clés : Interaction sol structure, séisme, spectres de réponse, Modélisation, Robot.